Christian Härle, Jens Jäkel, Guido Sand (Hrsg.)

TAGUNGSBAND AALE 2022

Wissenstransfer im Spannungsfeld von Autonomisierung und Fachkräftemangel

18. Fachkonferenz | 09. - 11. März 2022 | Hochschule Pforzheim

ISBN 978-3-910103-00-9

Tagungsband AALE 2022:

Wissenstransfer im Spannungsfeld von Autonomisierung und Fachkräftemangel
18. Fachkonferenz | Pforzheim

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Sofern durch die vergebene Lizenz keine erweiterten Rechte eingeräumt sind, ist jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ohne schriftliche Zustimmung der Urheber unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Die Autoren sind für den Inhalt ihrer Beiträge selbst verantwortlich. Die Herausgeber des Tagungsbandes übernehmen keine Gewähr, insbesondere für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte.

Open Access. © 2022

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Vorwort

Die AALE wird erwachsen

Sie haben den Konferenzband der 18-ten AALE vor sich. Der 18-te Geburtstag markiert für uns Menschen die Schwelle zum Erwachsensein. Wäre die AALE ein Mensch, würde man ihr sagen: „Du bist jetzt erwachsen. Gehe Deinen eigenen Weg!“

Um im Bild zu bleiben: In den vergangenen knapp zwei Jahrzehnten hatte die AALE rührende Geburtshelfer, strenge Erzieher und wohlmeinende Ratgeber. Sie hat zahlreiche Freunde gefunden, die sie behütet und unterstützt haben, und ist über die Landesgrenzen hinaus bekannt geworden. An der Schwelle zum Erwachsensein zeigt sich nun, ob sie reif genug ist, um in einer neuen Welt außerhalb des bekannten Elternhauses bestehen zu können.

Die neue Welt ist eine pandemische, vielleicht bald endemische Welt. In ihr haben persönliche Kontakte eine veränderte Wertigkeit. Persönliche Kontakte sind die Nervenbahnen einer jeden Konferenz – und gerade diese persönlichen Kontakte wurden eingeschränkt und vielfach als risikoreich empfunden. Und so reagierte die AALE zunächst erschrocken: Sie hat sich zurückgezogen und erstmalig in ihrer Geschichte im Jahr 2021 nicht stattgefunden.

Doch junge und vitale Erwachsene lassen sich nicht einsperren – sie bahnen sich ihren Weg in die Welt. Und dieser Weg führt die AALE im Jahr 2022 in’s Internet. Sie bricht aus den „elterlichen“ Hochschulgebäuden aus und findet erstmalig vollständig online statt. Mussten wir uns früher auf eine gemeinsame Zeit und einen gemeinsamen Ort für eine Konferenz einigen, kann in diesem Jahr jeder seinen Ort individuell wählen.

Und auf dem Weg in’s Internet hat die AALE ihren Konferenzband gleich mitgenommen. Er ist aus der „materiellen Hülle“ ausgebrochen und erscheint 2022 erstmals online und open access. Damit ist er für jeden Interessierten sofort und ohne Bezahlschranke zugänglich. Wir haben die 36 hochwertigen Beiträge in sieben Cluster eingeteilt, die verschiedene Aspekte insbesondere der Digitalisierung der Automatisierungstechnik – von der Modellbildung über die Künstliche Intelligenz bis hin zu autonomen Systemen – beleuchten. Bei der Lektüre wünschen wir Ihnen zahlreiche neue Erkenntnisse und Inspirationen.

Bleibt noch die Frage: Ist die AALE wirklich mit einem heranwachsenden Menschen vergleichbar? Zutreffender wäre wohl der Vergleich mit einem komplexen Organismus aus Freunden und Förderern der Automatisierungstechnik in Lehre und Entwicklung – also uns allen. Und so wie wir in der neuen Welt unsere persönlichen Kontakte neu gestalten, so wird sich auch die Form der AALE weiterentwickeln.

Die Herausgeber
Christian Härle, Jens Jäkel und Guido Sand
im Januar 2022

Der Veranstalter: Hochschule Pforzheim

Führend durch Perspektivenwechsel

Die Hochschule Pforzheim mit ihren drei Fakultäten – Gestaltung, Technik sowie Wirtschaft und Recht – genießt einen erstklassigen Ruf. Die Fakultäten verbinden Kreativität mit betriebswirtschaftlicher Ausbildung und technischer Präzision. Diese Kombination macht die Hochschule auch zu einem attraktiven Wissenschafts- und Forschungspartner für die regionale und überregionale Wirtschaft. Mit rund 6.200 Studierenden ist Pforzheim eine der größten Hochschulen für Angewandte Wissenschaften des Landes Baden-Württemberg.

Bild 1: Campusleben der Hochschule Pforzheim. © Ulrike Kumm

Qualifikation und Praxiserfahrung der Lehrenden auf der einen und eine intensive Kooperation mit erfolgreichen Unternehmen auf der anderen Seite legen den Grundstein für die herausragende Position der Hochschule in den Rankings. Die Hochschule Pforzheim bietet 28 Bachelor- und 19 Masterstudiengänge in den Fakultäten für Design, Technik sowie Wirtschaft und Recht. Sie genießt in Forschung und Lehre hohe Akzeptanz, die auch aus dem guten Betreuungsverhältnis resultiert. Rund 480 Professoren und Lehrbeauftragte gewährleisten, dass sich die Studierenden von Beginn an in Pforzheim gut aufgehoben fühlen.

Durch die enge Verbindung von Theorie und Praxis entwickeln sich positive Synergieeffekte, die in zahlreichen Projekten und Forschungsansätzen für die Industrie und Wirtschaft münden. Das Institut für Angewandte Forschung, zahlreiche Steinbeis-Transferzentren oder das Schmucktechnologische Institut sind nur einige erfolgreiche Bespiele hierfür.

Bild 2: Hochschule Pforzheim – Fakultät für Technik

Die Hochschule kooperiert mit mehr als 100 Partneruniversitäten weltweit, engagiert sich in internationalen Netzwerken und räumt wirtschafts- sowie unternehmensethischen Fragen einen hohen Stellenwert ein. Die Hochschule verpflichtete sich als eine der ersten weltweit zur Einhaltung der von der UN initiierten „Principles for Responsible Management Education“ (PRME).

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 3

Der Veranstalter 5

Modellbildung und Simulation

Zielsystemunabhängiger Modellbasierter Entwurf auf der Basis von MATLAB/Simulink® mit einem vollständigen Model in the Loop-Test und automatischer Code-Generierung für einen Mischprozess 11
Büchau, Bernd; Gröbe, Gerald

Analyse und Anpassung ausgewählter Optimierungsverfahren für den Digitalen Zwilling von Verdichteranlagen 23
Thiel, Robert; Jäkel, Jens; Schulze, Rico; Schleifer, Kevin

Plug & Produce im real-virtuellen Kontext fertigungstechnischer heterogener Anlagen: Steuerungsarchitektur und Virtuelle Inbetriebnahme 33
Habiger, Pascal; Hildebrandt, Gary; Drath, Rainer; Barth, Mike; Fay, Alexander; Zor, Ayhan; Marseu, Moritz

Operative Instandhaltung im Zeitalter der Digitalisierung 45
Sade, Sercan; Albers, Franziska; Bartsch, Thomas; Kowalke, Dennis

Automatisierung der Konfiguration einer virtuellen Inbetriebnahme 53
Neuner, Tobias; Brela, Matthäus

Mathematische Optimierung und Regelungstechnik

Optimierte Produktionsplanung von Trommelgalvanikanlagen 63
Reimschüssel, Sophie; Fuchs, Uwe; Sand, Guido

CPLEX-basierte Produktionsplanung 73
Herdt, Anika; Scheidig, Marcel; Jentner, Chris; Sand, Guido

Bildfilter als Analysewerkzeug im Technologiesektor von Industrie 4.0 85
Albers, Franziska; Bartsch, Thomas; Kowalke, Dennis; Sade, Sercan

Lineare Systemidentifikation des hygrothermischen Verhaltens eines Raumes zur Verwendung in Modellprädiktiven Reglern 97
Zehner, Marcel; Cavaterra, Alessio; Lambeck, Steven

Robotik und Künstliche Intelligenz

Kombinierte Optimierung für diskontinuierliche Produktion mit nicht definierten Qualitätskriterium 105
Schulz, Thomas; Nekrasov, Ivan

Entwicklung eines neuronalen Netzwerks als Basis zur automatisierten Holzartenerkennung 115
Bernöcker, Anton; Leiter, Nina; Wohlschläger, Maximilian; Versen, Martin

Untersuchungen zur echtzeitfähigen Bilderkennung mit neuronalen Netzen auf konventionellen Industriesteuerungen 125
Wree, Christoph; Raßmann, Rando; Daas, Janis; Bause, Fabian; Schönfeld, Tobias

3D-Objekterkennung mit Jetson Nano und Integration mit KUKA KR6-Roboter für autonomes Pick-and-Place 135
Wings, Elmar; Pullela, Akhila

Adaptiver Griff-in-die-Kiste – Die methodische Lücke zwischen Forschung und Industrie 145
Stuke, Tobias; Bartsch, Thomas; Rauschenbach, Thomas

Intelligente und autonome Systeme

Bedarfsorientierte Rekonfiguration einer Co-Simulation für diskrete Fertigungsanlagen 155
Härle, Christian; Barth, Mike; Fay, Alexander

Wie können heterogene Prozessdaten automatisch in einem Energiemanagementsystem zusammengeführt werden? 165
Runge, Maxim; Reiche, Leif-Thore; Niemann, Karl-Heinz; Fay, Alexander

Geschlossener Informationsfluss über den gesamten Produktlebenszyklus als Wegbereiter zur effizienten Refabrikation - Stand der Technik und Ausblick 175
Schaupeter, Lars; Vette-Steinkamp, Matthias

Virtualisierungsarchitektur für heterogene CAx-Tools im Engineering modularer Produktionssysteme 183
Hildebrandt, Gary; Habiger, Pascal; Drath, Rainer; Barth, Mike

Entwicklung und Einsatz von Code-generierungssoftware zur Effizienzsteigerung bei der Prozessanlagenautomatisierung 193
Detje, Johannes Silas; Meißner, Jan-Eric; Stolpmann, Alexander

Prozessinnovation: Selbstlernendes Assistenzsystem für die manuelle Montage 203
Jung, Janis; Hubert, Andreas; Doll, Prof. Dr.-Ing. Konrad; Kröhn, Dr. Michael; Stadler, Jochen

Augmented Reality, Virtual Reality und Gamification

Aufbau virtueller Versuchsanlagen und deren Nutzung in Lehrveranstaltungen zur Automatisierungstechnik 213
Stöcker, Christian; Othman, Moaid

Development of an application for teaching PLC and robot programming based on OPC UA 223
Zieringer, Christoph; Wittenberg, Carsten; Schneider, Frederik

3D VR Serious Games for Production & Logistics 233
Weiper, Franz Josef; Boden, Andreas; Petrovic, Marc

Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zur Schulung technischer Fachkräfte im Maschinen- und Anlagenbau 237
Hönig, Jana; Schnierle, Marc; Wehnert, Camilla; Littfinski, Daniel; Scheifele, Christian; Pfeifer, Denis; Münster, Carlos; Roth, Armin; Franz, Julia; Röck, Sascha; Verl, Alexander

Trends in der Automatisierungstechnik

Warum wir ein Security-Engineering-Informationsmodell brauchen: Motivation, Anwendungsfälle und Konzept für ein neues Domänenmodell für Security-Engineering . 247
Tastan, Emre; Fluchs, Sarah; Drath, Rainer

Industrie 5.0 – Von der Vision des menschzentrierten Ansatzes zu sozio-cyberphysischen Produktionssystemen für die Praxis 257
Günther, Norman; Prell, Bastian; Reiff-Stephan, Jörg

Remote-Engineering und bildgestützte Inbetriebnahme mit einer Web-SPS 267
Seitz, Matthias; Khushairi, Muhammad; Jürgens, Andreas; Peter, Hans

Rapid prototyping framework for automation applications based on IO-Link 277
Chavez, Victor; Cruz, Fernando; Ruchay, Marco; Wollert, Jörg

Modulare Anlagenautomation – Monitoring und erweiterte Diagnosefunktionen von Modulen 285
John, Jan; Pilous, Yannick; Große, Norbert

Entwicklung eines Werkzeugs und Prozesses für das automatisierte Schaben von Metalloberflächen 293
Eberle, Simon; Oßwald, Kai

Decentralized safety architecture for cyber-physical production systems 303
Faller, Clemens; Schwoll, Artur

Automatisierungstechnik in der Lehre

Salzburg Smart Factory Bootcamp 311
Kranzer, Simon; Saßnick, Olaf

Digital Twin Academy: From Zero to Hero through individual learning experiences 321
Ulmer, Jessica; Mostafa, Youssef; Wollert, Jörg

Das Projekt cITIcar: Autonomes Fahren als begleitende Lehr- und Lernplattform – auch in der Pandemie 331
Czekansky, Jakob; Schauer, Moritz; von Zabiensky, Florian; Bienhaus, Diethelm

Erfahrungen und Schlussfolgerungen nach drei Semestern Online-Lehre in einem Grundkurs Regelungstechnik: Struktur geben, Screencasts wieder verwenden und Präsenz aktiv nutzen 341
Rösel, Birgit

Anwendungsfälle und Konzeptentwicklung eines Pedelec-Prüfstandes 349
Weickert, Thomas; Götzmann, Walter

Autorenverzeichnis 355

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Zielsystemunabhängiger Modellbasierter Entwurf auf der Basis von MATLAB/Simulink® mit einem vollständigen Model in the Loop-Test und automatischer Code-Generierung für einen Mischprozess

B. Büchau[1], G. Gröbe[2]

Zusammenfassung

Auf der Basis eines modellbasierten Entwurfs mit MATLAB/Simulink® wird der Entwurf für einen Mischprozess einer Mischstation vorgenommen. Durch den Einsatz der Toolbox PLC Coder™ von Mathworks® kann dieser Entwurf ohne jegliche Änderungen für aktuell 12 Automatisierungssysteme verschiedener Hersteller verwendet werden, so dass dies als ein zielsystemunabhängiger Entwurf angesehen werden kann.
Der Vorteil besteht darin, dass nicht wie bisher ein klassischer Entwurf des Systems entsprechend IEC 61131 Teil 3 mit einer entsprechenden hersteller- bzw. systemspezifischen Entwicklungsumgebung durchgeführt wird, sondern ein hersteller- und systemunabhängiger Entwurf mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen von Simulink vorgenommen werden kann. Mit der verwendeten Toolbox PLC Coder™ für MATLAB/ Simulink® wird strukturierter Text nach IEC 61131 Teil 3 für das jeweilige Automatisierungssystem automatisch generiert.
Im vorliegenden Fall wird als Automatisierungssystem eine SIMATIC ET 200SP Open Controller mit entsprechenden Erweiterungsmodulen (digitale und analoge Ein- und Ausgänge usw.) und das TIA Portal in der Version 15.1 der Fa. Siemens eingesetzt.
Für den Mischprozess, eine Mischstation, werden Flüssigkeiten aus drei verschiedenen Behältern in verschiedenen vorgegebenen Mischverhältnissen und Mengen dosiert und in einen Mischbehälter geleitet. Hierfür wird der modellbasierte Entwurf primär mittels endlicher Zustandsautomaten mit einer unterlagerten Durchflussmengenregelung in insgesamt neun Subsystemen vorgenommen. Um eine möglichst hohe Genauigkeit des Mischproduktes zu erzielen, wird hierbei die Dosierung der verschiedenen Flüssigkeiten volumengesteuert vorgenommen.
Für den vollständigen modellbasierten Entwurf der Automatisierung der Mischstation, dessen Visualisierung sowie der Modellierung des HMI mittels Apps des App Designers von MATLAB/ Simulink® wird ein vollständiger Model in the Loop (MIL)-Test in Realzeit zur Verifikation des Gesamtsystems durchgeführt, der hier den Schwerpunkt darstellt.
Durch den auf einem deutlich höheren Abstraktionsniveau durchgeführten modellbasierten Entwurf und den MIL-Test werden die Implementierungs- und Inbetriebnahmephase minimal.
Abschließend werden die wesentlichen Vorteile des modellbasierten Entwurfs behandelt und ein Ausblick gegeben.

[1] Hochschule Stralsund, bernd.buechau@hochschule-stralsund.de, B. Büchau
[2] Hochschule Stralsund, gerald.groebe@hochschule-stralsund.de, G. Gröbe

Open Access. © 2022 B. Büchau, G. Gröbe
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Stichwörter

Modellbasierter Entwurf, MATLAB/ Simulink®, MIL, Model in the Loop, PLC Coder™, Automatische Codegenerierung

1 Ausgangssituation und Ziel

Die Entwicklungsprozesse und -umgebungen werden zunehmend komplexer und damit verbunden steigt auch der Aufwand für die Entwicklung von Automatisierungslösungen.
Um dies zu verbessern, besteht ein Ansatz darin, dass ein modellbasierter Entwurf auf der Basis des mittlerweile weit verbreiteten Werkzeugs MATLAB/ Simulink® mit automatischer Codegenerierung mittels einer Toolbox, dem PLC Coder™ von Mathworks®, für das jeweilige Automatisierungssystem durchgeführt wird.
Der Vorteil besteht darin, dass nicht wie bisher ein klassischer Entwurf des Systems entsprechend IEC 61131 Teil 3 mit einer entsprechenden hersteller- bzw. systemspezifischen Entwicklungsumgebung durchgeführt wird, sondern ein hersteller- und systemunabhängiger Entwurf mit den zur Verfügung stehenden Werkzeugen von Simulink vorgenommen werden kann. Mit der Toolbox PLC Coder™ für MATLAB/ Simulink® wird grundsätzlich Strukturierter Text nach IEC 61131 Teil 3 für das jeweilige Zielsystem automatisch generiert, womit keine speziellen Programmiersprachenkenntnisse des Entwicklers erforderlich sind und durch die immer gleiche Generierung des Quellcodes für Algorithmen ein individueller Programmierstil des Entwicklers vermieden wird, was die Qualität des zu entwickelnden Produktes deutlich erhöht.
Ziel dieses Projektes ist es, den modellbasierten Entwurf auf der Basis von MATLAB/ Simulink® mit automatischer Code-Generierung für ein Automatisierungssystem in industriellen Einsätzen zu erproben, die Machbarkeit abzusichern sowie die Vor- und Nachteile aufzuzeigen.
Es wird der gesamte Entwicklungsprozess vom modellbasierten Entwurf inkl. einer Übersicht der Modelle, den MIL-Test, die automatische Codegenerierung und die Implementierung in das Zielsystem dargelegt.
Der modellbasierte Entwurf wurde bereits in [1, 2] vorgestellt. Im Vordergrund dieser Arbeit steht der vollständige MIL-Test in Realzeit, bei dem mittels des App Designers von The Mathworks Inc. die Bedienung und die Visualisierung des Mischprozesses vorgenommen wird.

2 Der technische Prozess

2.1 Auswahl des technischen Prozesses Mischstation

Ausgewählt wurde ein technischer Prozess mittlerer Komplexität (Mischstation), der die Steuerung und Regelung bedingt und exemplarisch für einen industriellen technischen Prozess angesehen werden kann (Bild1) [3, 4].

2.2 Beschreibung des technischen Prozesses der Mischstation

Der Mischprozess entsprechend Bild 1 besteht darin, dass Flüssigkeiten aus drei verschiedenen Behältern, den Dosiertanks (B201, B202 u. B203), in unterschiedlichen vorgegebenen Mischverhältnissen und Mengen dosiert und über eine Pumpe mittels elektrisch ansteuerbaren Ventilen (V201, V202 u. V203) und einer durchflussgeregelten Mischpumpe (P201) in den Mischbehälter (B204) geleitet werden. Die Durchflussmenge wird einerseits über einen mechanischen Durchflussmengenmesser FI zur

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

optischen Kontrolle angezeigt und andererseits einen Durchflussmengenmesser FIC für die Dosierung der Mengen im Mischtank B204 erfasst. Die Niveaus der Behälter werden über kapazitive Sensoren (LS- u. LS+) überwacht, um das Trockenlaufen der Mischpumpe bzw. das Überlaufen der Behälter zu vermeiden. Als Notabschaltung ist für jeden Behälter ein Überlaufschutz LA+ vorgesehen, die unabhängig von der Ansteuerung wirken und die Pumpen deaktivieren. Die elektrisch ansteuerbaren Ventile V211 - V213 (alternativ die Handventile V204 -V207) und V210 sowie die Rücklaufpumpe P202 dienen dazu, um nach erfolgten Mischvorgängen und vollem Mischtank die Dosiertanks B201 - B203 mit der Flüssigkeit aus dem Mischtank B204 wieder zu befüllen.
Die Bedienung der Mischstation erfolgt über ein Bedienpanel mit Tastern und einem Drehschalter und die Signalisierung der Systemzustände erfolgt über Leuchtmelder im Bedienpanel. Des Weiteren wird die Parametrierung der Mischmengen und -verhältnisse sowie die Visualisierung des Prozesses über ein LCD-Touchpanel vorgenommen.
Die gesamte Sensorik und Aktorik ist direkt über das Automatisierungssystem mit der Mischstation gekoppelt.

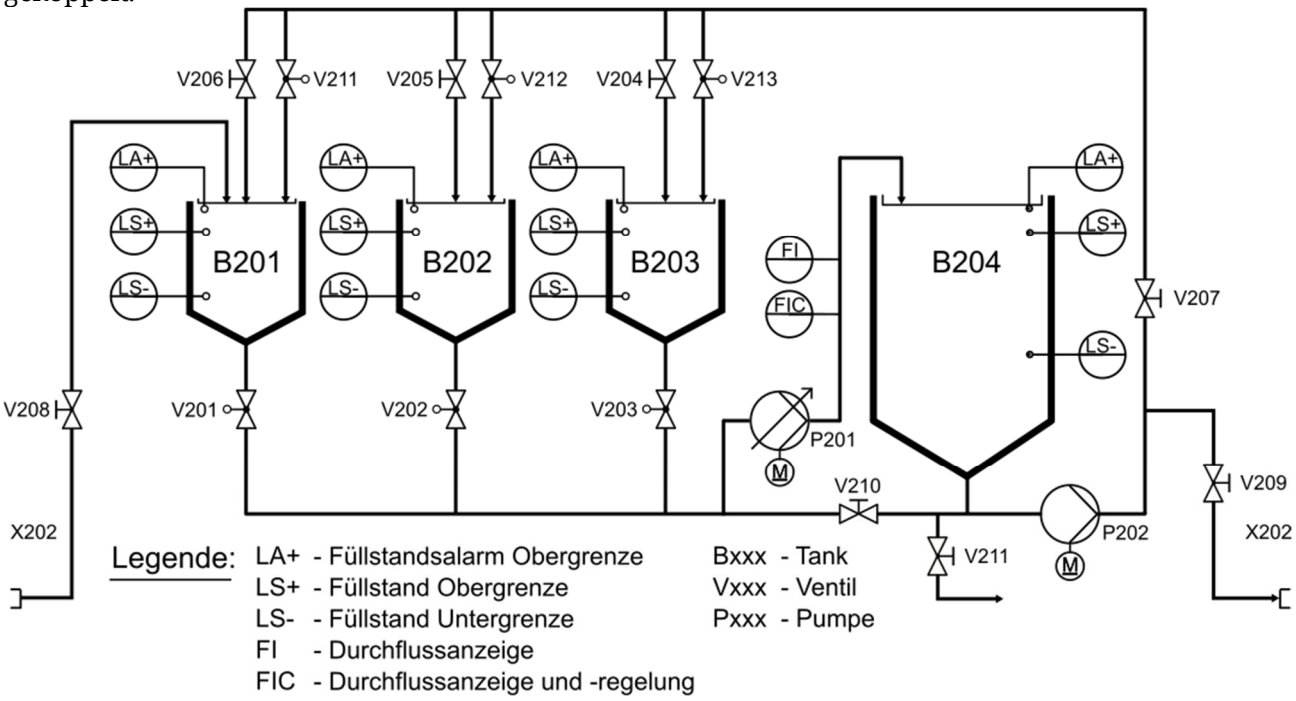


Bild 1: Fließbild des technischen Prozesses der Mischstation [1, 2]

3 Entwicklungsumgebung und Automatisierungssystem

3.1 Entwicklungsumgebung und eingesetztes Automatisierungssystem

Für den modellbasierten Entwurf auf der Basis von MATLAB/Simulink® gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

1. Einsatz der Toolbox PLC Coder™ von The Mathworks Inc. für die Codegenerierung
2. Einsatz einer herstellerspezifischen Toolbox für die Codegenerierung

Nur mit dem ersten Weg ist ein herstellerunabhängiger Entwurf möglich. Zur Veranschaulichung ist der Entwicklungsprozess, welcher unterteilt ist in vier Phasen, in Bild 2 dargestellt.
In der 1. Phase wird der modellbasierte Entwurf zur Automatisierung der Mischstation und der MIL-Test in Realzeit für das gesamte System durchgeführt. Das daraus resultierende Simulink-Modell wird

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

in der 2. Phase aus dem Simulink-Modell mit der Toolbox PLC Coder™ der Quellcode für das Automatisierungssystem als strukturierter Text nach IEC 61131 Teil 3 generiert [5-7], womit eine große Anzahl von Automatisierungssystemen bedient werden können.
Allerdings werden hier nicht alle Simulink-Blöcke bzw. Optionen der Simulink-Blöcke unterstützt. Die verfügbaren Simulink-Blöcke und Optionen sollten allerdings für die meisten Anwendungen in der Automatisierungstechnik ausreichend sein.
Als Entwicklungsumgebung wird in den beiden ersten Phasen für den modellbasierten Entwurf mit automatischer Code-Generierung MATLAB/ Simulink® der Fa. The Mathworks Inc. die Version 2020a eingesetzt. Dies ist auch erforderlich, da die entwickelten und eingesetzten Apps für den MIL-Test diese Version von MATLAB/ Simulink® bedingen.
In der 3. und 4. Phase kommen die herstellerspezifische Entwicklungsumgebung und das Automatisierungssystem zum Einsatz. Für die Konfiguration und Parametrierung des Automatisierungssystems kommt als herstellerspezifische Entwicklungsumgebung das TIA-Portal der Fa. Siemens AG in der Version V15.1 zum Einsatz [8]. Als Automatisierungssystem wird ein SIMATIC ET 200 Open Controller plus entsprechender Ein- und Ausgabebaugruppen verwendet (Bild 2).

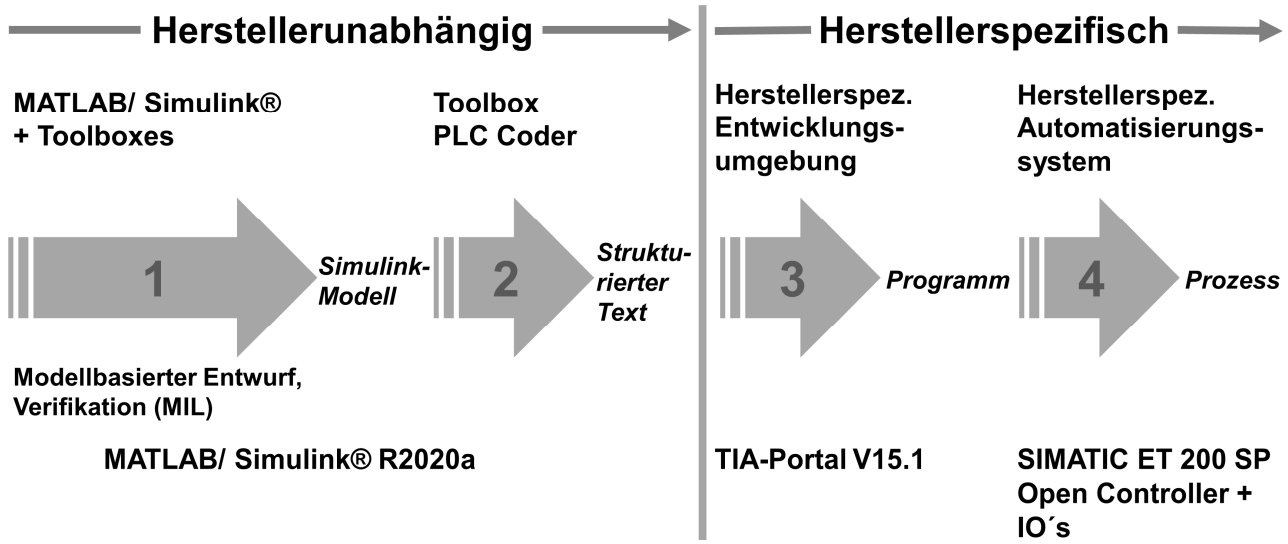


Bild 2: Entwicklungsprozess mit dem PLC Coder™ und dem TIA Portal von Siemens [8]

3.2 Unterstützte Automatisierungssysteme von Drittanbietern

Bisher werden Entwicklungsumgebungen von 12 Herstellern herstellerspezifischer Automatisierungssysteme mit Stand vom November 2021 unterstützt [5]:

- 3S-Smart Software Solutions CODESYS Version 2.3 or 3.3 or 3.5 (SP4 or later)
- B&R Automation Studio® 3.0 or 4.0
- Beckhoff® (TwinCAT® 2.11 oder 3)
- KW-Software MULTIPROG® 5.0 or 5.5
- OMRON® Sysmac® Studio Version 1.04, 1.05, 1.09 or 1.12
- Phoenix Contact® PC WORX™ 6.0
- Rexroth IndraWorks version 13V12 DIE
- Rockwell Automation® RSLogix™ 5000 Series Version 17, 18, 19 or 20 and Rockwell Studio 5000 Logix Designer Version 21 or 24
- Siemens® SIMATIC® STEP® 7 Version 5.3, 5.4 or 5.5 und Siemens TIA Portal ab V13
- Generic
- PLCopen XML

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Modellbasierter Entwurf für die Automatisierung der Mischstation

Am Anfang des Projektes sind funktionale Anforderungen formuliert worden, welche hier nicht näher ausgeführt sind. Auf deren Basis ist ein Strukturblockschaltbild unter Berücksichtigung der funktionalen Anforderungen und der physikalischen Anschlüsse des technischen Prozesses entworfen worden, wie dies in Bild 3 dargestellt ist.
Der modellbasierte Entwurf wird primär mittels endlicher Zustandsautomaten für den Ablauf mit einer unterlagerten Durchflussregelung für die Dosierung unter Berücksichtigung des Realzeitverhaltens durchgeführt. Der Ablauf für die Dosierung der Mengen erfolgt hier volumengesteuert auf der Basis der gemessenen Durchflussmenge, wodurch eine sehr hohe Dosiergenauigkeit erzielt wird.
Das Ergebnis ist das Simulink-Modell für die Station Mischen in Bild 4, welches in die neun Subsysteme

- Entprellung Bdauer,
- Zustandsautomat Bedienung,
- Auswertung Sensorik Entprellung,
- Berechnung Mengen,
- Zustandsautomat Programme,
- Ansteuerung Leuchtmelder,
- Ventil Pumpensteuerung,
- die Durchflussregelung und
- Berechnung Volumen (Mischtank)

unterteilt ist.
Die Benennungen der digitalen und analogen Ein- und Ausgänge des Modells in den Bildern 3 und 4 korrespondieren mit denen des Automatisierungssystems der Mischstation.
Die Ausführung der Subsysteme erfolgt bei Simulink® grundsätzlich von oben nach unten und von links nach rechts, womit die geometrische Anordnung der Simulink-Blöcke einen entscheidenden Einfluss auf den Ablauf hat. Um den Ablauf unabhängig von der geometrischen Anordnung der Simulink-Blöcke zu machen, interagieren sämtliche relevanten Simulink-Blöcke im Quittungsbetrieb, wie dies auch in den Bildern 3 und 4 dargestellt ist.
Durch den Einsatz der Toolbox PLC Coder™ von MATLAB/ Simulink ist für den modellbasierten Entwurf die wesentliche Grundvoraussetzung, dass nur diskrete Übertragungsblöcke verwendet werden dürfen und die Codegenerierung nur für einzelne Simulink-Blöcke möglich ist, weswegen für die Codegenerierung eines Gesamtsystems alle relevanten Subsysteme zu einem Subsystem zusammengefasst werden müssen. Aus diesem Grund sind auch sämtliche linearen Übertragungsglieder in der Laplace-Ebene in entsprechende Differenzengleichungen umgerechnet worden.
Es gibt noch eine Reihe weiterer Einschränkungen, die aber nicht grundsätzlicher Natur sind und für den vorliegenden Entwurf und vergleichbare Entwürfe nicht relevant sind [5-7].
Besonders wichtig ist es, dass der Solver von Simulink® auf eine feste Schrittweite (Fixed step) gesetzt wird. Als Solver kann die automatische Solver-Auswahl auto (Automatic solver selection) gewählt werden und die feste Schrittweite Fixed-step size (fundamental sample time) muss identisch mit der Zykluszeit des eingesetzten und entsprechend konfigurierten Automatisierungssystems sein. Für das vorliegende Projekt ist eine Fixed-step size von 50ms auf Grund der Zeitkonstante des Mischprozesses, bedingt durch die Zeitkonstante der Mischpumpe mit dem Stellglied von ca. 1 sec, gewählt worden.

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

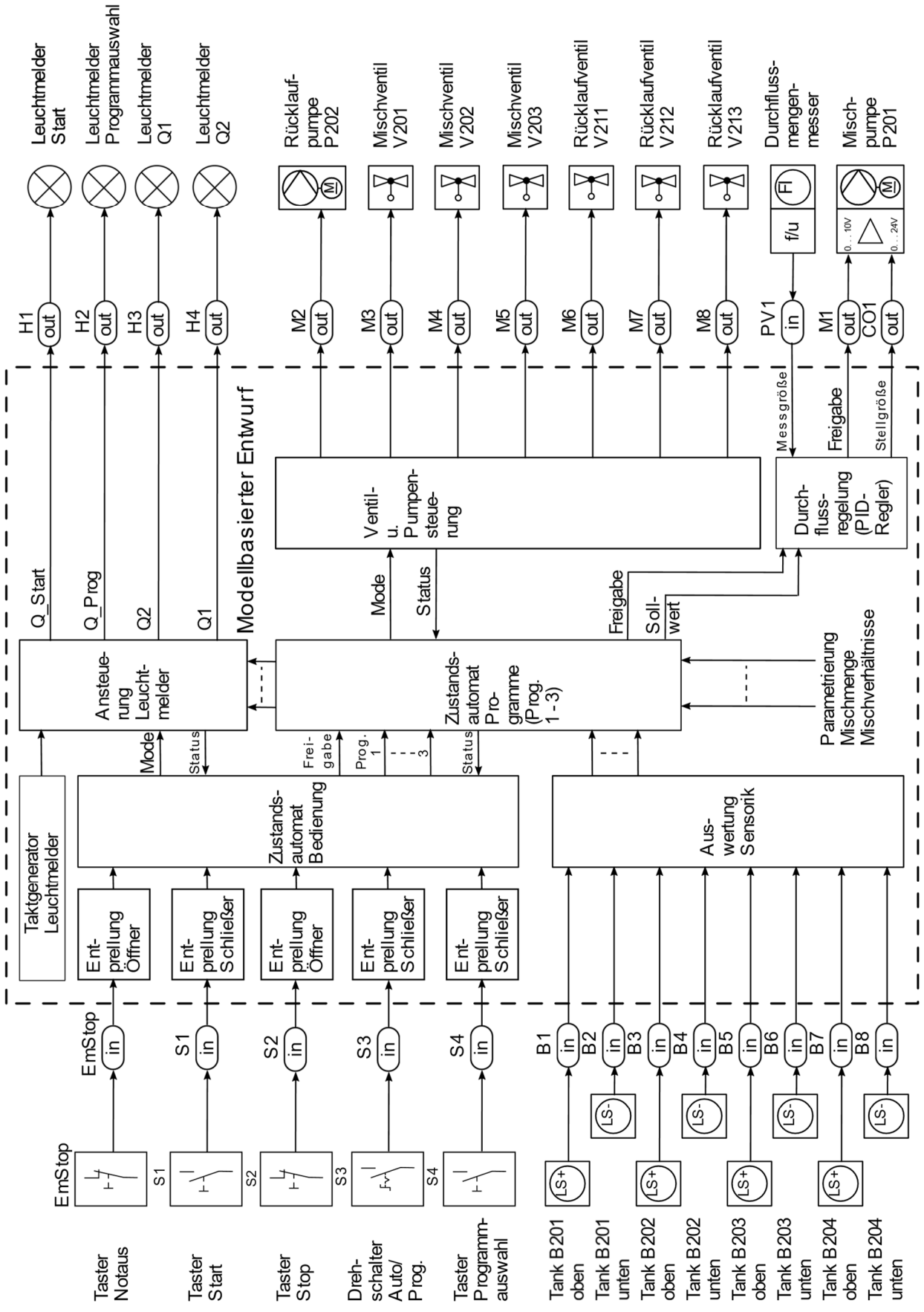


Bild 3: Strukturblockschaltbild für den modellbasierten Entwurf zur Automatisierung der Mischstation

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

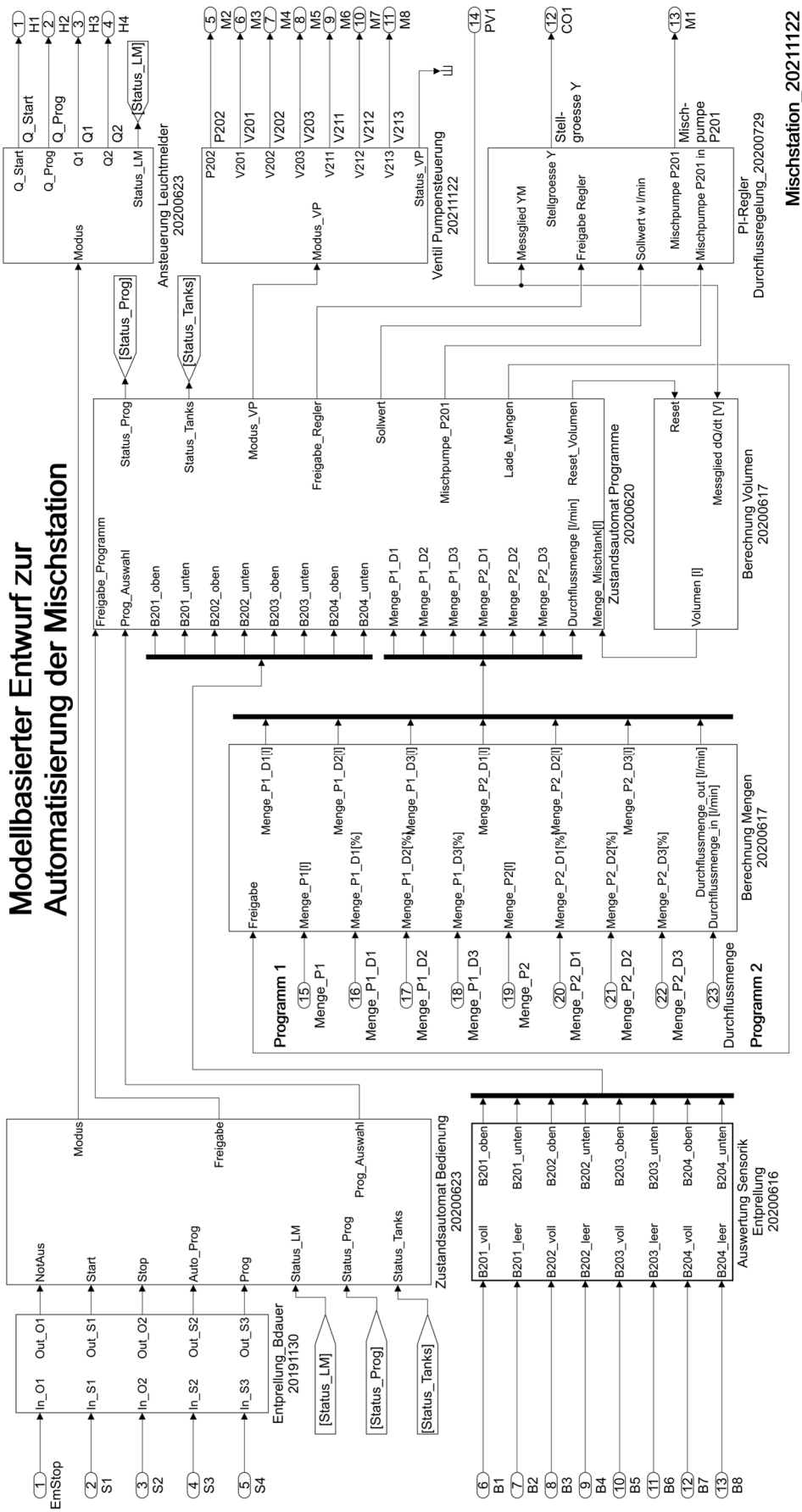


Bild 4: Simulink-Modell des modellbasierten Entwurfs zur Automatisierung der Mischstation

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

5 Verifikation des Modells für die Automatisierung der Mischstation

Der Test sämtlicher Subsysteme aus Abschnitt 4 ist entsprechend den funktionalen Anforderungen in Realzeit vorgenommen worden.
In einem zweiten Schritt sind dann sämtliche Subsysteme zum Gesamtsystem zusammengeführt, der technische Prozess der Mischstation (Regelstrecke Mischpumpe P202, die Dosiertanks B201 bis B203 und der Mischtank B204) sind als Modell nachgebildet worden, die die Testumgebung darstellt, wie dies in Bild 5 dargestellt ist. Für die Bedienung, Parametrierung der Mischprogramme und die Visualisierung des Fließbildes der Mischstation sind insgesamt drei Apps mit dem App Designer von The Mathworks Inc. erstellt worden, wie dies in Bild 6 dargestellt ist.
Die Verifikation des Gesamtsystems ist vor der Implementation auf der Basis der funktionalen Anforderungen mit der Testumgebung und den Apps in den Bildern 5 und 6 durchgeführt worden. Die Apps wurden als unterbrechbare unsynchronisierte Tasks mit den in Tabelle 1 angegebenen Zykluszeiten implementiert. Für alle Elemente der Apps können per Mouseover Bedieninformationen abgerufen werden. Das Simulink-Modell ist nicht unterbrechbar, womit dessen Zykluszeit garantiert ist.

Tabelle 1: Zykluszeiten des Simulink-Modells und der Apps

Task	Arbeitsweise	Zykluszeit
Simulink-Modell	nicht unterbrechbarer unsynchronisierter freilaufender Task	50 ms
Visualisierung Mischstation	unterbrechbarer unsynchronisierter freilaufender Task	200 ms
Bedienung Mischstation	unterbrechbarer unsynchronisierter freilaufender Task	100 ms
Mischprogramme Mischstation	unterbrechbarer unsychronisierter freilaufender Task	500 ms

Der Ablauf der Verifikation im MIL-Test ist folgender in MATLAB/ Simulink:

1. Starten des Simulink-Modells
2. Starten der App Visualisierung Mischstation
3. Starten der App Bedienung Mischstation
4. Starten der App Mischprogramme Mischstation
5. Durchführung des MIL-Tests

Der MIL-Test wird dann folgendermaßen entsprechend der Anforderungsspezifikation über die Bedienung der Apps vorgenommen:

1. App Mischprogramme Mischstation: Auswahl der Dosiermenge des Mischtanks und der Mengenanteile der Dosiertanks für das Mischprogramm
2. App Bedienung Mischstation: Auswahl des gewünschten Mischprogramms über den Drehschalter in der Stellung „Prog“ und den Taster „Prog“. Das entsprechende Mischprogramm wird durch Betätigung des Tasters „Start“ ausgeführt bis der Mischvorgang beendet ist.
3. Visualisierung Mischstation: Die Füllstände der Dosiertanks und des Mischtanks werden in Realzeit visualisiert. Aktive Ventile, Füllstandssensoren und Pumpen werden dabei grün dargestellt, inaktive rot.

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

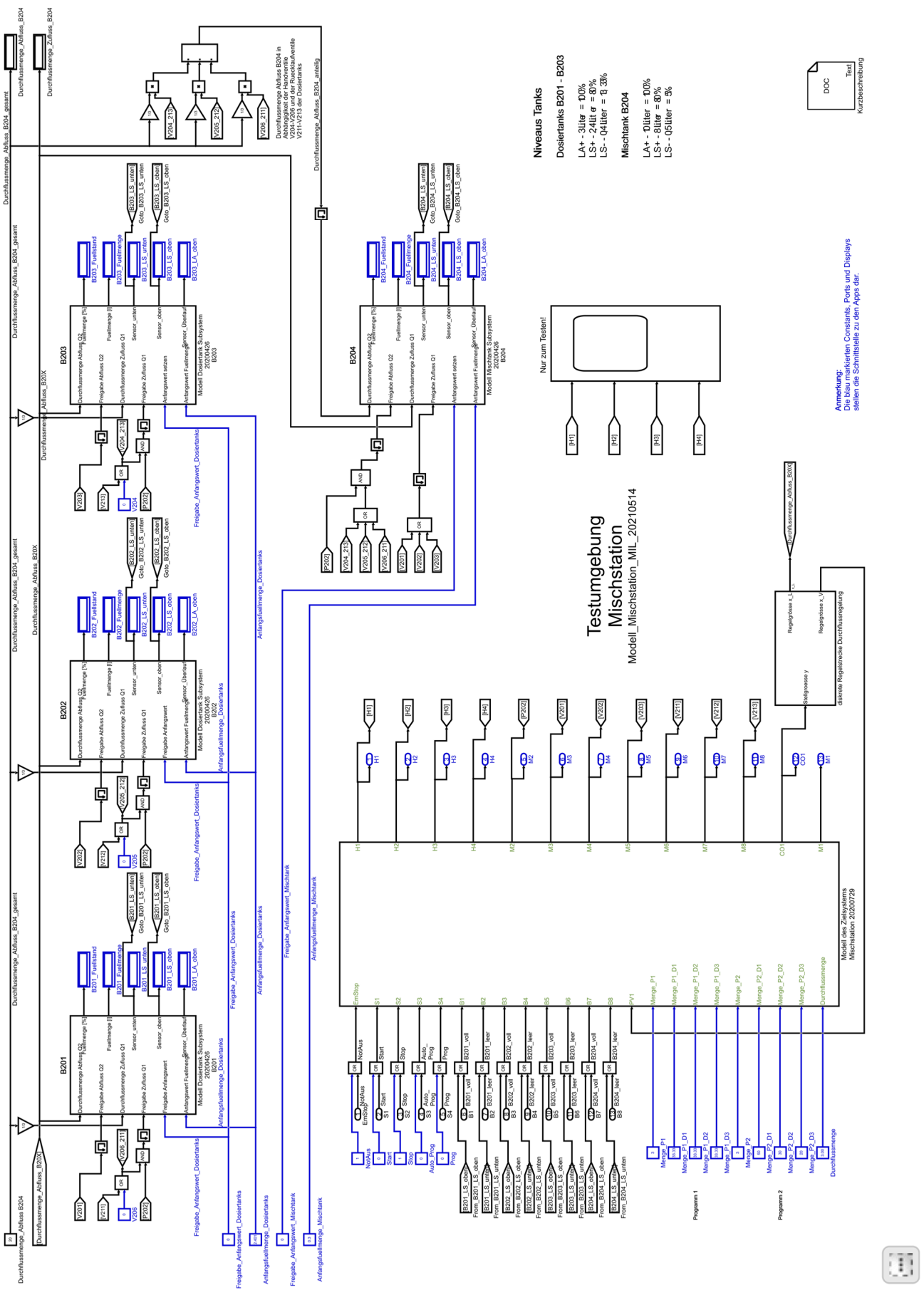


Bild 5: Simulink-Modell der Testumgebung

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

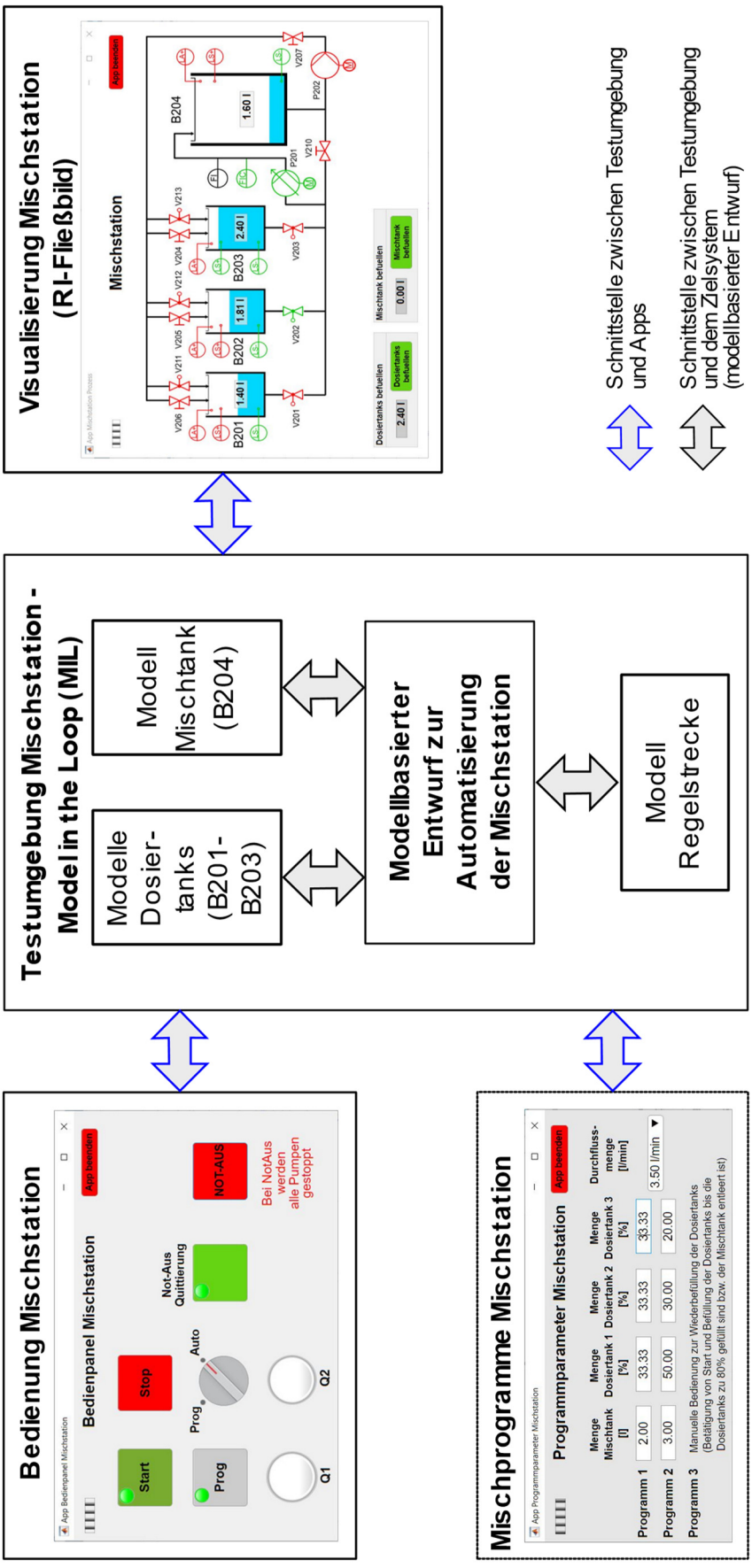


Bild 6: Apps für die Testumgebung des modellbasierten Entwurfs für die Mischstation

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel war es für einen modellbasierten Entwurf für eine Mischstation auf der Basis bereits erfolgter Arbeiten [1, 2] einen vollständigen MIL-Test in Realzeit durchzuführen. Folgende Vorteile besitzt der modellbasierte Entwurf:

- Deutlich höheres Abstraktionsniveau der Entwurfsmethoden [1, 2].
- Keine Programmierkenntnisse erforderlich [1, 2].
- Steigerung der Zuverlässigkeit, da höhere Qualität des Quellcodes, weil dieser immer auf die gleiche Art und Weise generiert wird [1, 2].
- Sehr einfach durchführbare Verifikation, insbesondere mit einem MIL-Test.
- Sehr einfache Erprobung von Varianten.
- Reduktion der Implementierungs- und Inbetriebnahmephase [1, 2].
- Hohe Flexibilität durch zielsystemunabhängigen Entwurf [2].

Durch den modellbasierten Entwurf werden durch die Modelle für die Dosiertanks und den Mischtank immer die exakten Füllmengen berechnet, wodurch bis auf den Überlaufschutz LA+ der Tanks, die acht Füllstandsensoren LS- u. LS+ entfallen könnten und nicht unerhebliche Kosten eingespart werden könnten. Bei einem klassischen Entwurf nach IEC 61131 würde man gar nicht auf die Idee kommen so vorzugehen.

Insgesamt hat sich der modellbasierte Entwurf auf der Basis von MATLAB-Simulink mit automatischer Code-Generierung bewährt und ist insbesondere für komplexere Aufgabenstellungen sehr gut geeignet.

6 Literatur

[1] Büchau, B., Gröbe, G.; Modellbasierter Entwurf auf der Basis von MATLAB-Simulink mit automatischer Code-Generierung für einen Mischprozess; Tagungsband AALE 2020, Automatisierung und Mensch-Technik-Interaktion; 17. Fachkonferenz Leipzig; ISBN 978-3-8007-5180-8 (Buch); ISBN 978-3-8007-5181-5 (E-Book)

[2] Büchau, B., Gröbe, G.; Zielsystemunabhängiger Modellbasierter Entwurf auf der Basis von MATLAB/ Simulink® mit automatischer Code-Generierung für einen Mischprozess; 2. Virtueller ASE-Kongress 16. – 18.11.2020

[3] Schellmann B., Helmich J., Handbuch Station Mischen, Festo Didactic GmbH & Co. KG, 73770 Denkendorf, Germany, Bestell.-Nr. 696686, 2006

[4] ADIRO Automatisierungstechnik GmbH, RI-Fließbild Station Mischen, Festo Didactic GmbH & Co. KG, 73770 Denkendorf, Germany, 2005

[5] The MathWorks, Inc., Simulink PLC Coder, URL: https://de.mathworks.com/products/simulink-plc-coder.html, Letzter Aufruf am 22.11.2021

[6] Simulink® PLC Coder™ User's Guide, https://de.mathworks.com/help/releases/R2018a/pdf_doc/plc-coder/plc_st.pdf, Letzter Aufruf am 24.09.2021

[7] Simulink® PLC Coder™ Release Notes, https://de.mathworks.com/help/releases/R2020a/pdf_doc/plc-coder/rn.pdf, Letzter Aufruf am 24.09.2021

[8] Siemens AG, TIA Portal - Ein Überblick der wichtigsten Dokumente und Links – Steuerung, URL: https://support.industry.siemens.com/cs/ww/de/view/65601780; Letzter Aufruf am 24.09.2021

Open Access. © 2022 **B. Büchau, G. Gröbe**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.–11.03.2022

Analyse und Anpassung ausgewählter Optimierungsverfahren für den Digitalen Zwilling von Verdichteranlagen

R. Thiel[1], J. Jäkel[1], K. Schleifer[2], R. Schulze[2]

Zusammenfassung

Digitale Zwillinge werden in der Betriebsphase einer Maschine oder Anlage für verschiedene Fragestellungen angewendet, bspw. für die Zustandserkennung. Voraussetzung dafür ist, dass der Digitale Zwilling über Modelle des Anlagenverhaltens verfügt, die verschiedene Zustände, einschließlich von Fehlerzustände, adäquat beschreiben. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist die Identifikation der Modellparameter. Dieser Beitrag dient der Analyse und Anpassung ausgewählter Optimierungsmethoden (gradientenbasierter Verfahren und ein Partikelschwarmoptimierer) am Beispiel von Modellen für Kompressoren und Turbinenanlagen. Dazu wird mit einem analytischen Ansatz ein Modell einer realen Kompressoranlage erstellt. Um die Qualität der Optimierungsergebnisse vergleichen zu können, wird eine Fehlermetrik eingeführt. Das Verhalten der Optimierer wird unter den folgenden realistischen Fehlerszenarien ermittelt: Fehler in den Modellparametern, Rauschen, initialer Abstand vom Optimum, fehlerhaft Messstellen (ohne und mit Detektion). Zur numerischen Bewertung der Identifizierbarkeit werden zwei Kriterien eingeführt.

Stichwörter

Modellbildung, Simulationsmodell, Parameteridentifikation, Digitaler Zwilling, Turboverdichter, Smart Monitoring

1 Einführung

Turbinen- und Verdichteranlagen unterliegen einer kontinuierlichen Alterung und Abnutzung, die durch einfache Messung von Prozessgrößen nur schwer zu überwachen ist. Die modellbasierte Überwachung des Anlagenzustandes soll hier Abhilfe schaffen. Dazu werden auf der Basis des Digitalen Zwillings bzw. des darin enthaltenen Anlagenmodells durch einen Vergleich zwischen messtechnisch erfassten Größen der Anlage und den simulierten Größen des Anlagenmodells Informationen über den konkreten Anlagenzustand parallel zum Betrieb gewonnen. Darüber hinaus ist es auch möglich, nicht gemessene Größen zu ermitteln. Für die genannten Aufgabenstellungen ist eine kontinuierliche Anpassung der Modelle eines Digitalen Zwillings auf Grundlage der realen Messdaten notwendig und bedarf eines hohen Automatisierungsgrads bezüglich der Datenfilterung, -validierung und der Bestimmung von Betriebszuständen.
Die komplexe numerische Herausforderung der Parameteroptimierung auf Modellebene im Digitalen Zwilling wird mithilfe von nichtlinearen Optimierungsverfahren gelöst [1, 2]. In [3, 4] wird die Effizienz solcher Verfahren anhand der Parameterbestimmung von Modellen elektrischer Maschinen bzw. von Robotern aufgezeigt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung metaheuristischen Suchverfahren, wie genetischen Algorithmen, die sich aufgrund ihrer hohen Flexibilität besonders für

[1] HTWK Leipzig, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Leipzig, Deutschland
[2] Avicomp Controls GmbH, Leipzig, Deutschland

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

komplexe Parameteroptimierungsaufgaben eignen. Speziell bei stationären Betriebszuständen haben sich derartige Verfahren bewährt [4, 5].
Ziel des Beitrages ist die vergleichende Analyse von Optimierungsverfahren für die Parameteridentifikation anhand eines Modells eines Turboverdichters. Hierbei interessieren insbesondere die Güte der Optimierunsgverfahren, ihre Robustheit bezüglich der Änderungen in den Messdaten, die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Signal-Rausch-Verhältnis und den Startwerten, darüber hinaus der Rechenzeitbedarf. Ein weiteres analysiertes Problem ist die Identifizierbarkeit.
Im nächsten Abschnitt werden neben dem Modell die verwendeten Zielfunktionen und entwickelten Kriterien zur numerischen Bewertung der Identifizierbarkeit beschrieben, In Abschnitt 3 wird die Versuchsdurchführung, in Abschnitt 4 die Ergebnisse dargestellt. Abschließend werden diese in Abschnitt 5 ausgewertet.

2 Methoden

2.1 Verdichtermodell

Die wichtigste Größe eines Verdichtermodells ist die Druckänderung, welche durch

$$p_2 = p_1 \left(\frac{\frac{n_p-1}{n_p} \cdot Y_p}{R_S T_1 Z_1(p_1, T_1)} + 1 \right)^{\frac{n_p}{n_p-1}} \tag{1}$$

definiert ist. Größen mit dem Index 1 markieren die Eingangsgrößen, mit dem Index 2 die Ausgangsgrößen. Dabei sind p der Druck, T die Temperatur, R_S die spezifische Gaskonstante, Z der Kompressibiltätsfaktor, n_p der Druckexponent und Y_p die polytrope Förderhöhe. Die polytrope Förderhöhe berechnet sich über

$$Y_P = f(\dot{V}, N) \tag{2}$$

mit der Verdichterdrehzahl N und dem Volumenstrom $\dot{V}$, welcher sich aus

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \tag{3}$$

dem Massenfluss $\dot{m}$ und der Gasdichte ρ ergibt.
Für jeden Verdichter wird ein Kennfeld für den Zusammenhang zwischen polytroper Förderhöhe, Drehzahl und Volumenstrom vom Hersteller mitgeliefert. Dieses bildet die Basis zur Berechnung im Digitalen Zwilling. Die Approximation dieses Kennfeldes wird im folgenden Abschnitt erläutert. Da sich das Kennfeld während der Lebenszeit ändert, wird (2) um die beiden Kennfeld-Verschiebungsparameter P_{ax} und P_{ay} wie folgt erweitert

$$Y_P = f(\dot{V} + P_{ax}, N) + P_{ay}. \tag{4}$$

Die Temperaturänderung durch den Verdichter wird durch

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n_T-1}{n_T}} \tag{5}$$

beschrieben, hierbei ist n_T der Temperaturexponent. Die Gleichungen (1) und (5) werden in [7] hergeleitet. Der Druckverlust im Ein- und Ausgangsrohr wird über die Darcy-Weisbach-Gleichung

$$\Delta p = f(p, T, \dot{m}) = \lambda \frac{8L}{\rho \pi^2 D^5} |\dot{m}| \cdot \dot{m} \tag{6}$$

berechnet. Dabei ist L die Rohrlänge, D der Rohrdurchmesser, λ der Rohrreibungsfaktor und ρ die Gasdichte. Die Dichte ρ wird über

$$\rho = \frac{p}{R_S Z T} \text{ mit } R_S = \frac{R}{M} \tag{7}$$

berechnet. Im Rohrreibungsfaktor λ werden alle unbekannten Einflüsse wie Druckänderung durch Rohrbögen und Rohrverjüngung durch Ablagerung zusammengefasst.

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2.2 Kennfeld-Modell

Für jeden Verdichter wird bei der Inbetriebnahme ein Kennfeld vom Hersteller mitgeliefert. Für die Optimierung im Digitalen Zwilling werden drei verschiedene Verfahren zur Kennfeldapproximation untersucht. Das Standardverfahren zur Approximation ist die Interpolation durch ein Polynom dritten Grades

$$Y_P(\dot{V}, N) = p_{00} + p_{10}\dot{V} + p_{01}N + p_{11}\dot{V}N + p_{20}\dot{V}^2 + p_{02}N^2 + p_{21}\dot{V}^2N + p_{12}\dot{V}N^2 + p_{30}\dot{V}^3 + p_{03}N^3. \tag{8}$$

Dabei werden die Parameter p so gewählt, dass der quadratische Restfehler zwischen Kennfeld und Polynom minimal ist. Als weitere Approximationsmethoden wird ein einfaches Interpolationsverfahren gewählt, bei welchem ausgewählte feste Drehzahlkennlinien N_c mittels

$$Y_P(\dot{V}, N_c) = a\mathrm{e}^{bx} + c\mathrm{e}^{dx} \tag{9}$$

approximiert werden. Für Werte zwischen den festen Drehzahlen wird linear interpoliert. Das dritte Verfahren verwendet ebenfalls ein Polynom. Dabei wird auf die Gleichung (2) vorher die Dimensionsanalyse nach [10] angewendet. Damit wird der Bereich, der im Kennfeld approximiert werden muss, kleiner, siehe Abb. 10 im Abschnitt Auswertung. Aus Gleichung (4) wird damit zu

$$Y_P = f\left(\frac{\dot{V}}{\rho N D^3} + P_{ax}, N\right) N^2 D^2 + P_{ay}. \tag{10}$$

Eine ausführliche Beschreibung der Dimensionsanalyse ist in [7] enthalten.

2.3 Variablen

Zusammengefasst enthält das Modell für die Verwendung im Digitalen Zwilling die in Tab. 1 aufgeführten Variablen und Parameter.

Tab. 1: Variablen- und Parameterübersicht

	Name	**Symbol**	**Einheit**
Messgrößen	Ein- und Ausgangsdruck	p_1, p_2	bar
	Ein- und Ausgangstemperatur	T_1, T_2	K
	Massenfluss	$\dot{m}$	$\mathrm{kg/s}$
	Drehzahl	N	$1/\mathrm{s}$
Konstanten	Rohrlänge	L	m
	Rohrdurchmesser	D	m
	Gaskonstante	R	$\frac{\mathrm{kg\ m^2}}{\mathrm{s^2\ mol\ K}}, \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\ K}}$
	spezifische Gaskonstante	R_S	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}$
Parameter (Optimierungsvariablen)	Rohrreibungsfaktor	λ_1,λ_2	
	Druckexponent	n_p	
	Temperaturexponent	n_T	
	Kennfeld-Verschiebungsparameter x	P_{ax}	$\frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{s}}$
	Kennfeld-Verschiebungsparameter y	P_{ay}	m

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2.4 Optimierungsverfahren

Zur Bestimmung der unbekannten Parameter werden Optimierungsverfahren und Messdaten, die an Arbeitspunkten aufgenommen werden, verwendet. Da der Digitale Zwilling mittels *Matlab/Simulink* erstellt wurde, werden nur Optmimierungsverfahren betrachtet, die in *Matlab* einschließlich der *Optimization Toolbox* implementiert sind. Als Referenz wird der Optimierer *fmincon* mit dem Algorithmus *interior-point* [8] verwendet. Als Zielfunktion wird der kleinste quadratische Fehler

$$\min_p ||F(\hat{x}, p) - \hat{y}||_2^2 = \min_p \sum_i (F_i(\hat{x}_i, p) - \hat{y}_i)^2 \tag{11}$$

verwendet. Dabei ist F das Modell des Verdichters, p der Parametervektor und $\hat{x}$, $\hat{y}$ sind die Messdaten, i indiziert den Arbeitspunkt. Zusätzlich werden für die Parameterwerte Schranken vorgegeben. Verglichen wird *fmincon* mit den Optimierern *fminimax* und *lsqcurvefit* mit den Algorithmen *trust-region-reflective* und *levenberg-marquardt* sowie einem *Partikelschwarmoptimierer*. Die Zielfunktion ist bei allen identisch mit Ausnahme von *fminimax* mit der Zielfunktion

$$\min_p \max_i (F_i(\hat{x}_i, p) - \hat{y}_i)^2. \tag{12}$$

Bei diesem wird nur der Wert mit der größten Abweichung optimiert.

2.5 Zielfunktion für robuste Optimierung

Ein Problem aus der Praxis ist der überproportionale Einfluss von gruppierten Arbeitspunkten. Daher wird die Gleichung (11) um eine Abstandswichtung erweitert. Dafür werden die euklidischen Abstände im Eingangsraum, welcher von den Eingangsmessdaten Druck, Temperatur und Massenfluss aufgespannt wird, verwendet. Diese werden vorher auf den Referenz-Arbeitspunkt im Kennfeld normiert (vgl. 3.3). Die Distanzmessung für jeden Arbeitspunkt i berechnet sich zu

$$d_i = \frac{1}{N_{AP}} \sum_{j=1}^{N_{AP}} \sqrt{(\dot{m}_i - \dot{m}_j)^2 + (p_i - p_j)^2 + (T_i - T_j)^2}, \tag{13}$$

wobei N_{AP} die Anzahl der Arbeitspunkte ist. Die sich damit ergebenden Zielfunktion lautet

$$\min_x \sum d_i (F(x, \hat{x}_i) - \hat{y}_i)^2. \tag{14}$$

2.6 Qualitätskriterium für Optimierungsparameter

Ein grundlegendes Problem bei Optimierungsaufgaben ist die Abhängigkeit von Optimierungsvariablen. In der Anwendung bedeutet das, dass die Änderung von zwei oder mehreren Optimierungsparametern den gleichen Einfluss auf das Ergebnis haben und somit kein eindeutiges Optimum existiert. Solche Abhängigkeiten in komplexen Modellen aufzufinden und zu eliminieren, ist nicht trivial. Bei der Parameteridentifikation spricht man auch von (struktureller) Identifizierbarkeit (vgl. [9]). Um diese Äbhängigkeiten und ihren Einfluss bewerten zu können, werden zwei Qualitätskriterien AZ_1 und AZ_2 eingeführt. Diese beschreiben den gemeinsamen Einfluss zweier Modellparameter (Optimierungsvariablen) auf die gewählte Ausgangsgröße. Die Abhängigkeit wird von Null (keine Abhängigkeit) bis Eins (hohe Abhängigkeit) angegeben. Dabei gibt AZ_1 an, wie ähnlich zwei Variablen dieselbe Ausgangsgröße verändern, und AZ_2, ob mehrere Arbeitspunkte das Ergebnis verbessern können. Diese Kriterien dienen dazu, den Parametersuchraum und damit das Optimierungsproblem zu vereinfachen und mehrfache gleichwertige Optima zu eliminieren. Hierfür wird zunächst eine Hilfsgröße eingeführt

$$az = \left| 1 - \left(\operatorname{atan2}\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}p_2} F(p_1, p_2), \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}p_1} F(p_1, p_2) \right) + \frac{\pi}{4} \right) \frac{2}{\pi} \pmod 1 \cdot 2 \right| \tag{15}$$

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Hierbei ist $F(p_1, p_2)$ das analytische Modell als Funktion in Abhängigkeit von den untersuchten Parameter p_1 und p_2. Mit der Funktion atan2 wird der Winkel zwischen den Gradienten in p_1- und p_2-Richtung bestimmt. Damit können dann

$$AZ_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} az \tag{16}$$

und

$$AZ_2 = 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |az - AZ_1|^2} \tag{17}$$

berechnet werden. In den Gleichungen (16) und (17) ist N die Anzahl der betrachteten Punkte für die p_2 berechnet wurde. An den Abbildungen 1 und 2 sollen die Aussagen dieser Kriterien beschrieben werden. In Abb. 1 ist ein Problemfall für den Optimierer zu sehen. Beide Größen λ_1 und λ_2 haben den gleichen Einfluss auf den Ausgangsdruck p_2. Das ist am Qualitätskriterium AZ_1, dessen Wert größer als $0,5$ ist, abzulesen. Dass der Zusammenhang linear ist, kann am zweiten Qualitätskriterium AZ_2, dessen Wert 1 ist, abgelesen werden. Das bedeutet der Optimierer findet Lösungen, bei denen $\alpha\lambda_1 + \lambda_2 =$ const. gilt, und kann auch mit mehreren Arbeitspunkten keine eindeutige Lösung finden. Auch in Abb. 2 haben die Parameter einen direkten Zusammenhang, was am Wert des Qualitätskriteriums AZ_1 abzulesen ist. Da hier aber in Bereichen kein linearer Zusammenhang besteht, kann mit mehreren Arbeitspunkten eine eindeutige Lösung gefunden werden. Dies kann am Qualitätskriterium AZ_2 abgelesen werden.

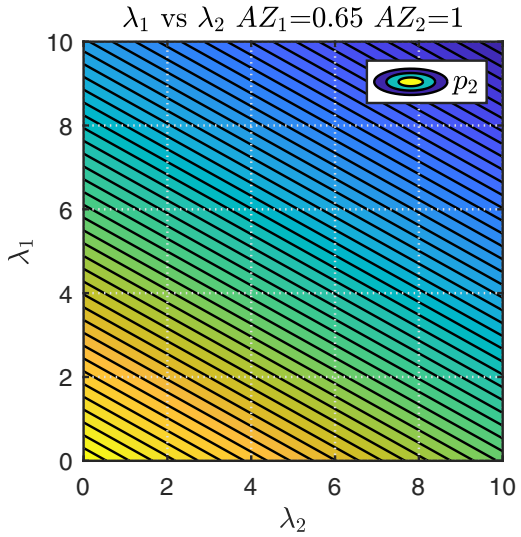


Abb. 1: Abhängigkeit des Ausgangsdrucks p_2 von λ_1 und λ_2

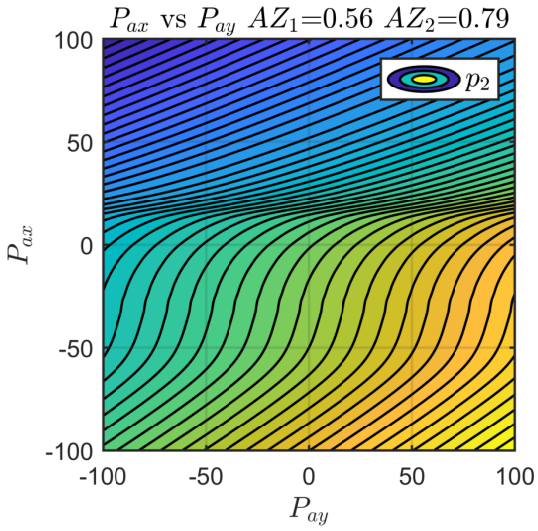


Abb. 2: Abhängigkeit des Ausgangsdrucks p_2 von P_{ax} und P_{ay}

3 Versuchsdurchführung

3.1 Fehlerszenarien

Für die Fehlerszenarien wird zuerst ein Punkt festgelegt, für den in allen Szenarien optimiert wird. Dafür bietet sich der Referenz-Arbeitspunkt AP_0 im Verdichterkennfeld an, da bei diesem die Werte für Ein- und Ausgangsdruck, Temperatur, Drehzahl und Massenfluss gegeben sind. Es werden Szenarien erstellt, in denen echte Fehler simuliert werden, und solche, in denen Fehler die Robustheit des Optimierers testen. Alle Szenarien haben folgende Eigenschaften gemeinsam:

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

- Es werden zehn Wiederholungen und dann eine Mittelung der Ergebnisse durchgeführt.
- Auf die Messgrößen werden $1\,\%$ Rauschen addiert.
- Alle Szenarien werden mit 5, 10 und 15 Arbeitspunkten ausgeführt, um den Effekt der Anzahl der Arbeitspunkte zu bestimmen.

Das wichtigste Szenario ist die Variation der Optimierungsvariablen (Parameter). Diese werden mit einem gleichverteilten Rauschen

$$P_R = P + aZ \tag{18}$$

beaufschlagt. Hierbei ist P_R der verrauschte Parameter, P der Originalparameter, Z der Wert einer gleichverteilten Zufallszahl im Interval $[-1, 1]$, a ein Skalierungsparameter zur Einstellung der Signal-Rausch-Verhältnisses.
Das zweite Szenario untersucht den Einfluss von Rauschen auf die Messgrößen, auch hier wird die Gleichung (18) verwendet. Im dritten Szenario werden die Startwerte für den Optimierer variiert. Im vierten Szenario werden fehlerhafte Messstellen für die Eingangsgrößen simuliert. Im fünften Szenario werden die Messwerte zunächst auf Plausiblität geprüft und Messwerte fehlerhafter Messstellen eliminiert. Diese Plausibilitätsprüfung funktioniert nach folgendem Prinzip: Die Eingangsmesswerte werden in die Gleichungen (1) und (5) eingesetzt und die berechneten Werte werden mit den Ausgangsmesswerten verglichen. Wenn diese um $25\,\%$ oder mehr abweichen, wird dieser Arbeitspunkt ignoriert.

3.2 Fehlermetrik

Um die Qualität der Optimierer bzw. die gefundenen Optima zu vergleichen, wird eine Fehlermetrik FM eingeführt. Dabei wird der Restfehler nach der Optimierung auf den eingeführten Fehler F_{sz} im Szenario mit

$$FM = \min_p \sum_i (F_i(\hat{x}_i, p) - \hat{y}_i)^2 \cdot F_{sz}^{-2} \tag{19}$$

normiert. Die Größe F_{sz} beschreibt den zu korrigierenden Fehler im Szenario und wird zur Normierung verwendet. Damit ergeben sich vier Bereiche für FM

- $FM > 1$: Lösung des Optimierer ist schlechter als Startwert.
- $FM = 1$: Lösung des Optimierer entspricht dem Startwert.
- $FM < 1$: Lösung des Optimierer ist besser als Startwert.
- $FM = 0$: Lösung des Optimierer entspricht der Veränderung des Originalzustands.

Damit werden die Optimierer in verschiedenen Fehlerszenarien miteinander vergleichbar.

3.3 Versuchsablauf

Die Versuche werden in *Matlab* durchgeführt. Daher wird das Modell mit den Gleichungen (1), (5) und (6) in *Matlab* umgesetzt und ein Kennfeld eingelesen. Ausgewählt wurde ein Standardkennfeld, siehe Abb. 3, und wichtige Punkte ausgelesen. Die wesentlichen Größen und Parameter sind:

- Referenz-Arbeitspunkt: AP_0 mit p_1 = 5,9 bar; T_1 = 20 °C; $\dot{m}$ = 10,6 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$; $\dot{V}$ = 136 $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$; p_2 = 15 bar; T_2 = 168 °C
- Drehzahlkennlinien in $N_N = N/N_0$ mit N =14 210 1/min und $N_N = (0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,05)$
- verwendetes Gas: Stickstoff; Kompressibilitätsfaktor $Z = 1$, spezifische Gaskonstante $R_S = 296{,}8\,\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

Für die Approximation werden dann die Bildpunkte der x-Achse und der y-Achse über die Eckpunkte des Rahmen in den Volumenstrom $\dot{V}$ und die polytrope Förderhöhe Y_P umgerechnet.
Für die Versuchsreihen werden mit dem Modell für die festgelegten Eingangsdaten p_1,T_1 und $\dot{m}$ die Ausgangsdaten p_2 und T_2 erzeugt. Dabei werden je nach Szenario die Optimierungsvariablen geändert, die Messdaten manipuliert und die Anzahl der Arbeitspunkte variiert. Für die verschieden Arbeitspunkte wird der Massenfluss in gleichen Schritten zwischen $20\,\%$ und $100\,\%$ im Verhältnis zum

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

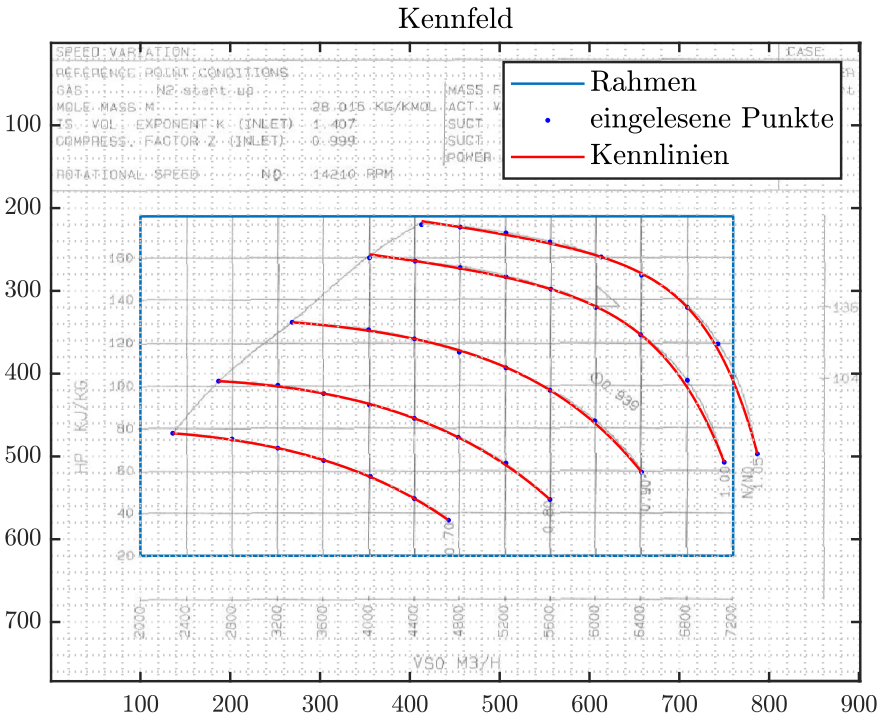


Abb. 3: Kennfeld des Verdichters

Referenz-Arbeitspunkt variiert. Aufgabe der Optimierung ist dann die Änderung der Optimierungsvariablen korrekt zu bestimmen. Die Grundlage dafür bilden die generierten Eingangs- und Ausgangsdaten. Der Startwert für den Optimierer sind die Werte der Optimierungsvariablen aus dem Referenz-Arbeitspunkt. Um reale Messdaten zu simulieren, werden diese mit einem Rauschen entsprechend Gleichung (18) beaufschlagt.
Zuerst wird das Fehlerszenario 1 mit der Variation der Modellparameter untersucht. An diesem wird dann mit Hilfe des Qualitätskriteriums eine Einschätzung, welche Optimierungsvariablen zusammen optimiert werden können, vorgenommen. Mit diesen Optimierungsvariablen werden dann alle weiteren Fehlerszenarien durchgespielt und über die Fehlermetrik verglichen. Danach wird der Einfluss auf die Rechenzeit durch die drei unterschiedlichen Kennfeldapproximationen ermittelt. Abschließend wird in einem angepassten Szenario überprüft, ob die erweiterte Zielfunktion (14) für eine robuste Optimierung zu verbesserten Ergebnissen, d. h. einer geringen Abhängigkeit von der Lage der einzelne Arbeitspunkte führt.

4 Ergebnisse

Das erste Szenario liefert die Ergebnisse in Abb. 4, dabei werden fünf parameter λ_1, λ_2, N, P_{ax} und P_{ay} zur Optimierung ausgewählt. Die anschließende Betrachtung der Qualitätskriterien für die Optimierungsparameter in Tab. 2 und 3 zeigt, dass zwischen λ_1 und λ_2 sowie zwischen P_{ax} und P_{ay} eine Abhängigkeit besteht. Für eine Analyse müssen die dazugehörigen Grafiken analysiert werden (s. Abschnitt 2.6). In Abb. 1 ist eindeutig ein linearer Zusammenhang zwischen den Optimierungsvariablen λ_1 und λ_2 zu sehen. Diese werden daher im folgenden Versuchsverlauf gleichgesetzt. Die Abb. 2 muss eingehender betrachtet werden. Wird der Suchraum auf realistische $25\,\%$ bezogen auf den Referenzbetriebspunkt eingeschränkt wird sinkt das Qualitätskriterium AZ_1 auf 0,56 und AZ_2 auf 0,77. Die Optimierungsvariablen P_{ax} und P_{ay} können also gemeinsam optimiert werden. Die Ergebnisse aus der Optimierung sind in Abb. 5 zu sehen und zeigen eindeutig eine Verbesserung aller getesteten Optimierungsverfahren.

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

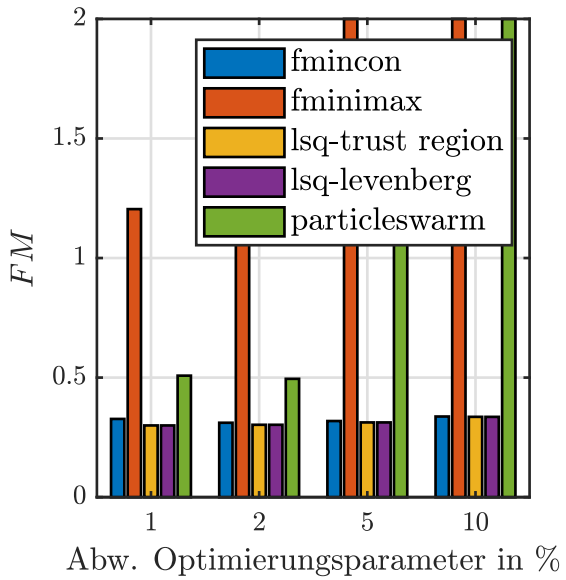


Abb. 4: Szenario 1 FM mit 5 Freiheitsgraden

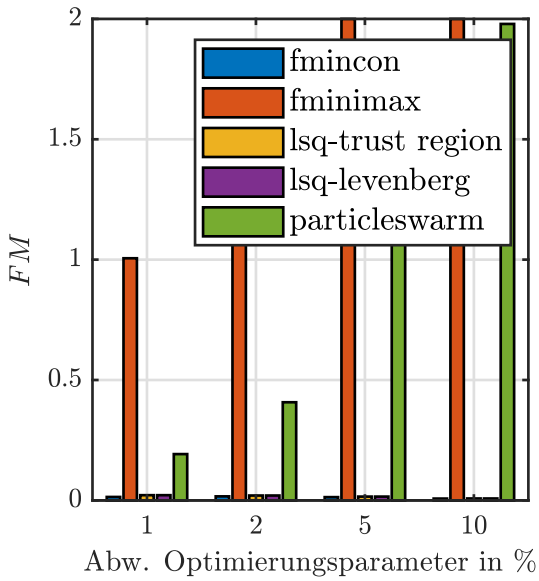


Abb. 5: Szenario 1 FM mit 4 Freiheitsgraden

Tab. 2: Qualitätskriterium AZ_1

AZ_1	λ_1	λ_2	N	P_{ax}
P_{ay}	0.05	0.03	0.51	0.86
P_{ax}	0.05	0.03	0.56	
N	0.06	0.03		
λ_2	0.65			

Tab. 3: Qualitätskriterium AZ_2

AZ_2	λ_1	λ_2	N	P_{ax}
P_{ay}	0.98	1	0.79	0.79
P_{ax}	0.93	0.96	0.82	
N	0.98	1		
λ_2	1			

Für die folgenden Versuche wird auf *fmincon* und den *Partikelschwarmoptimierer* auf Grund des schlechten Abschneidens verzichtet. Weiterhin werden nur noch vier Optimierungsvariablen $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, N, P_{ax} und P_{ay} verwendet.
Bei den Szenarien zum Einfluss von Rauschen in Abb. 6 und Startpunktänderung Abb. 7 liefern alle drei Optimierer ähnliche Ergebnisse. Beim *Levenberg-Marquardt*-Algorithmus macht sich die fehlende Grenze des Suchraumes durch ein schlechteres Ergebnis von FM bemerkbar.
Die Grenzen der Optimierung sind bei der Betrachtung von Szenario 4 in Abb. 8 zur Untersuchung des Einflusses von fehlerhaften Messstellen zu sehen. Bei Einführung auch nur einer falschen Messstelle, hier definiert als Abweichung von größer $25\,\%$ vom wahrem Wert, ist keine erfolgreiche Optimierung möglich. Um eine erfolgreiche Optimierung zu ermöglichen, müssen wie in Szenario 5, siehe Abb. 9, eine Plausibilitätsprüfung vor der eigentlichen Optimierung vorgenommen und stark fehlerhafte Messstellen ausgeschlossen werden.
Für die Untersuchung zum Geschwindigkeitseinfluss der Kennfeldapproximation wird das durch die Dimensionsanalyse geänderte Kennfeld in Abb. 10 gezeigt. Es ist deutlich die Verkleinerung des Bereiches zu erkennen, in dem approximiert werden muss. Dies zeigt sich auch nach der Geschwindigkeitsanalyse, indem Szenario 1 hundert Mal wiederholt wird. Dabei werden alle drei Kennfeldapproximationen bei der Optimierung durch den *Trust-region-reflective*-Algorithmus auf Basis der benötigten Zeit verglichen, siehe Tab. 4.
Die Ergebnisse zur Untersuchung der gewichteten Zielfunktion sind in Abb. 11 zu sehen. Es fällt auf, dass der einzelne Arbeitspunkt auf der linken Seite besser, die vier gruppierten Arbeitspunkte auf der rechten Seite aber etwas schlechter optimiert sind. Dies bedeutet, dass abgewogen werden muss, ob die Zielfunktion (14) verwendet wird, denn wenn der einzelne Arbeitspunkt stark fehleranfällig ist, wiegt dies die schlechtere Optimierung der gruppierten Arbeitspunkte nicht auf.

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

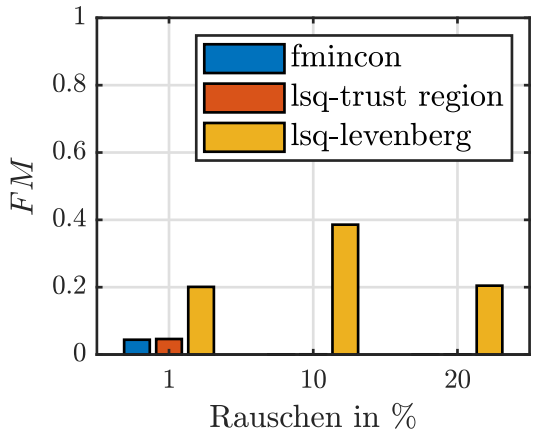


Abb. 6: Szenario 2

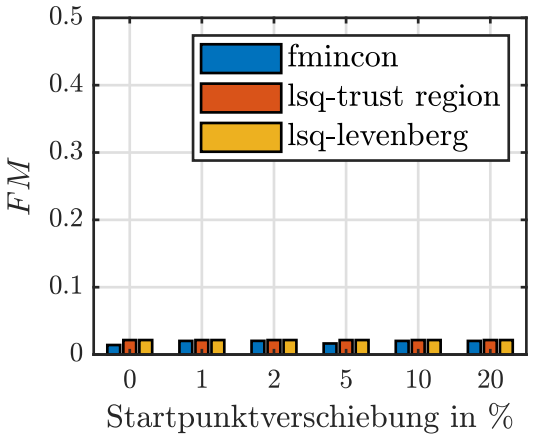


Abb. 7: Szenario 3

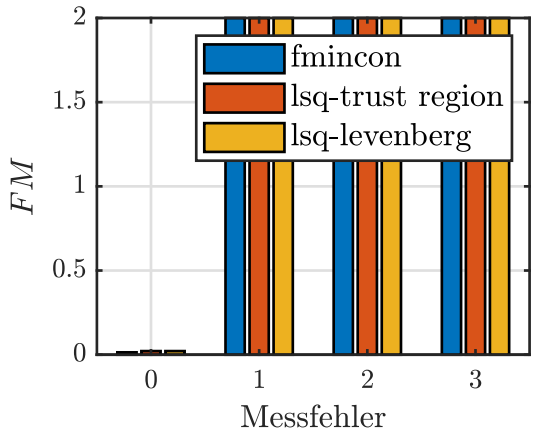


Abb. 8: Szenario 4 - Messfehler

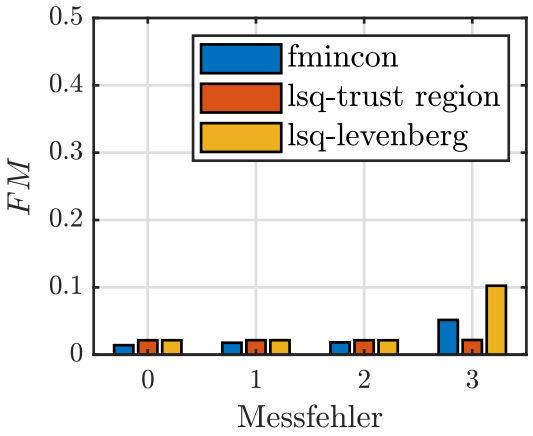


Abb. 9: Szenario 5 mit Plausibilitätsprüfung

5 Auswertung

Das Ergebnis von Szenario 1 mit 5 Freiheitsgraden, siehe Abb. 4, zeigt deutlich, dass eine Vorauswahl der gemeinsam zu optimierenden Parameter notwendig ist. Erst die richtige Bewertung und Anpassung der Optimierungsvariablen mit Hilfe der Gütekriterien AZ_1 und AZ_2 ermöglicht eine Optimierung mit minimalem Restfehler. Nach der Wiederholung von Szenario 1 mit 4 Freiheitsgraden ist es möglich, eine erste Bewertung der verwendeten Optimierungsalgorithmen vorzunehmen. Der Optimierungsalgorithmus *fmincon* und der *Partikelschwarmoptimierer* sind dabei als ungeeignet einzuschätzen. Die Verwendung von *Partikelschwarmoptimierern* erfordert zudem eine um den Faktor 10 längere Rechenzeit im Vergleich zu den anderen Optimierungsalgorithmen. Die weiteren vier Szenarien zeigen bei den verbliebenen drei Optimierungsalgorithmen ähnliche Ergebnisse. Hierbei ist allerdings beim Verfahren *lsqcurvefit* der *Trust-region-reflective*-Algorithmus gegenüber dem *Levenberg-marquardt*-Algorithms zu bevorzugen.

Tab. 4: Zeitdauer von jeweils 100 Optimierungen bei Variation der Kennfeldapproximation

Methode	Zeit
Exponentialfunktion mit Interpolation	4,23 s
Polynom dritter Ordnung	20,52 s
Dimensionsanalyse mit Polynom dritter Ordnung	10,79 s

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

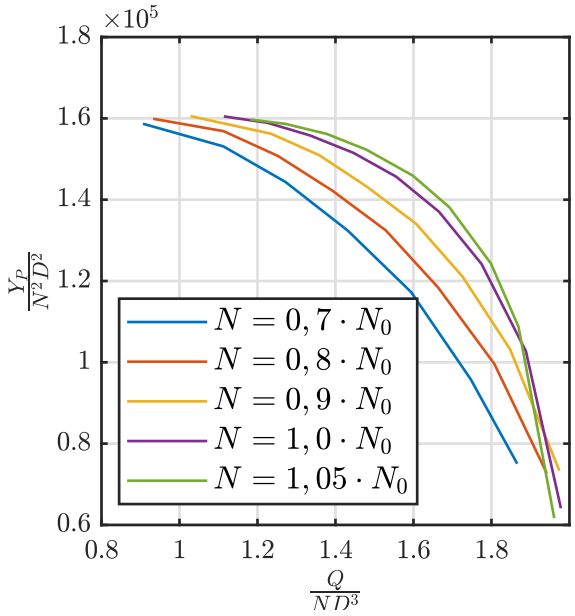


Abb. 10: Kennfeld nach der Dimensionsanalyse

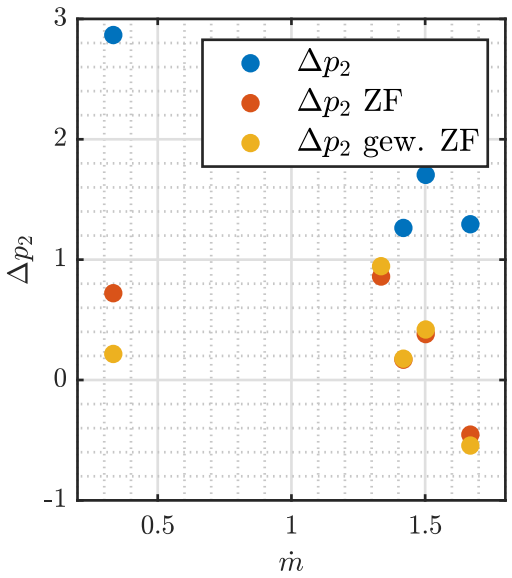


Abb. 11: Vergleich zwischen der Standard- und der gewichteten Zielfunktion

6 Zusammenfassung

Der Beitrag befasst sich mit der vergleichenden Analyse der Identifikation der Parameter von Simulationsmodellen auf Basis unterschiedlicher numerischer Optimierungsverfahren. Neben gradientenbasierten Verfahren wird auch ein Partikelschwarmoptimierer betrachtet. Die parameteridentifikation wird mit Werten der relevanten Modellgrößen an verschiedenen Arbeitspunkten durchgeführt. Als wichtiges Problem stellt sich die Identifizierbarkeit der Parameter dar. Hierfür werden zwei Kriterien eingeführt, die eine numerische Analyse erlauben. Die Optimierungsverfahren werden in verschiedenen Szenarien untersucht und miteinander verglichen. Hierzu gehören unterschiedlich Signal-Rausch-Verhältnisse, verschiedene Startwerte für die Optimierungsvariablen sowie stark fehlerbehafte Messwerte bei den Eingangsgrößen. Im Ergebnis können die in *Matlab* implementierten Verfahren *fmincon* und *lsqcurvefit* mit dem *Trust-region-refective*-Algorithmus empfohlen werden.

Förderung
Dieses Projekt wurde vom BMWi mit der Nummer ZF4088617GR9 gefördert.

7 Literatur

[1] Schäffler, S. Globale Optimierung.Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
[2] Ulbrich, M.; Ulbrich, S. Nichtlineare Optimierung. Birkhäuser Basel, 2012.
[3] Flockermann, D. Einsatz von Optimierungsverfahren zur Bestimmung der Parameter nichtlinearer Ersatzschaltbilder von elektrischen Maschinen. Dortmund, 2003.
[4] Wernholt, E.; Gunnarsson, S. Nonlinear Identification of a Physically Parameterized Robot Model. 14th IFAC Symposium on System Identification, Newcastle, Australia, 2006.
[5] Michalewicz, Z.; Schmidt, M. Evolutionary Algorithms and Constrained Optimization. Springer, Boston, MA, 2003.
[6] Bäck, T., Schwefel, H. An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization. Evolutionary computation. 1993, Bd. 1(1).
[7] Thomas, P. Simulation of industrial processes for control engineers 1999, S. 239-255
[8] Wright, M.H. The interior-point revolution in optimization: History, recent developments, and lasting consequences. Bull. Amer. Math. Soc. 42 (2005), 39-56
[9] Gröll, L. Methodik zur Integration von Vorwissen in die Modellbildung. KIT Scientific Publishing, 2015.
[10] E. Buckingham: The principle of similitude. In: Nature. 96, 1915, S. 396–397

Open Access. © 2022 R. Thiel, J. Jäkel, K. Schleifer, R. Schulze
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Plug & Produce im real-virtuellen Kontext fertigungstechnischer heterogener Anlagen

Steuerungsarchitektur und Virtuelle Inbetriebnahme

P. Habiger[1], G. Hildebrandt[2], R. Drath[3], M. Barth[4], A. Fay[5], A. Zor[6] und M. Marseu[7]

Zusammenfassung

Die Wandelbarkeit von Anlagen im Kontext der Industrie 4.0 führt dazu, dass zukünftig Fertigungsmodule unterschiedlicher Hersteller interagieren müssen – es entsteht eine heterogene Modullandschaft. Das erfordert Lösungen für die automatisierungstechnische Einbindung und den flexiblen Austausch von weiteren, herstellerfremden und bislang unbekannten Modulen. Es werden Lösungskonzepte zur Umsetzung eines strukturierten und herstellerunabhängigen Engineering-Konzepts für Plug & Produce in einer heterogenen Landschaft von Fertigungsmodulen benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit stellen die Autoren eine Architektur vor, wie dieses Ziel erreicht werden kann. Der Fokus liegt dabei auf der Steuerungsarchitektur, der Informationsmodellierung und der Virtuellen Inbetriebnahme als Grundlage für das gemischt real-virtuelle Engineering. Das vorgestellte Konzept basiert auf einer Anforderungsanalyse und ist prototypisch umgesetzt.

Stichwörter

Steuerungsarchitektur, Virtuelle Inbetriebnahme, Plug & Produce, Modulare Automation

1 Motivation und Zielstellung

Die steigende Kundennachfrage nach individuellen Produkten erhöht die Anzahl der Produktvarianten und verkürzt damit die Dauer der Produktlebenszyklen [1]. Dies führt zu einer steigenden Komplexität und kürzeren Entwicklungszeiten im Anlagenbau. Folglich muss der Engineering-Prozess vereinfacht, kostengünstiger und effizienter werden [2]. Zwei wirkungsvolle Ansätze, die diese Ziele verfolgen, sind die Modularisierung von Produktionsanlagen [3] und das virtuelle Engineering [4].
Virtuelles Engineering führt die Idee der V*irtuellen Inbetriebnahme* (VIBN) in die früheren Phasen des Engineerings ein. Während in der VIBN simulative Methoden am Ende des Engineeringprozesses für Testzwecke verwendet werden, werden sie bei virtuellem Engineering von Beginn an über den gesamten Entwicklungszeitraum und darüber hinaus verwendet. Es ermöglicht frühzeitige Tests und

[1] Pascal Habiger, Hochschule Pforzheim, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
[2] Gary Hildebrandt, Hochschule Pforzheim, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
[3] Prof. Dr.-Ing. Rainer Drath, Hochschule Pforzheim, Prof. Mechatronische Systementwicklung
[4] Prof. Dr.-Ing. Mike Barth, Hochschule Pforzheim, Prof. Engineering mechatronischer Komponenten
[5] Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay, Helmut-Schmidt-Universität, Prof. Automatisierungstechnik
[6] Ayhan Zor, Festo Didactic SE, Education DE Regionalleiter Süd-West
[7] Moritz Marseu, Festo Didactic SE, Digital Factory and Smart Automation

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

verbessert das Verständnis des zu betrachtenden Systems in jeder Entwicklungsphase, ohne dass die entsprechende Hardware physisch vorhanden sein muss. Die Modularisierung umfasst die Zerlegung einer Anlage in standardisierte funktionale Einheiten (Module), die nach dem Baukastenprinzip flexibel und herstellerübergreifend zusammengesetzt werden und interoperabel agieren können. Modulare, industrielle bzw. zu didaktischen Mitteln eingesetzte Fertigungsanlagen wie etwa die CP Factory von Festo Didactic SE agieren mangels einheitlicher verfügbarer Standards üblicherweise im Rahmen vorher vereinbarter und proprietärer Steuerungs- und Kommunikationsstrukturen im *homogenen* Umfeld aus zueinander passenden Modulen und einer Orchestrierung.
Die Zukunft erfordert jedoch technische Lösungen für heterogene Systeme, d.h. die automatisierungstechnische Einbindung oder den flexiblen Austausch von weiteren, herstellerfremden und bislang unbekannten Modulen. Heute erfordert dies noch tiefe, komplexe, riskante und daher unerwünschte Eingriffe in die Steuerungsprogramme und in die Orchestrierung. Die Wandelbarkeit von Produktionseinrichtungen zielt jedoch darauf ab, eine Anlage flexibel und adaptiv an veränderte Produktionsziele anpassen zu können, auch mit vorab unbekannten Produktionsmodulen unterschiedlicher Hersteller. Die Bewältigung gewünschter Flexibilität in heterogenen Systemen ist bisher nicht gelöst. Zur Lösung dieser Problemstellung verfolgen die Autoren die Kombination der Methodik der modularen Automation mit der des virtuellen Engineerings. Diese Kombination bietet einen großen Mehrwert für ein effizientes Engineering. Dieser Fusion widmet sich das BMBF-geförderte Forschungsprojekt METHODS (**M**odular **E**ngineering **T**echniques for **H**eter**O**geneous **D**iscrete **S**ystems) an der Hochschule Pforzheim in Kooperation mit Festo Didactic SE, Festo SE und der Helmut-Schmidt-Universität. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Engineering-Konzepts für Plug & Produce in einer heterogenen virtuell-realen Landschaft von Fertigungsmodulen. Für die Umsetzung des Plug & Produces ist es in einem ersten Schritt notwendig zu klären, wie die Steuerungsarchitektur der Module aufgebaut ist, wie die Informationen für die Integration in einen Anlagenverbund bereitgestellt werden und wie sich die Module in einer Virtuellen Inbetriebnahme verhalten. Basierend darauf sind höherwertige Konzepte anwendbar, sodass die Vision des Projektes erreicht werden kann. Dafür werden in diesem Beitrag zuerst im Stand der Technik zwei relevante Konzepte vorgestellt, die als Basis für den Beitrag dienen. In einer anschließenden Anforderungsanalyse werden Anforderungen an die Steuerungsarchitektur, Informationsmodellierung und VIBN erhoben, die im vorgestellten Konzept, in den dazugehörigen Teilkonzepten und in der prototypischen Implementierung berücksichtigt sind.

2 Stand der Technik

Die Grundlage für die Untersuchungen bildet das (homogene) modulare und flexible Ausbildungssystem **CP Factory**[8] von Festo Didactic SE. Es besteht aus Grundmodulen (GM), die mit Applikationsmodulen (AM) erweiterbar sind. Über Förderbänder transportieren die Grundmodule Teile, die mit Hilfe der Applikationsmodule bearbeitet werden. Die Module sind an ein Manufacturing Execution System (MES) angeschlossen, welches die Prozesse der Module orchestriert und beobachtet. Im Wesentlichen bestimmt ein proprietäres Interaktionsprotokoll zwischen den GM und dem MES die Funktionalität der Anlage. Neben der zyklischen Zustandskontrolle werden zu spezifischen Events, wie bspw. bei dem Erkennen eines Warenträgers, fest definierte Datenpakete in einem Handshake-Verfahren ausgetauscht. Die Datenpakete beinhalten Informationen über die Produkte, die auszuführenden Dienste und vieles mehr. Die Module und das MES müssen in der Lage sein, die versendeten Datenpakete zu interpretieren und umzusetzen. Die Anlage ist so ausgelegt, dass diese in einer homogenen Welt mit Modulen eines Herstellers einwandfrei funktioniert. Die Transportvorgänge in den GM werden nicht als Dienste abgebildet, sondern werden in Absprache mit dem MES von den GM intern individuell ausgeführt. Die AM sind den GM unterlagert, sodass das GM die Signale des angeschlossenen AM an

[8] CP Factory: https://www.festo-didactic.com/de-de/lernsysteme/fabrikautomation-industrie-4.0/

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

das MES vermittelt. Über eine weitere proprietäre Schnittstelle mit einem proprietären Befehlswortschatz interagieren die GM und AM unter Verwendung impliziter Vereinbarungen. Die Integration der GM in das MES und deren Konfiguration findet manuell über eine proprietäre Konfigurationsdatei statt. Die Einbindung herstellerfremder Module ist ohne Wissen der proprietären Schnittstellen und impliziten Vereinbarungen nicht möglich oder vorgesehen. Hier ist ein tiefer Eingriff erforderlich.
Ein neuer Ansatz zur Modularisierung heterogener Systeme etabliert sich aktuell in der Prozesstechnik: das standardisierte **Module Type Package (MTP)** für die einheitliche Integration von Modulen in modulare Prozessanlagen [5]. Die Besonderheit besteht darin, dass jedes Modul durch ein elektronisches Informationsmodell beschrieben wird, das alle zum Betrieb notwendigen Informationen explizit modelliert. Das Informationsmodell kann dabei in verschiedene Bereiche wie etwa verfügbare Dienste, Bedienbild oder Alarmmanagement unterteilt werden. Bei dem Zusammenstellen von Modulen werden die beteiligten MTPs in ein Orchestrierungssystem importiert, interpretiert und dienen dort als Grundlage für die Ansteuerung und Überwachung der Module sowie ihrer Orchestrierung. Das Informationsmodell spezifiziert eine Schnittstelle, die unabhängig von konkreten Kommunikationstechnologien gilt. Diese Schnittstelle umfasst die Dienste, deren Parameter und die internen Komponenten. Damit ist ein einheitlicher und herstellerneutraler Zugriff auf die Module möglich. Das Konzept des MTP postuliert, dass Module dienstbasiert mit einem einheitlichen Zustandsmodell sowie definierten Befehlen agieren. Dienste sind über Prozeduren in Varianten ausführbar.
Im Bereich des Plug & Produce existieren weitere Forschungsarbeiten wie z.B. BaSys 4.2 und openMOS, die in METHODS berücksichtigt werden, jedoch in diesem Beitrag nicht verfolgt werden.

3 Anforderungsanalyse

Aus dem Stand der Technik und der Vorgabe einer heterogenen Modullandschaft lassen sich Anforderungen an die Steuerungsarchitektur und Informationsmodellierung ableiten, die u.a. Einflüsse auf die VIBN haben (s. Tabelle 1).
A1 – Harmonisierte Zugriffsschnittstelle: Für die Kopplung von heterogenen Modulen ist es wie bei dem MTP notwendig, dass sich alle beteiligten Systeme untereinander verstehen. Dies kann nur dann funktionieren, wenn sie wörtlich dieselbe Sprache sprechen. Die Voraussetzung dafür ist die Spezifikation einer herstellerneutralen und einheitlichen Zugriffsschnittstelle.
A2 – Dienstbasierte Steuerungsarchitektur: Damit Module austauschbar und die Anlagen wandelbar sind, ist ein einheitlicher Umgang mit den Fähigkeiten und den Funktionalitäten der Module als bspw. Dienste in einer serviceorientierten Architektur wie bei dem MTP notwendig. Die CP Factory setzt zwar Dienste ein, diese haben aber keine spezifizierten Zustände und Befehle und werden nur für bearbeitende Prozesse eingesetzt. Damit die gesamten Funktionalitäten gleich abgebildet werden, sollen alle Arten von Prozessen wie Transport- und Bearbeitungsprozesse als Dienste mit einem einheitlichen Zustandsmodell abgebildet werden.
A3 – Dienstvarianten: Dadurch, dass sämtliche Prozessarten über Dienste ausführbar sind (A2), sollen die Module mehrere Dienste gleichzeitig ausführen können und dabei mit Produktvariationen umgehen können. Damit ist es auch möglich, dass die Dienste hierarchisiert werden, um Kombinationen von Fähigkeiten zu bilden. Damit nicht ähnliche Funktionalitäten von Modulen in mehrere unterschiedlichen Dienste gebündelt werden, sollen Ausführungsvarianten verfügbar sein. Die Anforderungen sind seitens des MTP erfüllt. Die CP Factory erfüllt diese Anforderungen bisher nicht.
A4 – Keine Modulhierarchie: Hierarchien von Modulen haben den Vorteil der Abstraktion und der Bündelung zusammengehöriger Funktionalitäten gegenüber einem Orchestrierungssystem. Für die Hierarchisierung, wie sie bspw. bei der CP Factory realisiert ist, müssen die Module vorher über potenzielle koppelbare Module Kenntnis haben. Damit dies vermieden wird, sollen alle Module unabhängig von deren Prozessart auf einer Hierarchieebene agieren. Eine zwischenmodulare Kommunikation bzw. Nachbarsensitivität ist nur in Sonderfällen wie bspw. bei dem Ausfall oder der

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Übergabebereitschaft von Produkten zu berücksichtigen. Das MTP erlaubt die Hierarchisierung von Modulen, setzt sie aber nicht voraus.
A5 – Anmelde- und Identifikationsmechanismen: Für ein Plug & Produce ist es neben der flexiblen Ansteuerung wichtig, dass sich die Module selbstständig an dem Orchestrierungssystem anmelden, sich identifizieren, die Zugriffsschnittstelle teilen und ihre Dienste preisgeben. Dies ist sowohl bei dem MTP als auch in der CP Factory bis auf die Kopplung zwischen GM und AM nur manuell möglich.
A6 – Bedarfsorientierte Steuerung: Damit die individuellen Eigenschaften der in der Fertigungstechnik herrschenden Produktvarianz berücksichtigt werden können, sollen die Module wie bei der CP Factory in der Lage sein, die Produkte zu identifizieren. Für jedes identifizierte Produkt sollen dann die korrekten Dienste mitsamt den hinterlegten Parametern ausgeführt werden – die Identifikation und der Bedarf der Produkte soll somit der Auslöser der Dienste sein. Das MTP trifft keine Aussagen über die Notwendigkeit der Identifikation der Produkte, dies könnte jedoch in einem Dienst abgebildet werden. Prinzipiell werden Dienste per rezeptbasierter Steuerung umgesetzt, können aber auch bedarfsorientiert ausgeführt werden, sofern das Orchestrierungssystem dies unterstützt.
A7 – Produktion bei Kommunikationsabbruch: In der CP Factory und bei dem MTP kommunizieren die Steuerungen der Module über eine direkte Verbindung mit einem Orchestrierungssystem. Dies soll auch hier zutreffen. Sofern die Kommunikation aufrecht erhalten bleibt, funktionieren die Module einwandfrei. Sobald die Kommunikation abbricht, ist die Ausführung der Produktionsprozesse in den meisten Fällen abhängig von der Dienstart nicht mehr möglich. Damit die Module weiterhin produktiv sind, sollen die Module die Produktion bei einem Ausfall der zentralen Steuerung oder der Kommunikation aufrechterhalten.
A8 – Einheitliches Informationsmodell: Für die Integration von Modulen ist es wesentlich, dass die Orchestrierung erfährt, wie die Module zugreifbar sind und welche Dienste mit welchen Parametern zur Verfügung stehen. Diese Informationen sollen in einem einheitlichen und standardisierten Informationsmodell und Format vorliegen. Das entspricht dem MTP, was bei der CP Factory in einem proprietären Format unvollständig zur Verfügung steht.
A9 – Weiterführende vernetzte Eigenschaften: Über die automatisierungstechnischen Informationen hinaus, sind für die Auswahl von Modulen und die korrekte Handhabung weiterführende Eigenschaften wie z.B. die Geometrie oder die Hardware-Anschlüsse im Informationsmodell notwendig. Die Informationen sollen vernetzt sein und sich gegenseitig referenzieren, sodass eine domänenübergreifende Modellierung von Modulen möglich ist. Diese Art der Information und der Verbindungen ist bislang im MTP als auch bei der CP Factory nicht verfügbar.
A10 – Virtuell-reale Kopplung: Für die VIBN sollen die virtuellen und realen Module gegenüber der Orchestrierung auf identische Weise behandelt werden. Die Module werden damit auf dieselbe Weise in ein Anlagenverbund integriert und orchestriert. Das hat den Vorteil des effizienten Austauschs und Tests neuer und unbekannter Module im Kontext einer realen Anlage. Das MTP trifft keine Aussagen über die Integration virtueller Module, wobei die Schnittstelle der Module unabhängig davon ist, ob die Module real oder virtuell vorliegen. Die CP Factory ermöglicht die reine VIBN der Module über ein proprietäres Simulationstool, wobei ein gemischter Betrieb nicht untersucht wurde.

4 Konzepte für das Plug & Produce

Die Vision von METHODS besteht darin, Plug & Produce von modularen heterogenen Fertigungsanlage mit gemischt real-virtuellem Engineering zu ermöglichen. Das Konzept sieht gemäß Bild 1 vor, die Steuerungen der Module mit einer flexiblen Steuerungsarchitektur (A) für das Plug & Produce auszustatten. Damit einhergehend werden umfassende Informationsmodelle der Module (B) erstellt, die als Teilmodell(e) in Industrie 4.0 Verwaltungsschalen (VWS) [6] integriert (D) werden. Dabei wird die erfolgreiche Methodik des MTP der Prozessautomation erstmalig auf die Domäne der diskreten Automatisierung übertragen. Aus der Anforderungsanalyse ist zu entnehmen, dass das MTP aufgrund seines

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

herstellerneutralen Einsatzes einen Großteil der Anforderungen erfüllt. Es ist jedoch nicht für die fertigungsspezifischen Anforderungen wie die bedarfsorientierte Ansteuerung konzipiert, sodass die konkrete Adaption geprüft werden muss. Mittels der domänenübergreifenden Anwendung des MTP wäre sogar die Interaktion von prozesstechnischen, fertigungstechnischen und logistischen Modulen und Anlagen möglich. Zur Erleichterung des Modul- und Anlagenengineerings sollen zudem reale und virtuelle Fertigungsmodule durch ein neuartiges virtuelles Engineering direkt miteinander interagieren können (C). Daraus resultiert, dass der Entwurf, die Visualisierung, der Test und die Inbetriebnahme virtueller Module im Kontext der realen Anlage stattfinden kann [7]. Durch die VWS werden Module im Netz find- und erkundbar und in einer dafür geeigneten Industrie 4.0 Plattform (E) automatisch vom übergeordneten Orchestrierungssystem (F) erkannt. Diese ist somit in der Lage die Module zu explorieren, zu einem geeigneten Anlagenlayout zu orchestrieren und anzusteuern. In diesem Beitrag liegt, wie bereits beschrieben, der Fokus auf den ersten drei Architekturbestandteilen (A - C) und repräsentiert damit die Grundlage für das heterogene, real-virtuelle Engineering sowie für Lehrkonzepte des virtuellen Arbeitens im realen Kontext. Der Konzeptteil C ist für den ersten Schritt lediglich im Rahmen einer Virtuellen Inbetriebnahme umgesetzt. Die Teilkonzepte sind in den folgenden Abschnitten beschrieben.

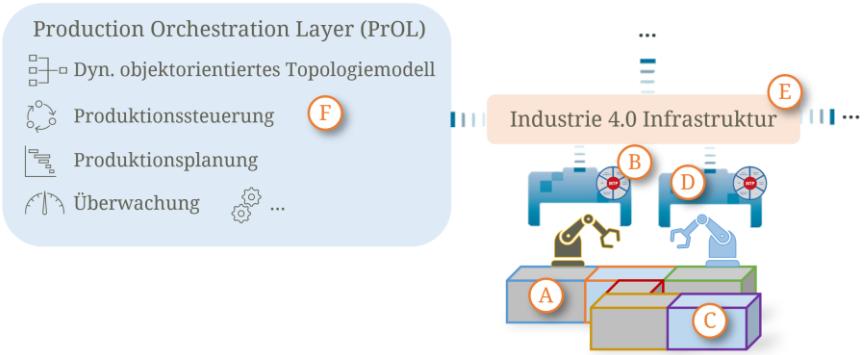


Bild 1: Vision von METHODS mit Architekturbestandteilen (A-F)

4.1 Steuerungsarchitektur

Aus Bild 1 ist zu entnehmen, dass die Kommunikation zwischen einem Orchestrierungssystem und den Modulen über eine VWS erfolgt. Die VWS kombiniert normierte Industrie 4.0 Schnittstellen mit Informationsmodellen. Durch sie werden die Module im Netz find- und erkundbar. Die VWS in Kombination mit dem MTP bietet in Anbetracht der hier geltenden Anforderungen großes Potential. Während das MTP die grundlegende Schnittstelle der Module definiert (A1) und diese in einem einheitlichen Informationsmodell (A8) bereitstellt, ist die VWS für Anmelde- und Identifikationsmechanismen (A5) sowie die Datenhaltung weiterführender vernetzte Eigenschaften (A9) geeignet.
Für die Steuerungsarchitektur bedeutet dies, dass die Grundfunktionalitäten in Form von MTP-Diensten wie z.B. Materialtransport und -bearbeitung oder die Kommunikation zur Orchestrierung von den Modul-Steuerungen selbst übernommen werden (A2). Diese Dienste sind am MTP orientiert parallel ausführbar, können gegenseitig unterlagert sein und von überlagerten Diensten angesteuert werden und erfüllen über Prozeduren die gewünschte Variantenvielfalt aus A3. Optionale Funktionalitäten wie z.B. das Produkthandling sind hier auch möglich. Höherwertige Funktionalitäten des Plug & Produce wie die Registrierung, Anmeldung und Authentifizierung in der Orchestrierung oder die Informationsübermittlung der Zugriffsorte, Statuswerte oder nicht-steuerungsrelevanter Informationen werden seitens der VWS ausgeführt. Die VWS bildet somit den Mittler zwischen Industrie 4.0 Anwendungen und den Steuerungen der Module. In diesem Zusammenspiel werden die Funktionen der Module auf das Minimum – die reine Ausführung der vorgesehenen Funktionalitäten – reduziert. Die Aufteilung der Funktionalitäten ist in Bild 2 angedeutet.

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Aus A7 ergibt sich, dass die Module direkt über ein Orchestrierungssystem angesteuert werden sollen und nicht gänzlich durch die VWS gekapselt werden. Das hat den Vorteil, dass der Ausfall der Industrie 4.0 Kommunikation und der Absturz von VWS-Servern nicht die Produktionsfähigkeit der Anlage beeinflussen. Sofern doch die Kommunikation zum Orchestrierungssystem oder dieses selbst ausfällt, soll gemäß A7 die Produktion fortgesetzt werden. Dies soll durch eine asynchrone Übertragung der Parameter für die individuellen Produkte geschehen, deren Informationen in separaten Produktinformationsmodellen hinterlegt sind. Der Auslöser der Dienste mit den passenden Parametern ist die Erkennung und Identifikation der spezifischen Produkte und deren Zustände (A6) in Form von dafür vorgesehenen Diensten. Bislang sieht das MTP nur vor, dass Parameter in bestimmten Zuständen übermittelt werden und ist nicht dafür vorbereitet, dass mehrere Parametersätze zu beliebigen Zeitpunkten für die individuellen Produkte übertragen werden.
Die VWS verwendet zur Reduzierung der Komplexität dieselbe Kommunikationsschnittstelle zum Modul wie das Orchestrierungssystem, wobei diese nicht steuernd zugreift, sondern vorwiegend lesend und schreibend für Registrierungsdaten. Alle weiteren an der Kommunikation beteiligten Systeme wie z.B. Diagnose- und Überwachungssoftware greifen über die Industrie 4.0 Plattform und die VWS auf die Modulinformationen zu. Das Orchestrierungssystem ist selbst auch über die Industrie 4.0 Plattform mit den VWS gekoppelt, sodass darüber die Zugriffschnittstelle der Module abgerufen werden kann. Die Schnittstelleninformation muss daher nicht wie bei dem klassischen MTP manuell im Orchestrierungssystem eingepflegt werden, sondern erfolgt dynamisch über die VWS.

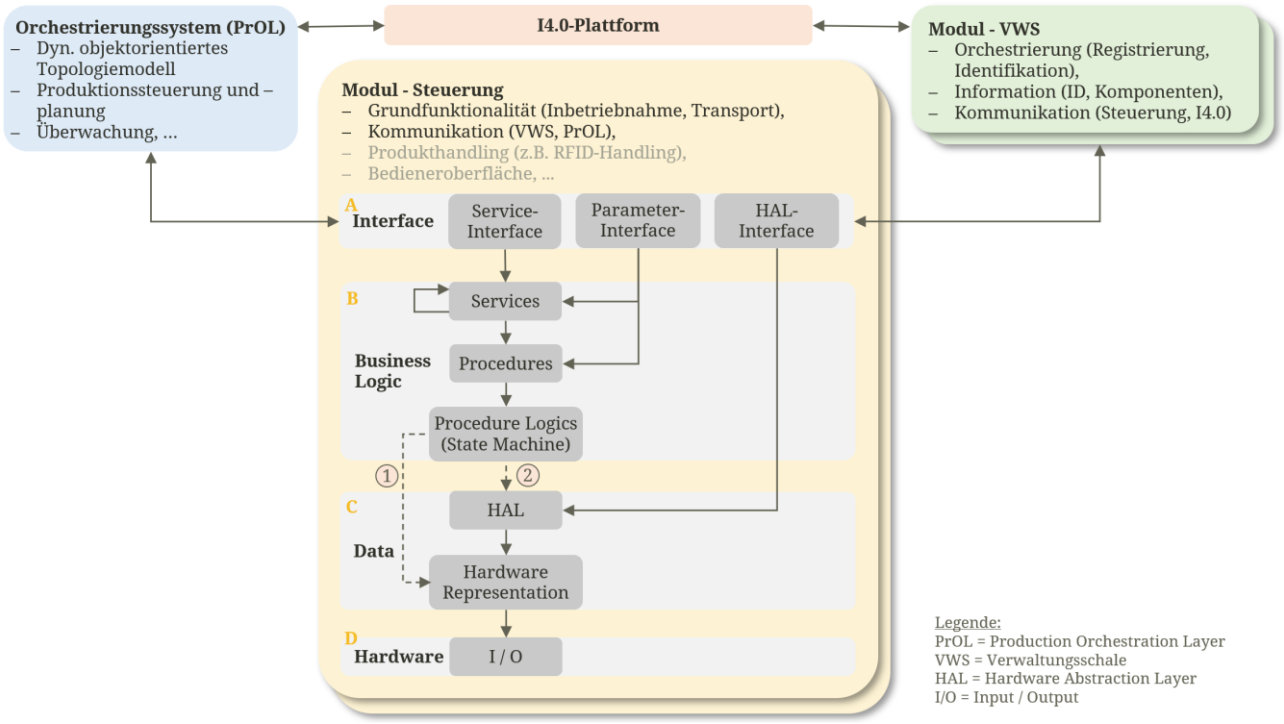


Bild 2: Abgrenzung der Steuerungsarchitektur und Ebenenhierarchie

Ein weiterer Aspekt, der in Bild 2 zu erkennen ist, ist die Vermeidung der Hierarchisierung der AM und GM der CP Factory. In METHODS werden alle Module gemäß A4 auf einer Hierarchiestufe betrachtet. Es setzt zwar durch die geringere Abstraktionsebenen voraus, dass die Kommunikationslast mit dem Orchestrierungssystem erhöht ist und darin die Kopplungslogik der Module stattfinden muss, aber birgt dennoch viele Vorteile: Alle Module werden gleichbehandelt, sie sind zentral verwaltet, lose gekoppelt und einfach auszutauschen, ohne vorher gegenseitig bekannt zu sein.

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

Zusätzlich zur reinen Aufteilung der Funktionalitäten definiert METHODS eine Ebenenhierarchie (s. Bild 2), die sich an einigen Referenzimplementierungen des MTP wie z.B. die ABB-Implementierung[9] und allgemeinen Steuerungsarchitekturen [8] orientiert. Die Ebenenhierarchie besteht aus vier Ebenen und der Zugriff erfolgt von oben (A) nach unten (D): Die Interface-Ebene (A) umfasst die Kommunikationsschnittstelle für die Dienste, Parameter und internen Komponenten. In der Business Logic-Ebene (B) sind die Funktionalitäten der Module gekapselt. Dort sind die Dienste sowie Prozeduren mit deren Implementierung inklusive dem Zustandsmodell des Dienstes enthalten. Dienste können hierarchisch aufgebaut sein. Auf der Data-Ebene (C) befindet sich die sog. Hardware Abstraction Layer (HAL) und die Hardware-Repräsentation. Die HAL dient als Adapter [9] für den Zugriff auf die Hardware-Repräsentationen (2), die in ihren proprietären Funktionsbausteinen vorliegen. Die HAL ist im MTP ursprünglich für den Zugriff der Bedienbilder konzipiert, wobei diese auch für die interne Ansteuerung verwendet werden kann. In den Fällen, bei denen die Aktoren und Sensoren keine konkrete Repräsentation in der HAL zugewiesen werden können, werden deren Hardware-Repräsentationen direkt mit den Prozeduren gekoppelt (1). Die Verbindung der Hardware-Repräsentation mit der realen Hardware (D) findet über I/O-Signale oder Feldbuskommunikation statt.

4.2 Informationsmodellierung

Neben der Steuerungsarchitektur findet auch die Informationsmodellierung auf Basis des MTP statt (A8). Für jeden Modultyp existiert ein MTP. Im Zusammenspiel mit einer VWS wird das MTP „als Ganzes“ in eine VWS integriert [10] und von dort aus für das Orchestrierungssystem verfügbar gemacht. Das hat den Vorteil, dass die Engineering-Daten nicht erneut reproduziert und redundante Informationen vermieden werden. Innerhalb der VWS sind weiterführende Informationen und Eigenschaften (A9) über die Module enthalten, die für eine Orchestrierung relevant sind, wie z.B. die IP-Adresse.

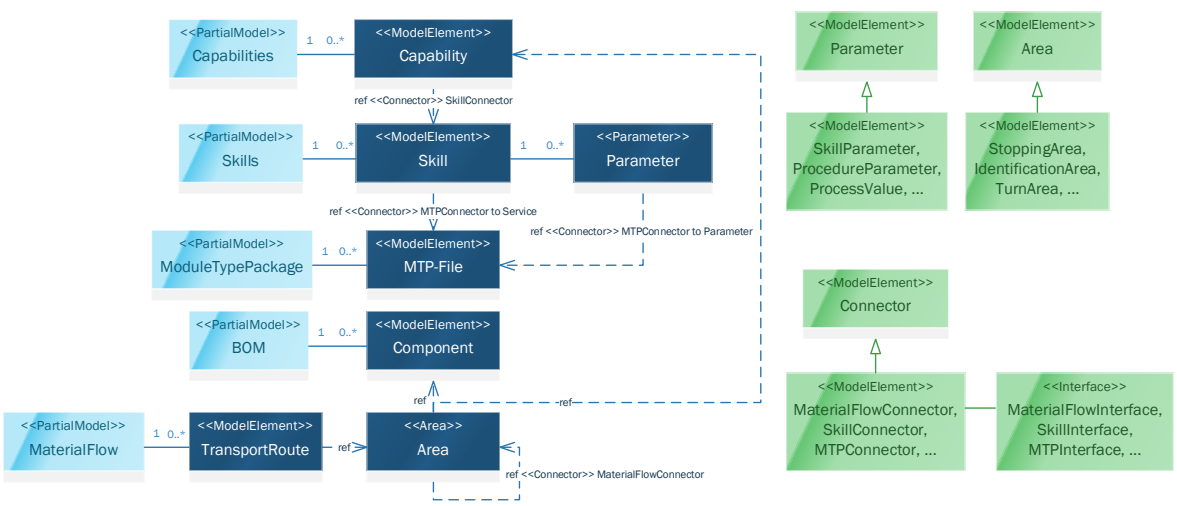


Bild 3: Auszug des Konzepts der Informationsmodellierung

Basierend auf einer ausführlichen Recherche in Abgleich mit den Anforderungen des Projektes METHODS sind folgende grundlegende Modellierungsvorschriften definiert. Die Modellinhalte werden als Teilmodelle strukturiert. Es werden möglichst viele bereits etablierte Teilmodelle, wie z.B. das Namensschild (Nameplate), verwendet. Die Teilmodelle und deren Merkmale werden über Referenzen gekoppelt. Für die domäneninterne und -externe Kopplung von spezifischen Modellelementen wie z.B. der Dienste oder des Materialflusses wird das Konnektor-Konzept aus [11] angewandt.

[9] ABB MTP: https://new.abb.com/control-systems/modular-automation/module-type-package

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Konnektoren sind eigenständige und semantische Modellelemente, die reale und virtuelle Schnittstellen zwischen Komponenten bilden. Es werden sowohl domänenbasierte Teilmodelle wie z.B. Commissioning und Maintenance als auch sichtenbasierte Teilmodelle wie z.B. ElectricalView oder MechanicalView für die Reduktion redundanter Informationen und Bündelung in zusammengehörige Teilmodelle eingesetzt. Eine technologieunabhängige Abbildung eines vereinfachten Teilausschnitts des Schemas des Informationsmodells ist in Bild 3 dargestellt. Im rechten Bereich sind einige Varianten von Modellelementen aufgezeigt, die für eine konkrete Modellierung notwendig sind. So gibt es bspw. unterschiedliche Arten von Konnektoren. Im linken Bereich sind einige vernetzte Informationen aufgezeigt, die über die Konnektoren und Schnittstellen in Zusammenhang stehen. Bspw. referenziert eine Fähigkeit auf einen Skill, der auf einen Service innerhalb des MTP-Dokuments verweist, das Teil des MTP-Teilmodells ist. Weiterführende Informationen zu dem Informationsmodell folgen in weiteren Publikationen.

4.3 Virtuelle Inbetriebnahme

Im Projekt METHODS entstehen komplexe Konzepte für das virtuelle Engineering im Kontext von realen modularen Produktionsanlagen wie zum Beispiel die Interaktion virtueller und realer Module im gemeinsamen Produktionskontext [7]. Für den Fall der reinen Ansteuerung der Module und somit der VIBN ist u.a. gefordert, dass die virtuellen und realen Module mit denselben Mitteln angesteuert werden (A10). Die in Kapitel 4.1 beschriebene einheitliche Schnittstelle ist unabhängig davon, ob das Modul real oder virtuell existiert - die Schnittstelle gegenüber der Orchestrierung und VWS ist gleich aufgebaut. Bei der Verwendung von herstellerneutralen Kommunikationstechnologien wie z.B. OPC UA merkt die Orchestrierung keine Unterschiede zwischen den virtuellen und realen Modulen. Die Schnittstelle gegenüber der Hardware (s. Ebene D aus Bild 2) kann wiederum auf individuellen Wegen wie z.B. Shared-Memory erfolgen.

5 Prototypische Umsetzung

Die gesamte prototypische Implementierung ist anhand des Branch-Grundmoduls der CP Factory aufgezeigt. Das reale Modul besitzt eine S7-1512 Steuerung von Siemens und das virtuelle Modul ist mit einer virtuellen SPS von CoDeSys abstrahiert. Die Module sind damit in der Lage, die Schnittstelle gegenüber der Orchestrierung und VWS per OPC UA bereitzustellen. Für die Implementierung der Steuerungsarchitektur im TIA Portal kommt die Referenzimplementierung von ORCA[10] und für CoDeSys das PA-Toolkit[11] von Festo SE zum Einsatz. Zur Umsetzung der Funktionalitäten des Moduls und den dazugehörigen Betriebsmitteln auf dem Modul sind die in Bild 4 orange dargestellten Dienste und Dienstparameter definiert. Bspw. wird jeder Stopper mit seiner spezifischen ID aktiviert (*Release*) und jede Weiche mit der Angabe des Fahrtziels mit *Turn* angesteuert. Des Weiteren sind die Komponenten auf die Control Modules des MTP übertragen, in Bild 4 blau dargestellt, sodass z.B. die Stopper und Weichen mit dem *BinVlv* abgebildet werden können. Für das RFID-Lesegerät existiert kein entsprechendes Control Module, sodass dieses derzeit nicht über die HAL abstrahiert werden kann (s. (1) bei Bild 2). Dienstinterne Abhängigkeiten sind gemäß der VDI 2658-4 berücksichtigt, sodass bspw. der Stopper nicht gleichzeitig herunter- und hochfahren kann. Bislang existiert kein Orchestrierungssystem, das die Module ansteuert, sodass dies manuell über den UA Expert stattfindet. Die Abbildung einer Produkt- und Auftragsvielfalt ist dabei schwierig abzubilden. Daher ist die Steuerung derzeit so implementiert, dass die Module noch unabhängig von den Produkt-IDs die Dienste ausführen, d.h. bei

[10] MTP - Moduldesign mit TIA Portal: https://support.industry.siemens.com/cs/de/de/view/109783062
[11] PA-Toolkit: https://www.festo.com/pa-toolkit

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

der Erkennung eines Produktes wird immer der Parametersatz verwendet, der als letztes an der Parameter-Schnittstelle für einen Dienst zum *Idle*-Zeitpunkt anliegt. Die Dienste werden trotzdem intern bedarfsorientiert gestartet und gehen nach der erfolgreichen Ausführung in den *Idle*-Status zurück. Das Informationsmodell umfasst sowohl das für das Branch-Modul angewandte MTP als auch weitere Informationen von Bild 3. Das Modell ist als **.amlx* für Automation Component [11] umgesetzt, da dieses für das Engineering von Automatisierungssystemen ausgelegt und damit einfacher zu handhaben ist als bspw. **.aasx*. Die Datei wird in eine VWS „als Ganzes“ basierend auf [10] integriert.

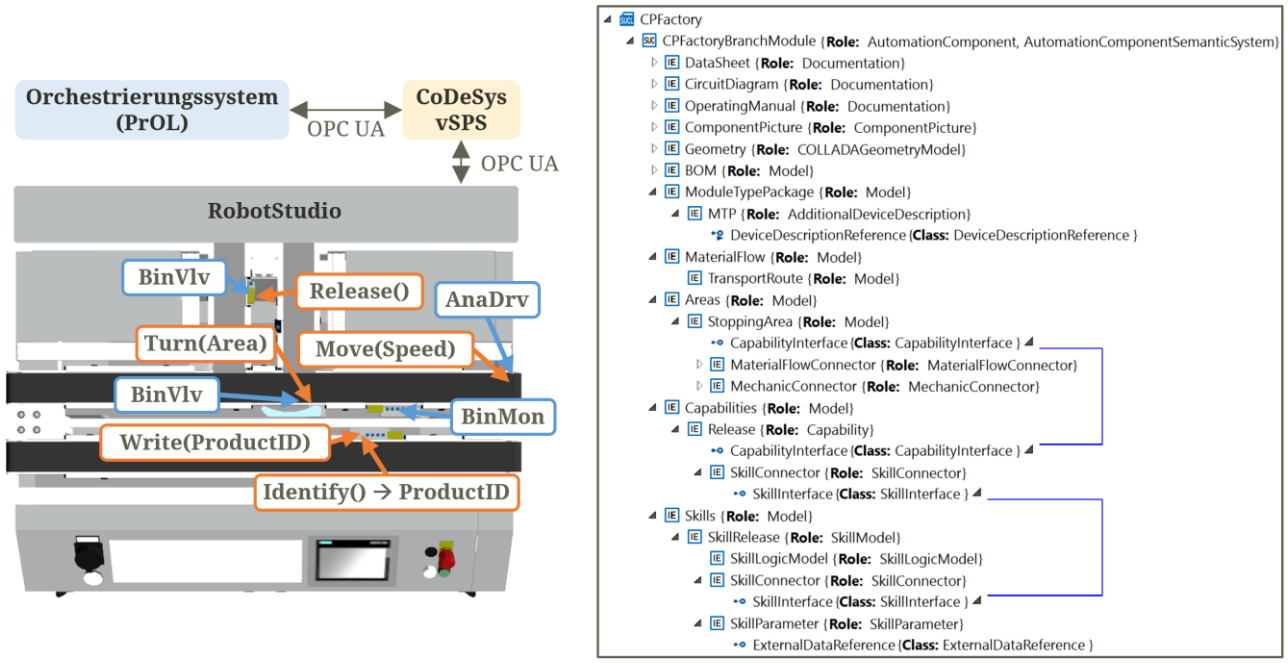


Bild 4: Dienste, Komponenten, Informationsmodell und virtuelle Inbetriebnahme

Die VIBN erfolgt exemplarisch aus dem Zusammenspiel von CoDeSys und RobotStudio (s. Bild 4). Die Module sind in RobotStudio kinematisiert, sodass die I/O-Signale der virtuellen Steuerung von CoDeSys über eine OPC UA Schnittstelle ausgetauscht werden. Die Ausführung der Dienste und Komponenten findet in der virtuellen Steuerung statt. Das bedeutet, dass die virtuelle Steuerung die Daten wie in Kapitel 4.1 beschrieben, für die PrOL bereitstellt. Das kinematisierte Modell ist auch in der Lage, das RFID-System der realen Module vereinfacht abzubilden.

6 Ergebnisse und Ausblick

Der Vergleich der Konzepte und der prototypischen Implementierung mit den Anforderungen an die Steuerungsarchitektur, Informationsmodellierung und VIBN für ein heterogenes Plug & Produce zeigt einen hohen Erfüllungsgrad auf (siehe Tabelle 1), wobei einige Inhalte in der prototypischen Implementierung noch nicht untersucht wurden. Die auf dem MTP basierende dienstbasierte Steuerungsarchitektur (A2) ermöglicht den einheitlichen Zugriff (A1) auf Funktionalitäten in unterschiedlichen Varianten sowohl in Bearbeitungsmodulen als auch in Transportmodulen (A3), die allesamt an ein Orchestrierungssystem direkt gekoppelt sind (A4). Die Interaktion mit einem Orchestrierungssystem ist derzeit nur vereinfacht durch den manuellen Zugriff über OPC UA aufgezeigt. Hierzu gilt es zukünftig die Interaktion in Bezug zur bedarfsorientierten Steuerung (A6) zu überprüfen, und zu ermitteln, inwiefern die asynchrone Übertragung der Parameter zugehörig zu den identifizierten Produkten für die Sicherheit bei einem Kommunikationsabbruch (A7) hierüber realisiert werden kann. Es wird bereits ermöglicht, dass die Module die Produkte identifizieren und dadurch ausgelöst die Produktion

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-SA

starten, jedoch ist die Handhabung mehrerer Produkte in unterschiedlichen Produktkonfigurationen und -zuständen noch zu klären. Das für die automatisierungstechnische Integration relevante herstellerneutrale Informationsmodell (A8) in Form des MTP ist in einem weiterführenden Informationsmodell eingebettet, sodass diese vernetzten Informationen (A9) über die VWS abrufbar sind. Die VWS werden auch für die Anmelde- und Identifikationsmechanismen (A5) eingesetzt, wobei diese nicht in diesem Beitrag behandelt sind. Die VIBN zeigt auf, dass sich die Module sowohl in realer als auch in virtueller Form gleich gegenüber der Orchestrierung verhalten. Die Anwendung der gemischt real-virtuellen Kopplung (A10) ist bereits in [7] angedacht und wird in METHODS weiter untersucht.

Tabelle 1: Erfüllungsgrad der Anforderungen (□ = erfüllt, (□) = teilweise erfüllt, × = nicht erfüllt, - = keine Angabe, * = zu prüfen)

Nr.	Anforderung	CP Factory	MTP	METHODS
A1	Harmonisierte Zugriffsschnittstelle	×	□	□
A2	Dienstbasierte Steuerungsarchitektur	(□)	□	□
A3	Dienstvarianten	×	□	□
A4	Keine Modulhierarchie	×	(□)	□
A5	Anmelde- und Identifikationsmechanismen	×	×	□*
A6	Bedarfsorientierte Steuerung	□	-	□*
A7	Produktion bei Kommunikationsabbruch	×	(□)	(□)*
A8	Einheitliches Informationsmodell	×	□	□
A9	Weiterführende vernetzte Eigenschaften	×	×	(□)
A10	Virtuell-reale Kopplung	-	-	(□)*

Zusammenfassend zeigt der Beitrag auf, dass basierend auf den Konzepten des MTP und der VWS, modulare und heterogene Produktionsanlagen für das Plug & Produce – auch für Forschungs- und Lehrzwecke der Industrie 4.0 – realisiert werden können. Als Demonstrator bietet hierfür die CP Factory eine hervorragende Grundlage für die Konzeption und Umsetzung des erarbeiteten Ansatzes. Darüber hinaus wird die CP Factory laufend weiterentwickelt, sodass die Konzepte der Industrie 4.0 in Plug & Produce Szenarien, Produkten und Lösungen von der Festo Didactic SE umgesetzt werden.

7 Literatur

[1] C. Plehn, „A method for analyzing the impact of changes and their propagation in manufacturing systems," Dissertation, Institut für Maschinenbau, Technische Universität München, München, 2017.

[2] T. Holm, „Aufwandsbewertung im Engineering modularer Prozessanlagen," Dissertation, Institut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2016.

[3] S. Lier und M. Grünewald, „Net Present Value Analysis of Modular Chemical Production Plants," *Chemical Engineering & Technology*, Bd. 34, Nr. 5, S. 809-816, 2011.

[4] J. Höll et al., „Seamless simulation toolchain for virtual engineering and virtual commissioning of smart factories," in *18. Internationales Stuttgarter Symposium*, Stuttgart, März 2018, S. 797-811.

[5] Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie - Allgemeines Konzept und Schnittstellen, VDI 2658-1, 2017.

[6] R. Drath et al., „Die Rolle der Industrie 4.0 „Verwaltungsschale" und des „digitalen Zwillings" im Lebenszyklus einer Anlage," in *Automation 2017*, Baden-Baden, Juni 2017.

[7] G. Hildebrandt, P. Habiger und R. Drath, „Virtual-In-The-Loop-Engineering: A categorisation and terminology for modular plants and interfaces," in *ETFA 2021*, Västerås, Schweden, Sept. 2021.

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

[8] C. Lehnert et al., „A Hierarchical Domain-Specific Language for Cyber-physical Production Systems Integrating Asset Administration Shells," in *ETFA 2021*, Västerås, Schweden, Sept. 2021.

[9] A. Stutz und M. Mauermaier, „Mastering complexity with object-oriented design," *atp edition*, Bd. 60, Nr. 8, S. 34-45, 2018.

[10] S. Grüner et al., „Integration von Module Type Package und Industrie 4.0 Verwaltungsschale," in *Automation 2021*, Baden-Baden, 2021.

[11] AutomationML e.V., „AutomationML Part 6 – AutomationML Component," https://www.automationml.org/download-archive/ (Zugriff am 16.11.2021).

Open Access. © 2022 P. Habiger, G. Hildebrandt, R. Drath, M. Barth, A. Fay, A. Zor und M. Marseu
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Operative Instandhaltung im Zeitalter der Digitalisierung

S. Sade[1], T. Bartsch[2], F. Albers[3], D. Kowalke[4]

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Milling-Waterjet“ an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe wurde ein operatives Instandhaltungswerkzeug entwickelt, welches die nach der DIN 31051 beschriebenen Maßnahmen zur Instandhaltung in digitaler Form abbildet. Das Anwendungsobjekt in diesem Fall ist eine Wasserstrahlschneidanlage. Der vorliegende Beitrag beschreibt das digitale Instandhaltungswerkzeug.

Stichwörter

Diagnose, Digitalisierung, Fehlerbaum, Instandhaltung, Wasserstrahlschneiden

1 Einleitung

Nach der DIN 31051 wird unter Instandhaltung die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objektes verstanden, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dienen, sodass es die geforderte Funktion erfüllt [1].
Der Prozess des Wasserstrahlschneidens ist technologisch anspruchsvoll. Aus diesem Grund bedarf es einer intensiven Instandhaltung. Von regelmäßig anfallenden Wartungsmaßnahmen, bis hin zur außerplanmäßigen Instandsetzung, welche den funktionsfähigen Zustand wiederherstellen, treten diverse Handlungsmaßnahmen im Laufe des Lebenszyklus der Anlage auf.
Um sich Hilfe bei der Umsetzung dieser Maßnahmen zu verschaffen, musste sich der Bediener der Anlage in der Vergangenheit an Handbüchern in Papierform und an seinem Erfahrungswissen bedienen. Weiterhin gab es die Möglichkeit am Erfahrungsschatz von anderen Mitarbeitern teilzuhaben. Damit eine zukunftsorientierte Instandhaltung an der Anlage möglich ist, bei der das Wissen über die Instandhaltung dieser gebündelt wird, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Diagnoseanwendung entwickelt, in der die Technische Hochschule OWL als Pilot-Anwender fungiert [4]. Die Umsetzung erfolgte mit der Software „QuickSteps“ [2].
In Bild 1 wird der Aufbau der Wasserstrahlschneidanlage gezeigt. Dazu wurde die Werkzeugmaschine in Funktionseinheiten hierarchisch gegliedert. Bild 2 veranschaulicht den Hochdruckschneidkopf der Anlage im laufenden Betrieb. Die Instandhaltung des Schneidkopfes hatte für die Entwicklung der Diagnoseanwendung eine besondere Priorität. Näheres dazu wird in Kapitel 3 beschrieben.

1 M. Sc. Sercan Sade, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
2 Prof. Dr.-Ing. Thomas Bartsch, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
3 B. Eng. Franziska Albers, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
4 M. Sc. Dennis Kowalke, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

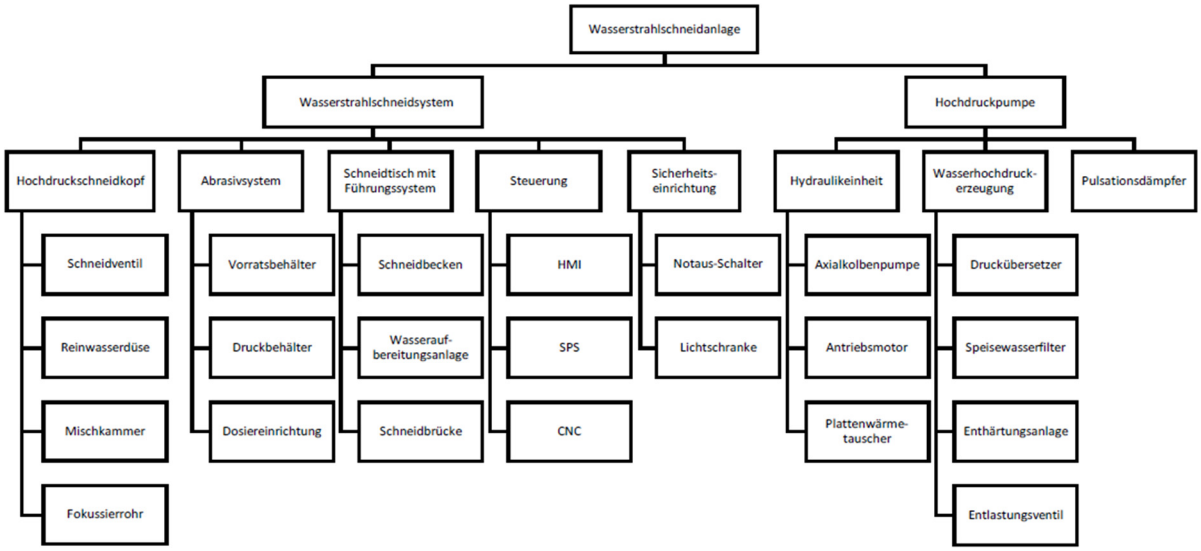


Bild 1: Aufbau der Wasserstrahlschneidanlage

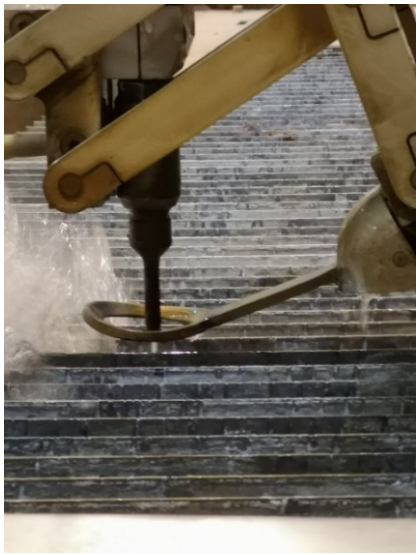


Bild 2: Hochdruckschneidkopf der Wasserstrahlschneidanlage im Betrieb

2 Instandhaltung

Um ein tieferes Verständnis dem digitalen Diagnosetool gegenüber zu erzeugen, wird im Vorfeld ein kleiner Einblick in die Grundlagen der Instandhaltung gegeben.
Die DIN 31051 unterteilt die Instandhaltung in drei Grundmaßnahmen. Diese sind: Wartung, Inspektion und Instandsetzung. Sie dienen dazu einen maximal wirtschaftlichen Betrieb der Anlage zu gewährleisten, indem Störungen und Ausfälle vermieden werden. Eine wichtige Kennzahl bei Maschinen hierfür ist der Abnutzungsvorrat [1].

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Bild 3 zeigt schematisch den idealen zeitlichen Verlauf des Abnutzungsvorrates einer Anlage.

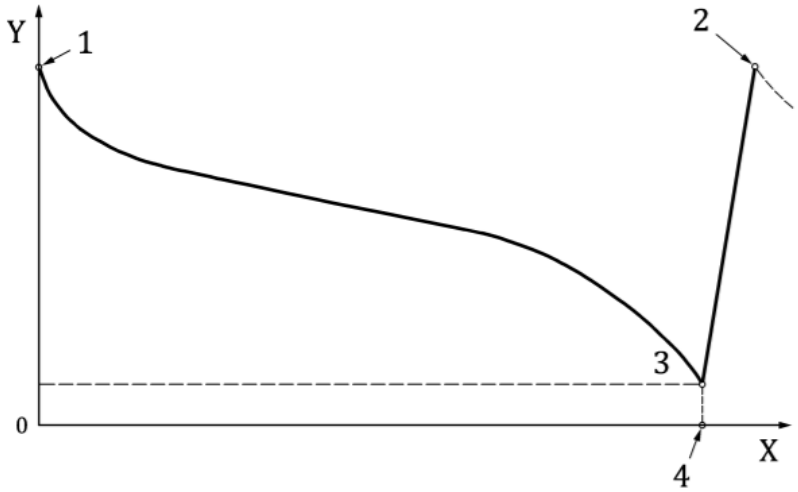


Bild 3: Idealer Verlauf Abnutzungsvorrat [1]

An der Abszisse steht die Zeit X, während die Ordinate den Abnutzungsvorrat Y darstellt. Zum Zeitpunkt X = 0 befindet sich der Abnutzungsvorrat Y bei 1. Dies bedeutet eine vollumfängliche Funktionserfüllung ist gewährleistet. Im Laufe der Zeit nimmt der Abnutzungsvorrat ab, bis die Abnutzungsgrenze bei Punkt 3 erreicht ist und es zum Ausfall bei Punkt 4 kommt. Durch fristgerechte **Wartung** wird das Erreichen der Abnutzungsgrenze verzögert. Die **Inspektion** dient zur Begutachtung des Istzustandes der Anlage. Diese kann zum Zeitpunkt des Erreichens der Abnutzungsgrenze erfolgen. Es ist jedoch empfehlenswert die Inspektion in regelmäßigen Abständen vor Erreichen dieser Grenze durchzuführen, um einen Ausfall zu vermeiden. Um die Anlage nach dem Ausfall wieder in den funktionsfähigen Zustand bei Punkt 2 zu überführen, bedarf es einer **Instandsetzung** [1], [5].
Zusammenfassend ergibt sich eine ideale Abnutzung einer Anlage durch eine möglichst lange Abnutzungszeit und einer kurzen Instandsetzungszeit, um die Funktion der Anlage wiederherzustellen. Dieser ideale Verlauf wurde durch die Entwicklung des Diagnosetools der Wasserstrahlschneidanlage angestrebt. Es wurden Werkzeuge und Methoden verwendet, welche den herkömmlichen Instandhaltungsverfahren durch digitale Unterstützung vorauseilen und die erforderliche kurze Instandsetzungszeit fördern. Diese werden im nächsten Kapitel vorgestellt.

3 Diagnosetool

Dieses Kapitel bildet den Hauptteil des Beitrages. Es beinhaltet eine Beschreibung des Diagnosetools und konkrete Beispiele. Hierfür wird die digitale Instandhaltung am eingangs erwähnten Hochdruckschneidkopf und an der Hochdruckpumpe der Anlage veranschaulicht.
Für die Umsetzung wurde die Modellierungssoftware „QuickSteps“ genutzt [2]. QuickSteps stellt eine softwarebasierte Methode zur Störfalldiagnose, -behebung und Erfahrungsrückgewinnung in Fertigungsprozessen dar. Die Software besteht aus zwei Teilen: Das Modellierungssystem und das Fehlerdiagnosesystem. Das Modellierungssystem wird verwendet, um Projekte in QuickSteps zu erstellen und zu bearbeiten. Das Fehlerdiagnosesystem dient zur Störfallbestimmung und zur Ausgabe von entsprechenden Handlungsanweisungen [2].
Es existieren also zwei Schnittstellen zwischen Mensch und Diagnosetool. Zum einen zu der Modellieroberfläche und zum anderen in das Fehlerdiagnosesystem, welches zur operativen Instandhaltung an der Anlage genutzt wird. Beide Schnittstellen werden im Folgenden näher erläutert.

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3.1 Modellierungssystem

Im Modellierungssystem wurde zunächst das digitale Instandhaltungstool entwickelt. Es wurden alle bekannten in Betracht kommenden Handlungsmaßnahmen digital erfasst und in einer Baumstruktur (Abb. 4) abgebildet. Die einzelnen Elemente enthalten Seiten, bei denen dem Bediener der Wasserstrahlschneidanlage unterstützende Anweisungen gegeben werden. Die Quellen für die Anweisungen stammen zu einem Teil aus den Handbüchern des Herstellers und wurden zum anderen Teil um das Erfahrungswissen von Mitarbeitern ergänzt. Bild 4 zeigt die Baumstruktur der Diagnoseanwendung. Die Instandhaltungsmaßnahmen und unterstützenden Anweisungen sind Gegenstand des Fehlerdiagnosesystems.

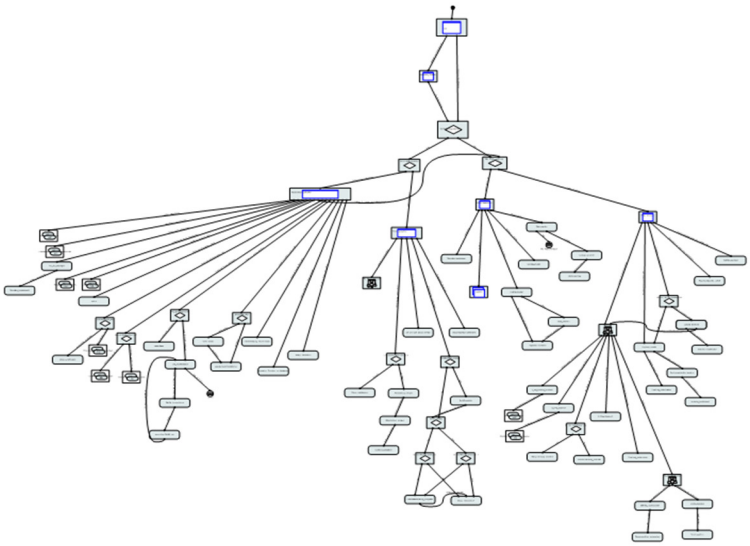


Bild 4: Baumstruktur des Modellierungssystems

In Bild 5 wird ein Einblick in die Entstehung der Baumstruktur und in einige wichtige Kernelemente des Anwendungsprogrammes gegeben.

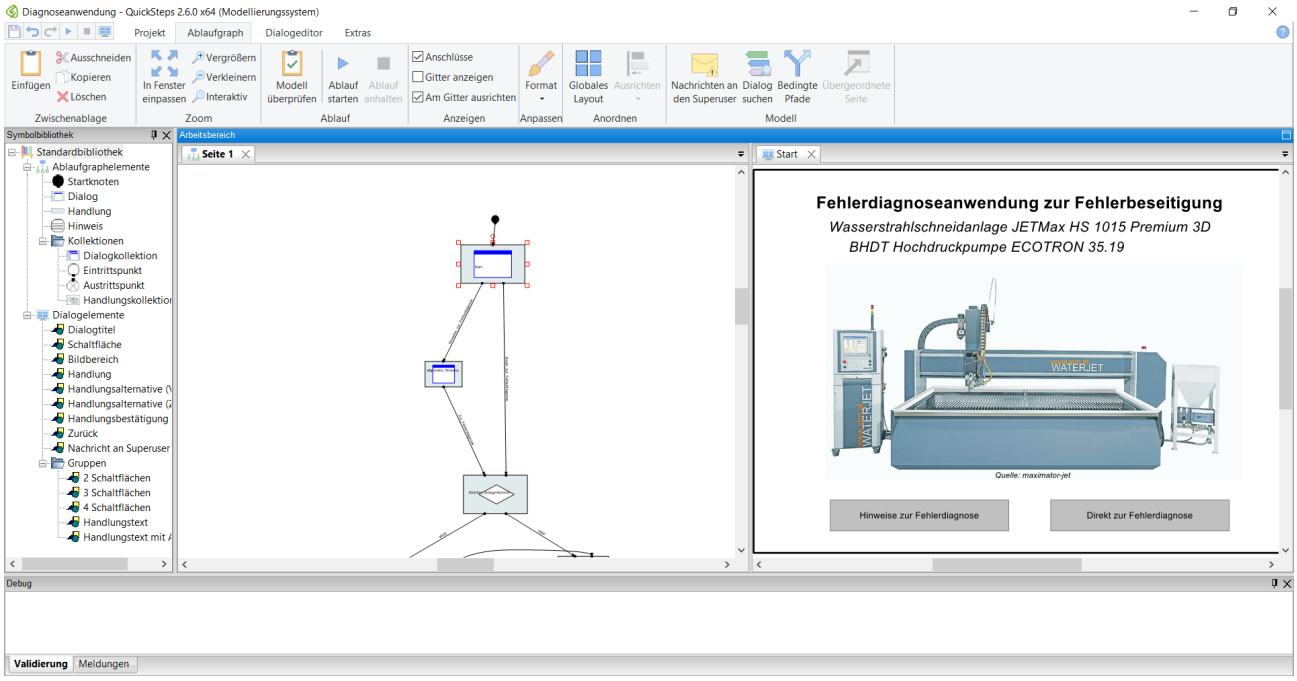


Bild 5: Modellieroberfläche QuickSteps

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

In der Modellierungsoberfläche existieren zwei Fenster. In dem ersten entwickelt der Anwender die Baumstruktur (links in Bild 5). Das zweite Fenster (rechts in Bild 5) wird mit Information und Erfahrungswissen angereichert, welches das Fehlerdiagnosesystem bildet und an der Anlage zum Einsatz kommt.
Jedes QuickSteps-Modell beginnt mit einem Startknoten. Dieser ist als schwarzer Punkt in Bild 5 dargestellt. Auf diesen folgt der wichtigste Baustein in der Modellierungsumgebung, der Dialogbaustein. Der erste Dialogbaustein wird auch Einstiegsdialog genannt. Die Modellierung des Einstiegsdialoges wird in Bild 5 veranschaulicht. Bei diesem wird dem Instandhalter zunächst eine Einführung in das digitale Instandhaltungswerkzeug geboten. Über die zwei grauen Schaltflächen hat dieser die Möglichkeit die nächsten Schritte einzuleiten.
Das Diagnosetool wurde so aufgebaut, dass es dem Instandhalter der Wasserstrahlschneidanlage für Maßnahmen der Wartung, Inspektion und Instandsetzung unterstützend zur Verfügung steht. In Bild 6 wird die Entstehung der Baumstruktur verdeutlicht. Von dem Dialogbaustein „Fehlerursache benennen“ führen mehrere Kanten zu den Blättern des Baums. Die Blätter des Baums bilden die letzte Instanz der Baumstruktur. Sie beinhalten in diesem Fall die konkreten Handlungsanweisungen zur Fehlerbeseitigung [3].

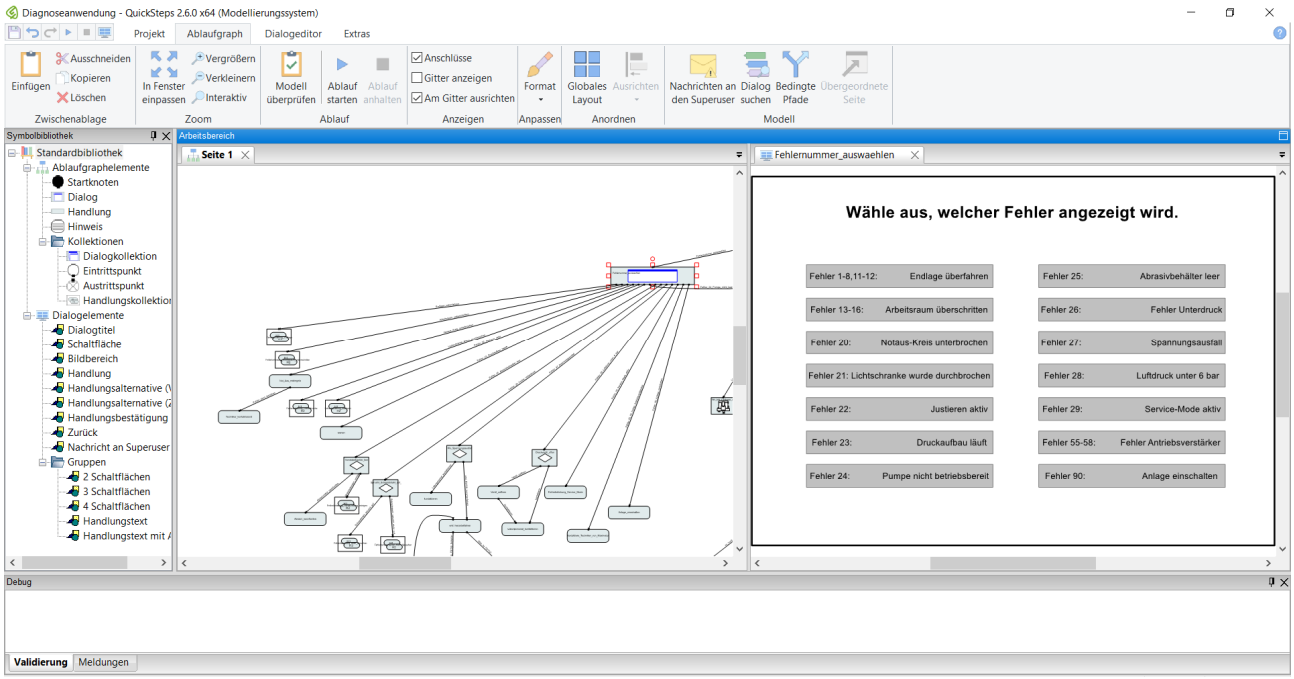


Bild 6: Fehlerbehebung von angezeigten Fehlern

Ein Teil der Diagnoseanwendung setzt sich mit der Behebung von Fehlern auseinander, die am Bedienerterminal der Wasserstrahlschneidanlage angezeigt werden. Der Anlagenbediener hat so die Möglichkeit gezielt seinen Fehler auszuwählen und wird je nach ausgewählter Schaltfläche zu entsprechenden Handlungsmaßnahmen, die zur Entstörung dienen, weitergeleitet.
Bei einigen Schaltflächen wird der Anlagenbediener durch sogenannte Dialogkollektionen geleitet. Der Unterschied zum bereits erwähnten Dialog besteht darin, dass die Dialogkollektion mehrere Dialoge beinhaltet. Eine Fehlernummer öffnet beispielsweise eine Dialogkollektion, welche mehrere Handlungsanweisungen enthält, die sequentiell abgearbeitet werden, um den funktionsfähigen Zustand der Anlage wiederherzustellen. Diese Methode wurde genutzt, um die Baumstruktur aus Bild 4 übersichtlich zu gestalten.

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3.2 Fehlerdiagnosesystem

Während sich das Modellierungssystem als sehr entwicklerorientiert herausgestellt hat, bildet das Fehlerdiagnosesystem die Komponente, welche für den Bediener und Instandhalter bei der operativen Tätigkeit an der Anlage wichtig ist. Es wird idealerweise auf einer grafischen Oberfläche (GUI) direkt an der Maschine bereitgestellt. In Bild 7 wird der vom Entwickler modellierte Einstiegsdialog aus der Fehlerdiagnosesicht gezeigt.

Bild 7: Einstiegsdialog Diagnoseanwendung

Es wird erkennbar, dass das Fehlerdiagnosesystem einen anderen Schwerpunkt hinsichtlich der Funktionalität hat. Die Oberfläche bietet dem Anwender die Möglichkeit über die Schaltflächen von der Fehlerursache bis hin zur Störungsbeseitigung digital unterstützt zu werden. Außerdem besteht die Option Störfälle statistisch zu Qualitätssicherungszwecken zu erfassen und auszuwerten.
Im Rahmen der Entwicklung der Diagnoseanwendung wurden auch Methoden und Werkzeuge verwendet, welche dem Bediener bei komplexen Instandhaltungsaufgaben unterstützen. Eines davon ist der sogenannte Bilddialog. Ein Beispiel aus der Diagnoseanwendung wird in Bild 8 gezeigt.

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

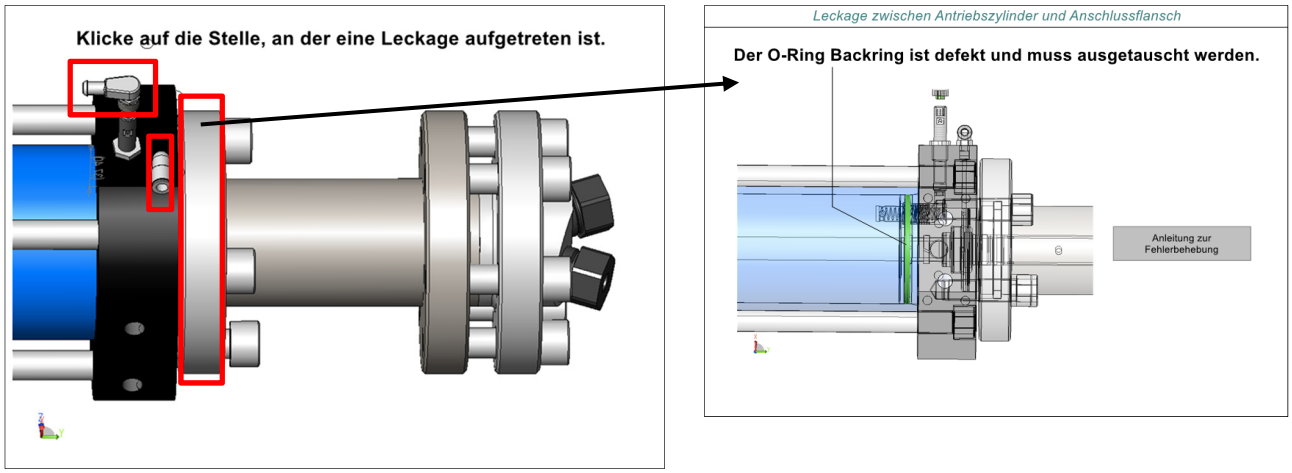


Bild 8: Bilddialog zur Leckagebehebung

Im Vergleich zu einer Dialogkollektion beinhaltet der Bilddialog keine Schaltflächen, die den Instandhalter zu den durchzuführenden Maßnahmen führen. Diese erscheinen erst, sobald er mit seiner Hand die jeweilige Stelle im Bilddialog berührt. Bild 8 zeigt die Hochdruckpumpe der Wasserstrahlschneidanlage. Die Pumpe ist anfällig für diverse Leckagen an den Anschlüssen oder Flanschen. Die möglichen Leckagestellen sind rot umrandet, sodass dem Bediener der Diagnoseanwendung direkt übersichtlich dargestellt wird, welche anwählbar sind. Je nach getroffener Wahl folgen entsprechende Handlungsanweisungen.
In Bild 9 wird eine weitere Methode gezeigt, die zur effizienten Instandhaltung befähigt. Es handelt sich hierbei um die Demontage des Hochdruckschneidkopfes, die in regelmäßigen Abständen zu Wartungszwecken erforderlich ist. Um eine Gewindeschädigung des Schneidkopfes zu vermeiden, wurde die Demontage auf einem Video aufgezeichnet, welches sich öffnet, wenn die entsprechende Schaltfläche angewählt wird.
So hat der Monteur die Möglichkeit direkt an der Anlage den Demontageprozess vorher anzuschauen, um so kritische Montagefehler zu umgehen.

Bild 9: Demontage Hochdruckschneidkopf

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Fazit

Mit der Diagnoseanwendung ist es gelungen, ein digitales interaktives Instandhaltungstool zu entwickeln, welches den Instandhaltungsprozess der Wasserstrahlschneidanlage verbessert hat. Durch die schnelle Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von konkreten Handlungsmaßnahmen wird ein gesunkener Abnutzungsvorrat der Wasserstrahlschneidanlage zügig wiederhergestellt.
Das Tool bietet eine umfangreiche Unterstützung für Personen, die an der technischen Anlage Instandhaltungsmaßnahmen durchführen. Es leitet ebenfalls dazu an, auftretende Fehler zu ungünstigen Zeitpunkten, wie z. B. an Wochenenden oder Feiertagen, ohne die Hilfe einer Fachkraft zu beheben und den funktionsfähigen Zustand der Anlage wiederherzustellen.
Einen weiteren großen Mehrwert, den die Diagnoseanwendung bietet ist, dass sie nicht nur im operativen Geschäft nutzbar ist, sondern auch für strategische Qualitätsverbesserung geeignet ist [4]. Durch die Auswertung der Störfälle ist es möglich, häufig auftretende Fehler genauer zu analysieren und situationsabhängige Verbesserungspotenziale abzuleiten.

5 Förderhinweis

Das Forschungsprojekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

6 Literatur

[1] DIN 31051. Grundlagen der Instandhaltung (Juni 2019).
[2] Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V. (GFaI) (2020). QuickSteps Dokumentation. Berlin.
[3] URL: https://www.itwissen.info/Baumstruktur-tree-structure.html (abgerufen am 05.12.2021).
[4] DIN EN ISO 9001. Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (November 2015).
[5] Reichel, J., Müller, G. & Mandelartz, J. (2009). Betriebliche Instandhaltung. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Open Access. © 2022 S. Sade, T. Bartsch, F. Albers, D. Kowalke
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03-11.03.2022

Konzept zur Automatisierung der Konfiguration einer virtuellen Inbetriebnahme

T. Neuner[1], M. Brela[2]

Zusammenfassung

Laut VDMA gewinnt die virtuelle Inbetriebnahme als umsetzungsnaher Teil der Digitalisierung im Maschinen- und Anlagenbau in allen Branchenzweigen an Bedeutung. Um die Fehlerfreiheit eines Steuerungsprogramms gewährleisten zu können, gibt es aktuell verschiedene Ansätze zur automatisierten virtuellen Inbetriebnahme. Hierbei werden definierte Testszenarien von einer Test-Applikation autonom, ohne ein Eingreifen des Testpersonals, durchgeführt. Die Herausforderung der automatisierten virtuellen Inbetriebnahme besteht in der manuellen Konfiguration der Testszenarien, die zeit- und kostenintensiv ist. Darüber hinaus ergeben sich durch die manuelle Implementierung zusätzliche Fehlerpotentiale. Diese Arbeit untersucht, wie die Konfiguration der Testszenarien automatisiert werden kann. Dabei sollen die Testszenarien direkt aus dem Steuerungsprogramm oder weiteren Engineering-Werkzeugen, wie Elektrokonstruktionen oder CAD-Pläne, abgeleitet werden. Außerdem werden Normen, wie beispielsweise die EG-Maschinenrichtlinie, berücksichtigt.

Stichwörter

Virtuelle Inbetriebnahme, Testautomatisierung, Konfigurator

1 Virtuelle Inbetriebnahme

ISG-Stuttgart beschreibt die virtuelle Inbetriebnahme als eine Simulationsmethode, mit welcher alle Anlagenfunktionalitäten anhand eines Simulationsmodells, oder unter Verwendung eines digitalen Zwillings, virtuell getestet werden können. Dabei werden Prozesszustände durch die Simulation generiert und die Reaktion des Steuerungsprogramms auf die vordefinierten Testszenarien geprüft. Durch die Simulationsmodelle wird ermöglicht, verschiedene Steuerfunktionalitäten bereits parallel zur Engineering-Phase zu testen, ohne dass eine Hardware bereits vorhanden ist. Somit können Planungs- und Softwarefehler sowie Optimierungspotentiale frühzeitig im Projektverlauf erkannt werden [1]. Je später solche Fehler im Projektverlauf lokalisiert werden, desto größer wird der Aufwand bei der Fehlerbeseitigung. Mit Hilfe der virtuellen Inbetriebnahme soll somit insgesamt der Aufwand der Inbetriebnahme an der realen Anlage reduziert werden [2].
Bei der automatisierten virtuellen Inbetriebnahme werden die Testszenarien manuell programmiert oder modelliert und anschließend automatisiert abgearbeitet. Des Weiteren wird zur Dokumentation ein Testprotokoll angelegt [3], [4], [5]. Allerdings ist der manuelle Entwurfsprozess zeitaufwändig und fehleranfällig [6].

1 B. Eng. T. Neuner
2 Prof. Dr. M. Brela

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2 Handlungsbedarf

Derzeit finden sich keine Konzepte oder Werkzeuge, den Konfigurationsprozess der Testszenarien zu automatisieren. Zu diesen Testszenarien gehören u. a. Softwaretests, wie z. B. Kommunikationstests, Tests der Meldefunktionen, Überprüfung des Fehlerhandlings, Tests der Sicherheitsfunktionen oder der Prozessabläufe. Im Rahmen dieser Arbeit wurden softwaretechnische Möglichkeiten einer intelligenten Generierung der Testszenarien aus projektspezifischen Dokumenten, wie beispielsweise Steuerungsprogrammen, CAD-Zeichnungen oder Elektropläne, untersucht.

Zur Konfiguration der virtuellen Inbetriebnahme wird auf eine Bibliothek mit vordefinierten Testszenarien und Simulationsbausteinen zurückgegriffen, welche auf Basis von Projektinformationen eigenständig ausgewählt und zu einem Testprogramm zusammengesetzt werden. Dabei werden weitere Testanforderungen, wie beispielsweise die Dokumentation der Testergebnisse, integriert. Die Einbindung eines Konfigurators in den Prozess zur virtuellen Inbetriebnahme ist in folgender Grafik dargestellt.

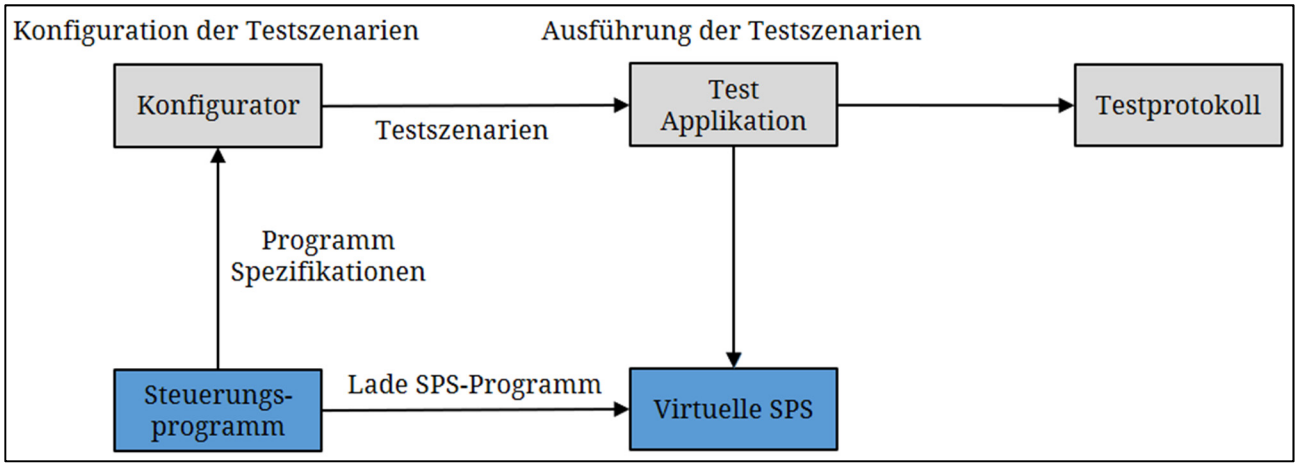


Bild 1: Einbindung eines Konfigurators in den Prozess der virtuellen Inbetriebnahme

Ziel der Studie war es, Konzepte zu entwickeln, um u. a. aus dem Steuerungsprogramm automatisiert Informationen zur Generierung einer Test-Applikation auszulesen. Dabei war die Herausforderung, dass sich sowohl die Semantik, die Syntax als auch die Programmstruktur der Steuerungsprogramme untereinander stark unterscheiden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Unternehmen unterschiedliche interne Standards bzw. Programmierrichtlinien verwenden und es unterschiedliche Hersteller für Steuerungs- und Engineering-Systeme am Markt gibt, welche wiederum Normen, wie die DIN EN 61131, individuell umsetzen.

Durch die Anwendung eines Konfigurators zur virtuellen Inbetriebnahme können die Vorteile einer Testautomatisierung auf die automatisierte virtuelle Inbetriebnahme übertragen werden. Steirer beschreibt u. a. folgende Vorteile der Testautomatisierung im Buch Basiswissen Testautomatisierung:

- Reduktion der Programmierdauer der Testszenarien
- Reduktion des Fehlerpotentials der Testszenarien
- Wiederverwendbarkeit bereits generierter Testszenarien
- Steigerung der Testeffizienz (schnellere virtuelle Inbetriebnahme)
- Reduktion projektspezifischer Kosten
- Automatisierte Testdokumentation

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3 Konfigurator zur automatisierten virtuellen Inbetriebnahme

Prinzipiell muss zur Konfiguration von Testszenarien die Programmstruktur automatisiert erfasst werden. Außerdem müssen Variablendeklarationen, Schnittstellen, Aufrufsystematiken, usw. ausgelesen und in eine zweite Projektstruktur überführt werden, welche anschließend als Vorlage für eine Test-Applikation dient. Durch den Konfigurator wird die Test-Applikation anschließend mit anwendungsspezifischen, vordefinierten Testszenarien angereichert. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Konzepte untersucht.

3.1 Funktionsanalyse durch PLCopenXML

Zum Datenaustausch zwischen Steuerungsprogramm und Konfigurator wurde der Standard PLCopenXML ausgewählt, welcher auf dem textbasierten XML-Format beruht. Der Grund für diese Entscheidung war, dass PLCopenXML die Möglichkeit bietet, Daten eines Steuerungsprogramms zwischen unterschiedlichen Programmierumgebungen einfach auszutauschen [8]. Das generierte PLCopenXML-Dokument enthält allerdings Informationen, die zur Konfiguration der Testszenarien nicht benötigt werden. Neben dem Programmcode werden beispielsweise verwendete Bibliotheken und Visualisierungsinformationen im XML-Dokument abgelegt. Dies hat ein umfangreiches Dokument mit einer großen Anzahl an Knoten zur Folge, was anschließend die Navigation durch das Dokument zur Extraktion der Programmfunktionalitäten erschwert. Weiterhin müssen zur Navigation durch das XML-Dokument alle Knoten, in welchen die Programminformationen gespeichert werden, vorab bekannt sein. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein weiteres Konzept untersucht, um eine Programmanalyse auch ohne Vorkenntnisse der Programmstruktur durchführen zu können.

3.2 Analyse der Speicherablage des Steuerungsprogramms

Zum Datenaustausch zwischen Steuerungsprogramm und Konfigurator wurde in diesem Konzept das gezielte Zugreifen auf Dateien in der Speicherablage der Projektmappe des Steuerungsprogramms untersucht. Der Aufbau der Projektmappen basiert häufig auf einer Ordnerstruktur, welche u. a. Bibliotheken, Referenzen, Programmbausteine und Visualisierungselemente enthält. Dieser Aufbau findet sich bei den führenden Herstellern für Steuerungstechnik wieder.

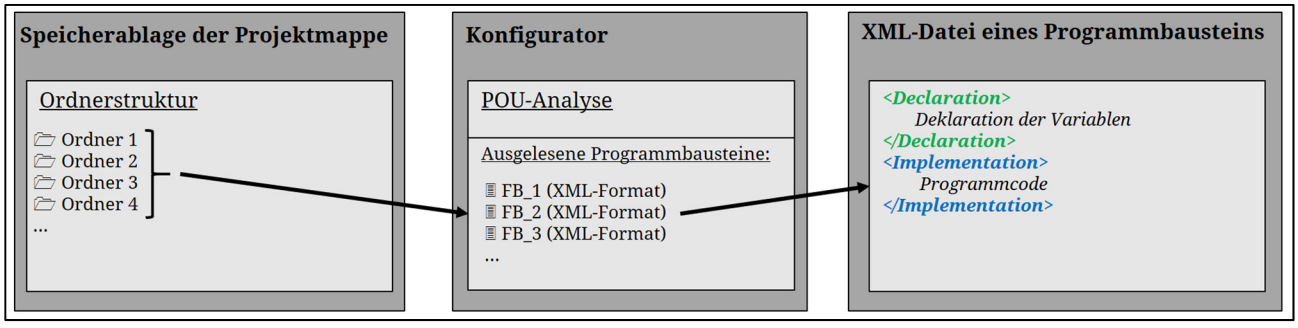


Bild 2: Aufbau der Ordnerstruktur eines Steuerungsprogramms

Der Aufbau der Ordnerstruktur eines Steuerungsprogramms ist in Bild 2 dargestellt. Anders als im PLCopenXML-Format werden hier nicht alle Projektdaten in einem XML-Dokument zusammengefasst, sondern auf mehrere Unterverzeichnisse verteilt. Deshalb werden die einzelnen Ordner der Projektmappe vom Konfigurator automatisiert durchsucht, um die im Steuerungsprogramm verwendeten Programmorganisationseinheiten (POUs) bzw. Programmbausteine zu identifizieren. Viele Steue-

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

rungshersteller, insbesondere jene mit hohem Marktanteil, greifen zum Abspeichern der Programmbausteine auf ein XML-Format zurück. Die Analyse dieser XML-Dokumente zeigt, dass der Aufbau des XML-Dokuments unabhängig von dem darin implementierten Programmcode identisch bleibt. Dies erleichtert die Navigation eines Textparsers durch das XML-Dokument. In Bild 2 sind die XML-Knoten grün und blau hinterlegt, welche zur Konfiguration einer Test-Applikation von Bedeutung sind. Im Knoten <*Declaration*> werden die Variablendeklarationen hinterlegt, welche direkt im Programmbaustein deklariert werden. Im Knoten <*Implementation*> wird der gesamte Programmcode abgespeichert, welcher letztendlich die programmspezifischen Funktionalitäten des Steuerungsprogramms definiert. Durch das gezielte Zugreifen auf den Inhalt der beschriebenen XML-Knoten können somit Variablendeklarationen sowie Programmfunktionalitäten des Programmbausteins automatisiert identifiziert werden. Aus diesen Informationen kann anschließend die Test-Applikation zur virtuellen Inbetriebnahme konfiguriert werden. Somit bietet die Analyse der Unterverzeichnisse eines Projektes eine bessere Möglichkeit die Informationen zur virtuellen Inbetriebnahme zu erfassen, als die Analyse eines PLCopenXML-Dokuments. Die Analysen zur Konfiguration einer Test-Applikation werden im Folgenden genauer beschrieben.

3.2.1 Analyse der Variablendeklaration

Zur Analyse der im Steuerungsprogramm verwendeten Variablen ist der Deklarationsbereich der Programmbausteine zu betrachten. Eine Variablendeklaration definiert die Eigenschaften einer Variable innerhalb des Steuerungsprogramms. Hierbei wird u. a. die Variablenbezeichnung, physikalische Adresse, Schnittstelleneigenschaften, der Datentyp und Kommentare zur Beschreibung der Variable festgelegt. Durch den Konfigurator müssen diese Variableneigenschaften identifiziert und in die Test-Applikation übertragen werden, um die Grundlage einer Schnittstelle zum Steuerungsprogramm zu schaffen. Ein beispielhafter Analyseprozess sowie die Bearbeitung der Variablen zur Implementierung in die Test-Applikation ist in Bild 3 dargestellt.

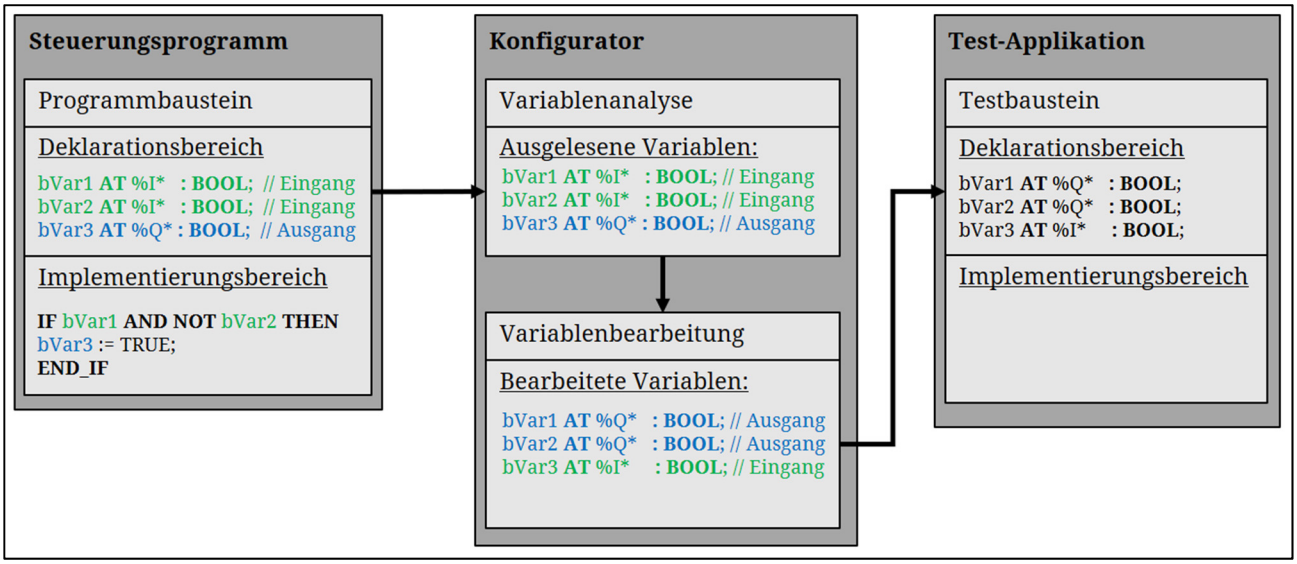


Bild 3: Analyse und Bearbeitung der Variablendeklarationen

Prinzipiell müssen Ausgangssignale einer Steuerung von einer Testanwendung eingelesen und ausgewertet werden. Dazu gehören Diagnosemeldungen der Anlage, Prozessinformationen, Ansteuerungen von Feldgeräten, etc. Eingangssignale der Steuerung hingegen müssen von der Test-Applikation erzeugt und von dieser ausgegeben werden. Dazu gehören Rückmeldungen von Feldgeräten, Störmel-

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

dungen, Sensordaten, etc. Der Konfigurator liest daher zuerst die Variablendeklarationen der Programmbausteine ein. Anschließend werden, wie in Bild 3 dargestellt, alle Eingangsvariablen des Steuerungsprogramms in Ausgangsvariablen umgewandelt und alle Ausgangsvariablen in Eingangsvariablen, um ein Spiegelbild des Prozessabbilds des Steuerungsprogramms zu erhalten. Abschließend werden die Variablendeklarationen in den Programmbaustein einer Test-Applikation geschrieben, welcher letztendlich die Testszenarien abarbeitet.

3.2.2 Analyse zur Generierung der Testszenarien

Die Variablendeklaration beinhaltet die Schnittstelleninformation und der Implementierungsbereich die Information über die Programmfunktionalität. Die Herausforderung besteht nun darin, aus weitestgehend freiformulierten Programmen die Funktionalität einer Test-Applikation abzuleiten, da für eine Programmfunktion mehrere Varianten der Implementierung bestehen. Beispielsweise kann die IF-Bedingung im Implementierungsbereich des Steuerungsprogramms in Bild 4 ebenfalls durch eine SWITCH-CASE-Struktur programmiert werden. Eine Möglichkeit zur Ableitung von Testszenarien bietet die Identifikation von grundlegenden Ausführungsstrukturen wie WENN-DANN oder SWITCH-CASE-Strukturen, logischer Operatoren oder Schleifen. Diese haben immer den gleichen Aufbau. Hierbei müssen Bedingungen erfüllt werden, welche in einer Ausführungsanweisung münden. Daraus lassen sich bereits Testfunktionalitäten ableiten. Des Weiteren können Testszenarien unter Verwendung von Kommentaren bei der Programmentwicklung definiert werden. Optional kann eine Kombination beider Ansätze umgesetzt werden. Aufgrund des umfangreichen Programmieraufwands der Analyse aller Ausführungsstrukturen im Programmcode, wird im Folgenden der Ansatz der Kommentarzeilen während der Programmentwicklung verfolgt. Der Vorteil hierbei ist, dass die Testbedingungen durch definierte Schlüsselwörter in den Kommentarzeilen repräsentiert und durch den Konfigurator identifiziert werden können. Allerdings wird hier ein zusätzlicher Programmieraufwand bei der Erstellung des Steuerungsprogramms ersichtlich. Die Kommentare müssen die wesentlichen Informationen der Testszenarien beinhalten. Grundlegend sind Testszenarien durch eine Testbedingung, wie z. B. logische Verknüpfungen von Variablen oder Eingangssignalen und einem Testergebnis, also den Zustand von Ausgangsvariablen des Steuerungsprogramms, definiert [9]. Ein Beispiel solcher Kommentarzeilen ist im Implementierungsbereich des Steuerungsprogramms in Bild 4 abgebildet.

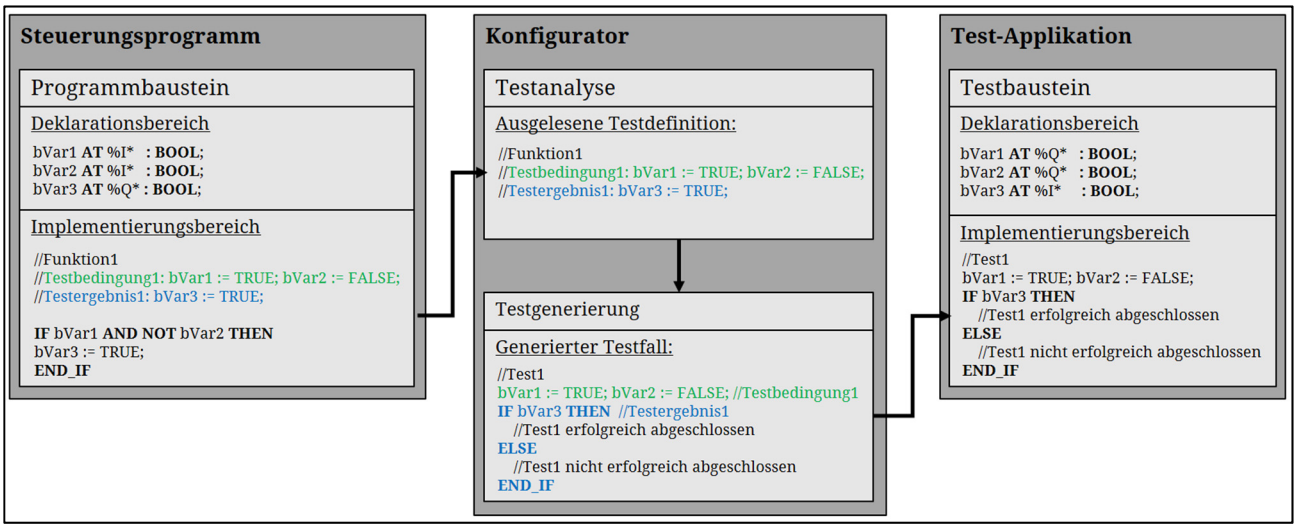


Bild 4: Analyse des Implementierungsbereichs und Generierung der Testfälle

Durch den Kommentar *//Testbedingung1* wird dem Konfigurator signalisiert, dass in dieser Codezeile die Testbedingung des ersten Funktionstests definiert ist. Der Kommentar *// Testergebnis1* signalisiert

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

das erwartete Testergebnis des ersten Tests. Durch das Auslesen dieser Codezeilen durch den Konfigurator kann der Testfall abgeleitet werden. Zu Beginn des Tests wird die Testbedingung implementiert, also die Eingangsvariablen des Steuerungsprogramms beschrieben. Anschließend wird abgefragt, ob das erwartete Testergebnis erfüllt ist. Dies wird in Form einer IF-Abfrage durchgeführt. Der durch den Konfigurator definierte Testcode wird anschließend in den Implementierungsbereich der Test-Applikation überführt.

3.3 Abarbeitung der Testszenarien

Nachdem die Testszenarien vom Konfigurator erzeugt wurden, müssen diese anschließend automatisiert abgearbeitet werden. Hierfür eignet sich u. a. eine Schrittkette im Testbaustein der Testapplikation. Demzufolge fügt der Konfigurator den generierten Testcode in den entsprechenden Testschritt der Schrittkette ein. Die Reihenfolge der Testszenarien kann entweder durch die Reihenfolge der Funktionalitäten im Steuerungsprogramm, durch Priorisierung gewisser Operatoren oder durch das Einfügen der Testnummern innerhalb von Kommentarzeilen festgelegt werden. Neben der Abarbeitung der Testschritte sind weitere Dokumentationsaufgaben während der Testdurchführung zu berücksichtigen. Hierfür wird ein weiterer Programmbaustein in der Test-Applikation entwickelt. Dieser trägt alle Testergebnisse, wie z. B. Erfolg der Testdurchführung, Reaktionszeit oder allgemeine Informationen zur Testdurchführung, wie Datum, Uhrzeit, etc., zusammen und schreibt diese in ein Prüfprotokoll. Dieses kann beispielsweise in Form eines CSV-Dokuments exportiert werden. Ein Beispiel einer Schrittkette ist im Implementierungsbereich des Testbausteins in Bild 5 dargestellt. Der Programmbaustein mit der Bezeichnung *fb_Doku* wird immer nach der Testüberprüfung aufgerufen. Mit einer Eingangsvariable *bTestKorr* wird dem Baustein mit einem *TRUE*-Wert ein erfolgreicher Test signalisiert, während ein *FALSE*-Wert ein fehlerhaftes Testergebnis bedeutet. Somit erstellt der Baustein ein CSV-Dokument, welches die Testergebnisse beinhaltet. Nach Abschluss des Tests und der Testdokumentation wird in den nächsten Testschritt gewechselt.

Test-Applikation

Testbaustein

Deklarationsbereich

```
bVar1 AT %Q*   : BOOL;
bVar2 AT %Q*   : BOOL;
bVar3 AT %I*   : BOOL;
```

Implementierungsbereich

```
//Schrittkette
Test1:
        bVar1 := TRUE; bVar2 := FALSE;
        IF bVar3 THEN
           //Test1 erfolgreich abgeschlossen
           fb_Doku(bTestKorr := TRUE);
        ELSE
           //Test1 nicht erfolgreich abgeschlossen
           fb_Doku(bTestKorr := FALSE);
        END_IF
Test2:
        ...
Test3:
        ...
```

Bild 5: Abarbeitung der Testszenarien in der Test-Applikation

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3.4 Simulation von Instanzen des Steuerungsprogramms

Nach der Definition der Abarbeitung der Testszenarien kann die Test-Applikation bereits an einer realen Anlage angewendet werden. Allerdings ist bei einer virtuellen Inbetriebnahme noch keine Hardware vorhanden, welche Signale an das Steuerungsprogramm liefert. Deshalb müssen diese Signale von Simulationsbausteinen in der Test-Applikation generiert werden. In einem Simulationsbaustein muss die Verhaltensweise eines Feldgeräts und die Reaktionen auf bestimmte Eingangssignale softwaretechnisch umgesetzt werden. Bislang finden sich keine Konzepte und Untersuchungen, aus Steuerungsprogrammen Simulationsbausteine autonom abzuleiten. Dies wird daher als Ausblick erachtet. Jedoch lassen sich wiederkehrende Steuerungskomponenten und deren Funktionalität in Bibliotheken anlegen, die nach erstmaliger Generierung zukünftigen Projekten zur Verfügung gestellt werden. Diese können wiederum autonom vom Konfigurator genutzt werden. Zur Analyse, welche Simulationsbausteine zum Testen eines Steuerungsprogramms benötigt werden, werden vergleichbar mit der Analyse zur Generierung der Testszenarien in Abschnitt 3.2.2 zusätzliche Kommentare im Programmcode eingefügt. Diese werden im Deklarationsbereich vor der Instanziierung des Bausteins eingefügt.

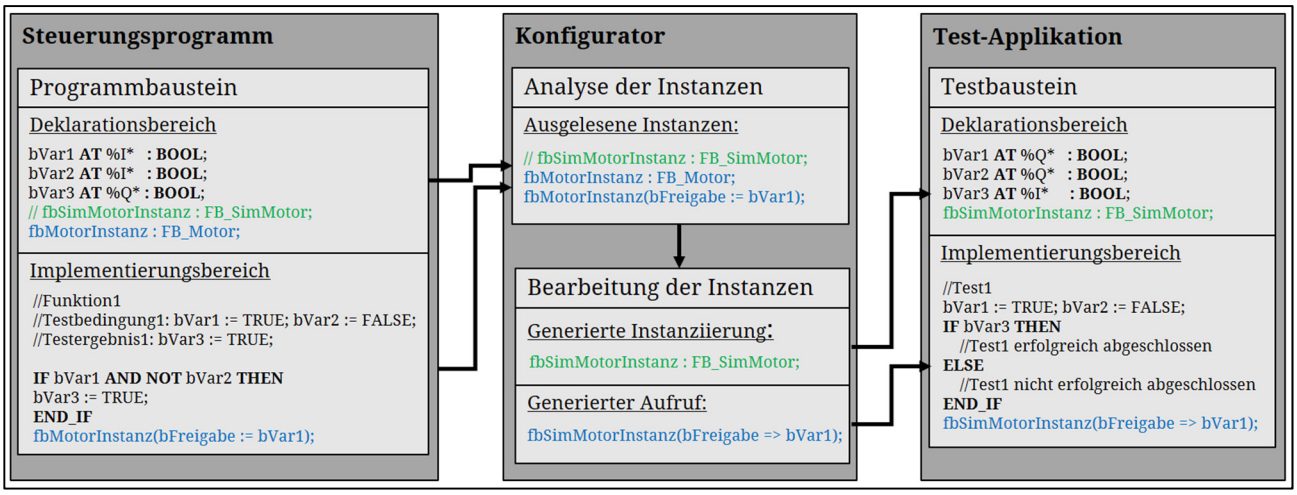


Bild 6: Einbindung eines Simulationsbausteins in den Testprozess

Ein Beispiel zur Einbindung von Simulationsbausteinen in den Testprozess ist in Bild 6 dargestellt. Im Steuerungsprogramm wird im Deklarationsbereich eine Instanz *fbMotorInstanz* vom Typ *FB_Motor* angelegt. Der Kommentar in der vorangehenden Zeile definiert den Simulationsbaustein, welcher in der Test-Applikation verwendet werden soll. Im Implementierungsbereich des Steuerungsprogramms wird der Baustein *fbMotorInstanz* aufgerufen und seiner Eingangsvariable *bFreigabe* der Wert der Eingangsvariable bVar1 zugewiesen. Nachdem der Konfigurator die Test-Applikation wie oben beschrieben konfiguriert hat, ist im Deklarationsbereich des Testbausteins die Instanziierung des Simulationsbausteins *fbSimMotorInstanz* vom Typ *FB_SimMotor* zu erkennen. Im Implementierungsbereich des Testbausteins wird der Simulationsbaustein aufgerufen. Die Eingangsvariable der Instanz im Steuerungsprogramm wurde im Simulationsbaustein zu einem Ausgang konvertiert und die Variable bVar1 wird nun vom Simulationsbaustein beschrieben.

3.5 Schnittstellen zum Steuerungsprogramm

Zur Kommunikation zwischen Test-Applikation und Steuerungsprogramm wird eine geeignete Schnittstelle benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierzu das Kommunikationsprotokoll OPC UA ausgewählt. Dieses hat den Vorteil, dass ein virtueller OPC UA Server auf dem Entwicklungsrechner initialisiert werden kann. Der Weiteren ist das Kommunikationsprotokoll OPC UA standardisiert und somit unabhängig von der Entwicklungsumgebung einsetzbar [10]. Zur virtuellen Inbetriebnahme

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

muss somit das Steuerungsprogramm mit einem OPC UA Sever verbunden werden, während die Test-Applikation mit einem virtuellen OPC UA Client ausgestattet wird. Somit kann von der Test-Applikation auf das Prozessabbild des Steuerungsprogramms zugegriffen werden. Allerdings sind hier ebenso andere Kommunikationsformen, wie z. B. TCP/IP, MQTT oder ADS realisierbar [11], [12], [13]. Im weiteren Verlauf der Entwicklung eines Konfigurators zur virtuellen Inbetriebnahme müssen deshalb unterschiedliche Kommunikationsformen untersucht und verglichen werden. Bild 7 verdeutlicht die Kommunikation zwischen Test-Applikation und Steuerungsprogramm während der virtuellen Inbetriebnahme.

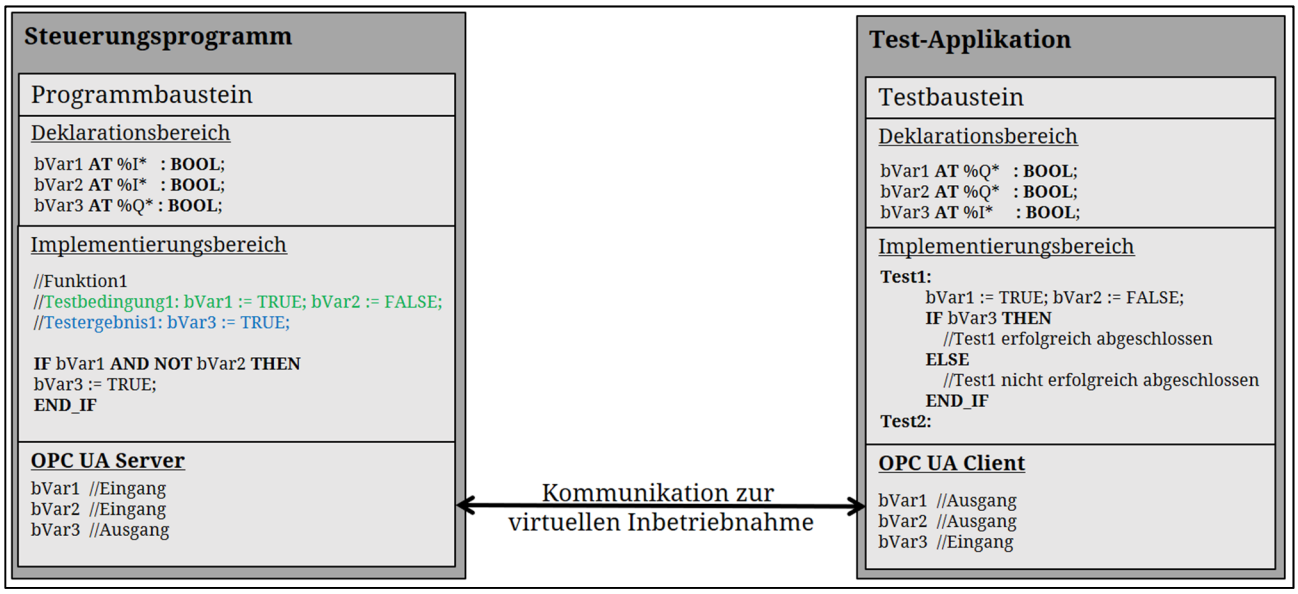


Bild 7: Beispiel einer Schnittstelle zur virtuellen Inbetriebnahme

4 Ablauf der automatisierten virtuellen Inbetriebnahme

Nach der Entwicklung eines Konzeptes zur automatisierten Konfiguration von Testszenarien und deren Abarbeitung durch eine Test-Applikation besteht nun die Herausforderung darin, ein Konzept zum Ablauf der automatisierten virtuellen Inbetriebnahme aufzustellen. Ein möglicher Ablauf ist in Bild 8 dargestellt. Hierbei ist gleichzeitig der Aufwand zur Bedienung des Konfigurators und der Test-Applikation während der virtuellen Inbetriebnahme zu erkennen.

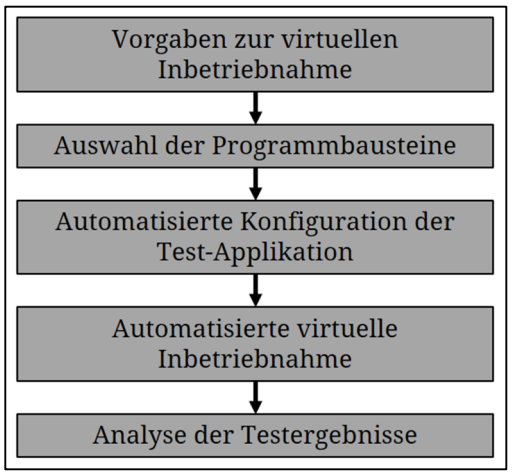


Bild 8: Möglicher Ablauf der automatisierten virtuellen Inbetriebnahme

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Zur Vorbereitung einer virtuellen Inbetriebnahme wird dem Konfigurator das Steuerungsprogramm, welches im Folgenden getestet werden soll, vorgegeben. Diese Vorgabe kann durch den Speicherpfad erfolgen, der den Speicherort der Projektmappe definiert. Alternativ kann dem Konfigurator der Dateiname des Steuerungsprogramms übergeben werden, nach welchem der Speicher durchsucht werden kann. Dadurch wird dem Konfigurator die Identifizierung der POUs im Steuerungsprogramm ermöglicht. Nach dieser automatisierten Identifizierung werden die Bezeichnungen der POUs ausgegeben, um eine Auswahl durch den Bediener zu ermöglichen, welcher Baustein im Test einbezogen werden soll. Daher können gezielt Bausteine vom Test ausgeschlossen werden. Dieser Vorteil ist besonders in der Entwicklungsphase eines Steuerungsprogramms zu erkennen, da die Funktionalitäten einzelner Programmbausteine bereits in der Entwicklungsphase getestet werden können, auch wenn das Steuerungsprogramm nicht vollständig fertiggestellt ist. Anschließend wird die automatisierte Konfiguration der Test-Applikation aktiviert. Nach Abschluss dieses Prozesses beinhaltet die Test-Applikation die vollständigen Testinformationen. Nun kann die virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt werden. Nach Abschluss der virtuellen Inbetriebnahme wird ein Testprotokoll ausgegeben. Wurden fehlerhafte Testergebnisse dokumentiert, muss eine Fehlerkorrektur dieser Fehlfunktionen im Steuerungsprogramm durch den Programmentwickler durchgeführt werden. Anschließend kann die virtuelle Inbetriebnahme erneut durchgeführt werden. Sind keine fehlerhaften Testergebnisse aufgetreten, wird die virtuelle Inbetriebnahme abgeschlossen.

5 Ausblick

Die ersten Tests haben gezeigt, dass es mit Hilfe des Konfigurators unter Verwendung des beschriebenen Konzepts möglich ist, die Informationen zur virtuellen Inbetriebnahme aus einem Projekt automatisiert auszulesen, zu bearbeiten und anschließend in eine Test-Applikation zu überführen. Im weiteren Entwicklungsprozess des Konfigurators wird geprüft, wie weit das Konzept zur Testanalyse auf unterschiedliche Steuerungsprogramme, vor allem auf umfangreichere und komplexere Programme übertragbar ist. Des Weiteren werden unterschiedliche Schnittstellen zwischen dem Steuerungsprogramm und der Testapplikation untersucht, um einen idealerweise echtzeitfähigen Signalfluss während der virtuellen Inbetriebnahme sicherstellen zu können. Weiterhin sollen verschiedene Projektdaten, wie z. B. CAD-Pläne oder Funktionsbeschreibungen, als zusätzliche Testbasen zur Analyse durch den Konfigurator herangezogen werden und in den Konfigurationsprozess der Test-Applikation eingebunden werden. In diesem Zusammenhang kann die EG-Richtlinie ebenfalls Berücksichtigung finden. Beispiele hierfür sind in Bild 9 dargestellt.

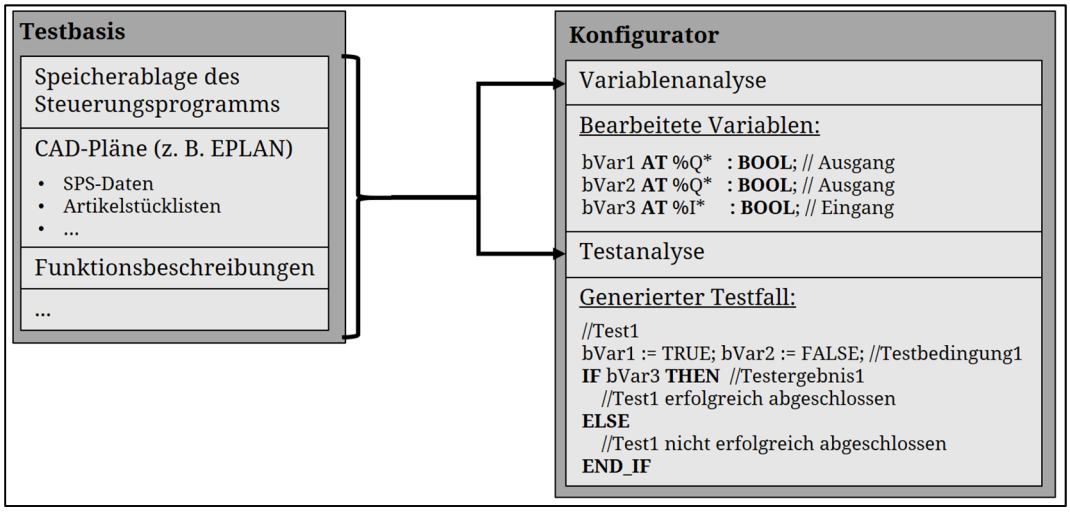


Bild 9: Einbeziehung mehrerer Testbasen zur Konfiguration einer virtuellen Inbetriebnahme

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Abschließend werden Praxistests unter Einbeziehung von Probanden durchgeführt, um den Zeitaufwand und die Qualität der virtuellen Inbetriebnahme unter Verwendung des Konfigurators zu bewerten. Durch diese Praxistests kann eine Aussage über die Bedienbarkeit des Konfigurators getroffen und die Wirtschaftlichkeit des Konfigurators vergleichend untersucht werden.

6 Literatur

[1] Rauen, H.;Mosch, C.; Axmann, E.: Leitfaden virtuelle Inbetriebnahme, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main, 2020.
[2] ISG-Stuttgart: ISG virtuos – Virtuelle Inbetriebnahme: https://www.isg-stuttgart.de/de/isg-virtuos/virtuelle-inbetriebnahme.html (Zugriff: 13.08.2021)
[3] Steirer, T.: Basiswissen Testautomatisierung, 2. Aufl., dpunkt.verlag, Heidelberg, 2015.
[4] codekickers.news, IEC 61131-3: Untit-Tests, http://codekicker-.de/news/IEC-61131-3-Unit-Tests (Zugriff: 29.03.2021).
[5] Siemens: Dokumentation SIMATIC S7-PLCSIM Advanced/STEP 7, 03/2018.
[6] Spitzweg, M.: Dissertation: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen, Herbert Utz Verlag, München, 2009.
[7] Steirer, T.: Basiswissen Testautomatisierung, 2. Aufl., dpunkt.verlag, Heidelberg, 2015.
[8] PLCopen: XML-Exchange: https://plcopen.org/technical-activities/xml-exchange (Zugriff 11.05.2021).
[9] Spillner, A.; Linz, T.: Basiswissen Softwaretest, 6. Aufl., dpunkt.verlag GmbH, Heidelberg, 2019.
[10] Siemens: OPC UA – Open Platform Communiations Unified Architecture: https://new.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/industrielle-kommunikation/opc-ua.html?gclid=Cj0KCQiA7oyNBhDiARIsADtGRZZJ3Tw_r6rnMYg3jdHr-veTDZa_qKCMCxh2i7XZi-FZaary1GGUSNkaAlO1EALw_wcB (Zugriff: 29.11.2021).
[11] Spitzweg, M.: Dissertation: Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen, Herbert Utz Verlag, München, 2009.
[12] MQTT: Why MQTT?: https://mqtt.org/ (Zugriff: 26.11.2021).
[13] Beckhoff: Einführung ADS: https://infosys.beckhoff.com/index.php?content=../content/1031/tcadscommon/html/tcadscommon_introads.htm&id= (Zugriff: 26.11.2021).

Open Access. © 2022 T. Neuner, M. Brela
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03. - 11.03.2022

Optimierte Produktionsplanung von Trommelgalvanikanlagen

S. Reimschüssel[1], U. Fuchs[2], G. Sand[3]

Zusammenfassung

Die Arbeit untersucht, inwieweit sich die zeitaufwendige und komplexe manuelle Erstellung von Trommelgalvanik-Fahrplänen mittels Methoden der gemischt-ganzzahligen Optimierung automatisieren lässt. Hierzu werden zwei reale Problemstellungen unterschiedlicher Größe und Struktur systematisch analysiert und auf das Optimierungsmodell von Steneberg abgebildet. Es wird gezeigt, dass die Eigenschaften realer Problemstellungen großteils abbildbar sind; Eigenschaften, welche dem Modell bislang noch fehlen, werden aufgedeckt und beschrieben. Bei beiden Problemstellungen stellt sich heraus, dass das Optimierungsmodell nicht innerhalb der erforderlichen Antwortzeit lösbar ist. Mit Hilfe der in dieser Arbeit entwickelten Modellvereinfachungsstrategie kann die Lösungszeit der Optimierungsmodelle deutlich reduziert werden. Obwohl bei Anwendung dieser Strategie Optimierungspotential verloren geht, ist es möglich, für das kleinere Anwendungsbeispiel innerhalb von 13 min Rechenzeit einen Fahrplan zu erstellen, welcher eine um 20 % höhere Anlagenauslastung gegenüber der bisherigen manuellen Planung ermöglicht. Für kleinere Parametersätze des größeren Anwendungsbeispiels kann die Vereinfachungsstrategie ebenfalls erfolgreich angewendet und die Rechenzeitgrenzen des Modells aufgezeigt werden.

Stichwörter

Gemischt-ganzzahlige Optimierung, Automatisierung von Planungsprozessen, Fahrplanoptimierung, Trommelgalvanik

1 Problemstellung

In einer Trommelgalvanikanlage wird Schüttgut aus relativ unedlen Metallen mit dünnen Schichten edlerer Metalle überzogen. Eine derartige Anlage besitzt mehrere aneinandergereihte Bäder, welche mit unterschiedlichen, für die Beschichtung der Produkte notwendigen, Flüssigkeiten befüllt sind. Die mit Schüttgut befüllten Trommeln werden nacheinander in produktspezifischen Reihenfolgen in einen Teil der Bäder getaucht. Die Verweilzeiten in den Bädern dürfen innerhalb gegebener Spannen variieren. Der Transport der Trommeln zwischen den Bädern erfolgt automatisiert mittels Fahrwagen, die sich auf einer über den Bädern angebrachten Schiene bewegen. Mehrere Fahrwagen einer Galvanikanlage fahren auf derselben Schiene und können sich nicht überholen.
Das Fahrprogramm für die Fahrwagen bestimmt die Auslastung der Bäder und damit die Anlagenproduktivität. Dieses Programm basiert auf Fahrplänen, die momentan noch erfahrungsbasiert und händisch mit grafischer Unterstützung durch Microsoft Excel erstellt werden. Das folgende Bild 1 zeigt

1 Hochschule Pforzheim und Steinbeis-Transfer-Zentrum „Modellierung und Optimierung technischer Systeme“
2 UF automation
3 Hochschule Pforzheim und Steinbeis-Transfer-Zentrum „Modellierung und Optimierung technischer Systeme“

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

einen solchen, manuell erstellten Fahrplan für eine Trommelgalvanikanlage mit einer Linie, auf welcher sich 2 Fahrwagen bewegen. Auf der Abszissenachse ist die Zeit in Sekunden und auf der Ordinatenachse sind die 24 Positionen der Galvaniklinie aufgetragen. Die Anlage besitzt eine Wartungsstation (Position 1), eine Be-/Entladestation (Position 2) und 21 Prozessbäder (Positionen 4 bis 24). Zwischen der Be-/Entladestation und den restlichen Bädern der Anlage existiert ein Höhenunterschied, welcher durch einen Zwischenhub ausgeglichen wird (Position 3). Die Bäder 17 und 18, sowie 23 und 24 sind identische Bäder (befüllt mit derselben Flüssigkeit), von denen wahlweise eines zur Durchführung des Prozessschritts verwendet werden kann. Die Bäder 17 und 18 können dabei zeitgleich mit je einer Trommel belegt werden. Die Bäder 23 und 24 können hingegen nicht zeitgleich besetzt werden, da die Bäder alternierend gereinigt werden müssen. Die Anlage dient der Beschichtung zweier verschiedener Produkte, für deren jeweilige Bearbeitung beide Fahrwagen benötigt werden. Der erste Transportwagen übernimmt Transporte von Position 1 bis 13, der zweite Fahrwagen Transporte von Position 13 bis 24. Der Weg des ersten Fahrwagens zur Beschichtung des ersten Produkts ist in blau, der Weg des zweiten Fahrwagens zur Beschichtung des ersten Produkts in grün dargestellt. Soll das zweite Produkt beschichtet werden, so sind der rote beziehungsweise gelbe Alternativweg zu wählen.

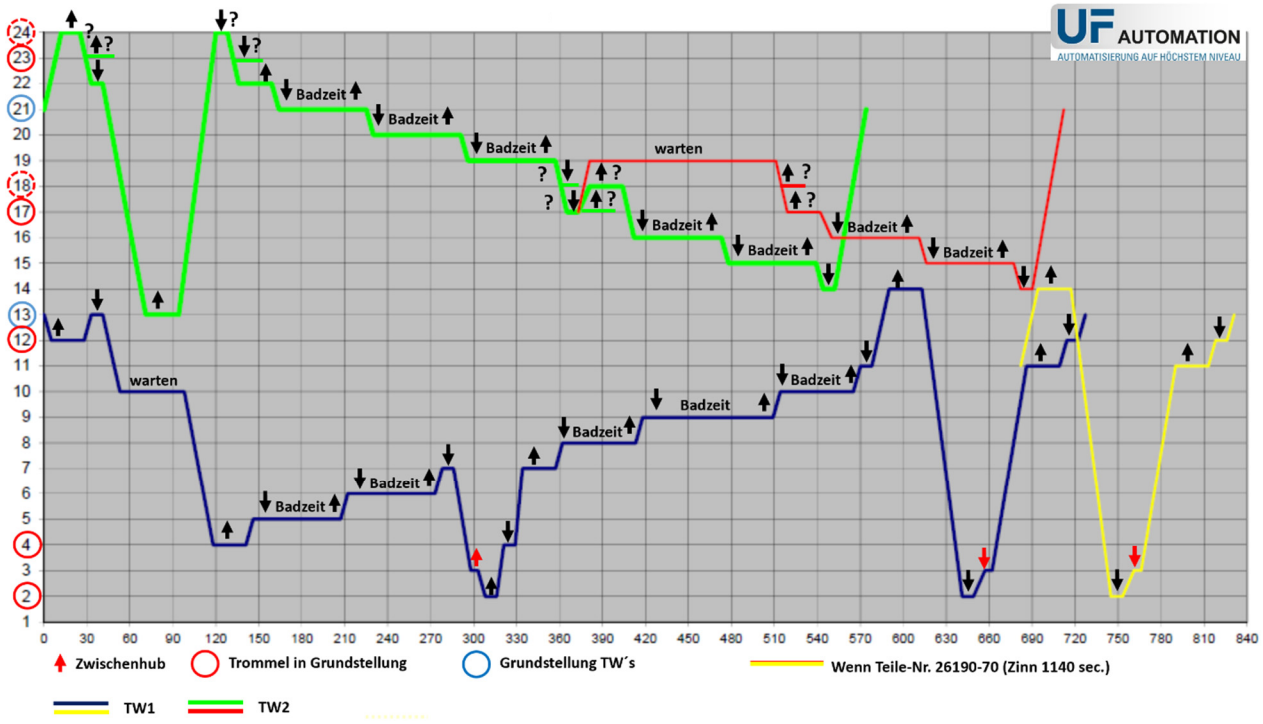


Bild 1: Manueller erstellter Fahrplan einer realen Trommelgalvanikanlage mit einer Linie auf welcher sich 2 Fahrwagen bewegen

Der manuell erstellte Fahrplan ist, zur Vereinfachung der Fahrplanerstellung, zyklisch und stark auf die Fahrwagen fokussiert. Das bedeutet, der Fahrplan wird mehrmals hintereinander ausgeführt, wobei die Fahrwagen in jedem Zyklus denselben Weg zurücklegen. Die Wege der Trommeln und die Prozessschritte hingegen sind nicht eingezeichnet und es sind mehrere Zyklen notwendig um den kompletten Weg einer Trommel zusammenhängend darzustellen. Die blau umkreisten Positionen sind die Grundpositionen (Positionen zu Beginn des Zyklus) der beiden Fahrwagen; die rot umkreisten Positionen sind die Grundpositionen der Trommeln. Die Trommeln selbst können nicht aus dem Prozess genommen werden und rotieren in der Anlage. Sie werden in der Be-/Entladestation befüllt, anschließend durch die Anlage gefahren und nach Beendigung aller Prozessschritte in der Be-/Entladestation wieder entleert und neu befüllt. Der menschliche Planer kalkuliert für diese Anlage fünf Trommeln ein. Zu Beginn eines Zyklus befinden sich Trommeln an den Positionen 2, 4 und 12, an Position 17 oder

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18 und an Position 23 oder 24. Die Positionen der Trommeln in den identischen Bädern wechseln zwischen jedem Zyklus und sind im Fahrplan nicht explizit festgelegt. Während sich beispielsweise zu Beginn des ersten Durchlaufs eine Trommel an Position 17 befindet, ist zu Beginn des zweiten Durchlaufs das Bad 18 mit einer Trommel belegt. Während sich die Fahrwagen nach einem Zyklus wieder an exakt derselben Position befinden, verändern sich die Positionen der Trommeln mit jedem Zyklus. Zwar sind dieselben Positionen mit Trommeln besetzt, an den Positionen liegen jedoch andere Trommeln als zu Beginn des Zyklus. Beispielsweise befindet sich die Trommel, welche zu Beginn eines Zyklus an Position 4 lag, am Ende des Zyklus an Position 12.
Neben der vorgestellten einlinigen Anlage wurde zudem eine Großanlage untersucht, in der 30 verschiedene Produkte bearbeitet werden können und deren Bäder sich wie in Bild 2 gezeigt auf zwei parallele Linien verteilen. Zur ersten Linie gehören die Beladestation und die Bäder 1 bis 33. Die zweite Linie umfasst die Bäder 34 bis 62, sowie die Entladestation. Beiden Linien können mehrere Fahrwagen zugeordnet werden, deren Fahrbereich auf eine Linie begrenzt ist. Am vorderen und hinteren Ende der Linien befinden sich Querumsetzer, welche die Trommeln zwischen den Linien transportieren. Der vordere Umsetzer setzt Trommeln von Linie 2 auf Linie 1 und der hintere Umsetzer Trommeln von Linie 1 auf Linie 2 um. Somit besitzt die Anlage keine lineare, sondern eine ringförmige Struktur. Die Be- und Entladestation der Großanlage befinden sich an zwei verschiedenen Positionen. Die Trommeln laufen im Kreis durch die Anlage und besitzen ausschließlich eine Bewegungsrichtung.

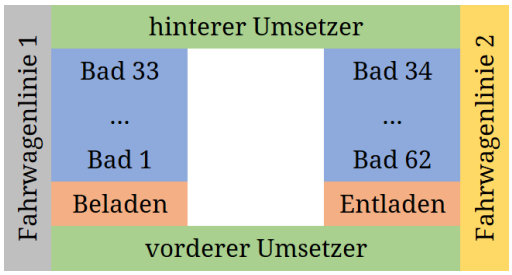


Bild 2: Ringförmige Struktur der Großanlage mit zwei parallelen Linien. Der Fahrbereich eines Fahrwagens beschränkt sich auf eine Linie.

Die Anlage ist noch im Aufbau, wodurch die Anzahl an Fahrwagen noch nicht festgelegt ist und damit einen weiteren Freiheitsgrad der Optimierung darstellt. Die manuelle Erstellung der Fahrpläne unterscheidet sich methodisch nicht von der einlinigen Anlage.

Die Planung der Fahrwege ist ein Optimierungsproblem, bei dem in begrenzter Zeit eine Vielzahl komplex wechselwirkender Entscheidungen getroffen werden muss. Das Ziel ist es, die Entscheidungen – wie die Anzahl an Trommeln im Prozess oder welcher Fahrwagen welche Trommel zu welchem Zeitpunkt aus einem Bad hebt und senkt – derart zu treffen, dass die Zykluszeit minimal wird.
Hierfür soll ein gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsmodell (engl. **M**ixed **I**nteger **L**inear **P**rogram) entwickelt werden, welches alle relevanten Problemeigenschaften abbildet und gleichzeitig in der verfügbaren Antwortzeit lösbar ist. Auf Basis der rechnerbasierten Optimierungsmethoden kann die manuelle Planung automatisiert erfolgen.

2 Lösungsansatz

Die Planungsaufgabe wird in einem MILP durch kontinuierliche und diskrete Variablen beschrieben, deren Wertebereich durch lineare, algebraische Gleichungen und Ungleichungen (Nebenbedingungen) beschränkt wird. Es verbleibt eine Vielzahl zulässiger Lösungen, die alle Nebenbedingungen ein-

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

halten und mit einer Zielfunktion bewertet werden. Gesucht ist die beste Lösung, welche alle Nebenbedingungen einhält. Allgemein kann ein mathematisches Optimierungsmodell wie folgt dargestellt werden, vergleiche [1]:

$$\min_{x,y} \left\{ f(x,y) \middle| \begin{matrix} h(x,y) = 0 \\ g(x,y) \geq 0 \end{matrix}, \quad \begin{matrix} x \in X \subseteq \mathbb{R}^{n_c} \\ y \in Y \subseteq \mathbb{Z}^{n_d} \end{matrix} \right\} \tag{1}$$

Die Zielfunktion $f(x,y)$ soll, unter der Bedingung, dass die Vektoren der Gleichungsbedingungen $h(x,y)$ und der Ungleichungsbedingungen $g(x,y)$ erfüllt sind, minimiert werden. Der Vektor x ist ein Element der Vektormenge X, welche eine Teilmenge des n_c dimensionalen Vektorraums der reellen Zahlen darstellt. Der Vektor y ist ein Element der Vektormenge Y, welche eine Teilmenge des n_d dimensionalen Vektorraums der ganzen Zahlen darstellt. Dabei bezeichnet n_c die Menge kontinuierlicher und n_d die Menge ganzzahliger Variablen. Es handelt sich um ein MILP, wenn $n_c > 0$ und $n_d > 0$ ist und die Funktionen $f(x,y), h(x,y)$ und $g(x,y)$ ausschließlich lineare Komponenten enthalten. Zur Implementierung mathematischer Optimierungsmodelle existieren verschiedene algebraische Modellierungssprachen und -umgebungen wie beispielsweise GAMS[4], AMPL[5] und OPL[6]. Für die Lösung der Optimierungsmodelle existieren Standardlöser wie beispielsweise CPLEX[7], GUROBI[8] oder XPRESS[9].

In Vorarbeiten konnte gezeigt werden, dass „einfache“ Job-Shop Modelle [2], wie das Flow-Shop oder Hybride Flow-Shop Modell zur Optimierung von Galvanikstraßen wie den hier betrachteten nicht ausreichen. Diesen Modellen fehlt es insbesondere an der Abbildbarkeit der Fahrwagen. Weiterhin wurde in den Vorarbeiten der aktuelle Stand der Forschung zur MILP-basierten Feinplanung von Trommelgalvanikanlagen mit Fahrwagen untersucht. Dabei konnten einige Forschungsarbeiten mit unterschiedlichen Modellformulierungen (beispielsweise [3], [4], [5], [6], [7]) gefunden werden, welche gegenüber den Job-Shop Modellen die Trommelgalvanik besser abbilden. Ein Vergleich der Modelle zeigt, dass das von Steneberg 2013 aufgestellte Optimierungsmodell [3] dem Anwendungsspektrum von UF automation am nächsten kommt. Dieses Modell wurde in der Modellierungsumgebung GAMS implementiert und mit Hilfe des Standardlösers CPLEX gelöst.

Das Steneberg-Modell besitzt die in Tabelle 1 aufgeführten Indexmengen, die in Tabelle 2 aufgeführten Parameter, die in Tabelle 3 aufgeführten Variablen und 12 weitere Blöcke von Hilfsvariablen.

Tabelle 1: Indexmengen des Steneberg-Modells

$\boldsymbol{k} = \{\mathbf{1},\ \ldots,\ \boldsymbol{H}\} \in \mathbb{N}$	Fahrwagen	$\boldsymbol{a} = \{\mathbf{1},\ \ldots,\ \boldsymbol{A}\} \in \mathbb{N}$	Chargen
$\mu = u = \{0,\ \ldots,\ M+1\} \in \mathbb{N}_0$	Prozessbäder	$i = \{0,\ \ldots,\ I\} \in \mathbb{N}_0$	Prozessschritte
$n = \{1,\ \ldots,\ N\} \in \mathbb{N}$	Bearbeitungsschemata		

Jedem Bearbeitungsschema (Abfolge von Bädern zur Beschichtung eines Produkts) wird eine Anzahl an Chargen und eine Anzahl an Prozessschritten zugeordnet, sowie jedem Prozessschritt eines Bearbeitungsschemas ein konkretes Prozessbad. Der Abstand zwischen Prozessbädern, sowie der Mindestabstand zwischen Fahrwagen wird in Sekunden, die ein Fahrwagen braucht, um die entsprechende Strecke zurückzulegen, angegeben.

[4] https://www.gams.com/
[5] https://ampl.com/
[6] https://www.ibm.com/de-de/products/ilog-cplex-optimization-studio
[7] https://www.ibm.com/de-de/analytics/cplex-optimizer
[8] https://www.gurobi.com/
[9] https://www.fico.com/en/products/fico-xpress-solver

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Tabelle 2: Parameter des Steneberg-Modells

$\boldsymbol{C_n} \in \mathbb{N}$	Anzahl der Chargen	$\boldsymbol{T_\mu^P} \in \mathbb{R}^+$	Zeit zum Heben einer Trommel
$P_n \in \mathbb{N}$	Anzahl der Prozessschritte	$T_\mu^L \in \mathbb{R}^+$	Zeit zum Senken einer Trommel
$v_{n,i} \in \mathbb{N}_0$	Zuordnung eines Prozessbads	$P_{n,i}^{min} \in \mathbb{R}^+$	Untere Grenze der Verweilzeit
$E_{\mu,u} \in \mathbb{R}^+$	Abstand zweier Prozessbäder	$P_{n,i}^{max} \in \mathbb{R}^+$	Obere Grenze der Verweilzeit
$\delta \in \mathbb{R}^+$	Mindestabstand	M	Big M Faktor

Ziel des Optimierungsmodells ist es, für jeden Prozessschritt i einer Charge a des Bearbeitungsschemas n den Start- und Endzeitpunkt so zu wählen, dass die Zyklusdauer minimal wird. Dabei erhalten gleiche Prozessschritte unterschiedlicher Chargen eines Bearbeitungsschemas dieselbe Verweildauer im Prozessbad.

Tabelle 3: Variablen des Steneberg-Modells. Für die nicht aufgeführten 12 Blöcke von Hilfsvariablen siehe [3]

$\boldsymbol{\Pi} \in \mathbb{R}^+$	Zyklusdauer	$\boldsymbol{t^s_{n,a,i}} \in \mathbb{R}^+$	Startzeitpunkt eines Prozessschritts
$z_{n,a,i,k} \in \{0;1\}$	Fahrwagenzuordnung	$t^e_{n,a,i} \in \mathbb{R}^+$	Endzeitpunkt eines Prozessschritts

Im Steneberg-Modell sind die Trommeln, welche in der Anlage rotieren, und deren Grundpositionen nicht explizit abgebildet. Durch das Festlegen der Start- und Endzeitpunkte und der Fahrwagenzuordnung ergeben sich die Anzahl und die Grundpositionen jedoch aus der Lösung des Modells. Das Modell besitzt 215 Blöcke von Randbedingungen zur Vermeidung von Kollisionen und zur Erreichbarkeit der Trommeln zu den festzulegenden Start- und Endzeitpunkten durch die Fahrwagen. Die restlichen 30 Blöcke von Randbedingungen definieren die Zielfunktion und sichern unter anderem die Einhaltung der Prozessschrittsequenz, der Verweilzeitgrenzen und der Bäderkapazitäten.

3 Abbildbarkeit realer Anlagen mit dem Steneberg-Modell

Das Steneberg-Modell wurde auf die in Abschnitt 1 beschriebene einlinige Trommelgalvanikanlage, sowie auf die Großanlage angewendet. Dabei konnte eine fehlerhafte Randbedingung im Steneberg-

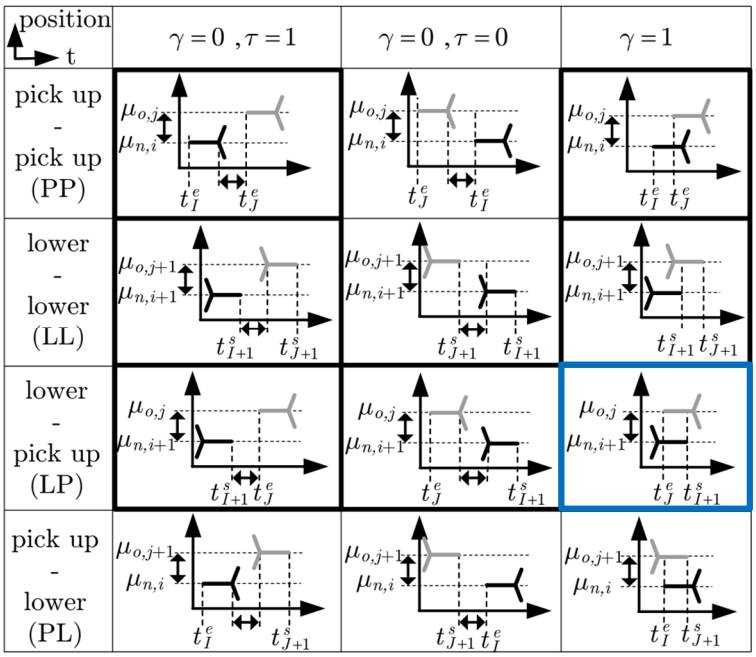


Bild 3: Mögliche Konstellationen der Hebe- und Senkvorgänge. Das blau umrandete Szenario stellt den durch die fehlerhafte Randbedingung repräsentierten Fall sich zeitlich überlappender Hebe- und Senkvorgänge dar [3]

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Modell aufgedeckt werden, welche den Mindestabstand zwischen zwei Fahrwagen während eines Hebe- und eines Senkvorgang gewährleistet. Die entsprechende Konstellation ist in folgendem Bild 3 blau markiert. Hieraus lässt sich erkennen, dass der Abstand zwischen den Bädern $\mu_{n,i+1}$ und $\mu_{o,j}$ zum Abgleich mit dem Mindestabstand herangezogen werden muss.
Die Randbedingung (2) wurde durch die Randbedingung (3) mit korrigierten Indexmengen der Fahrzeit E ersetzt.

$$\sum_{l\in\Gamma}(|k-l|\cdot\delta\cdot z_{J,l}) \leq E_{\mu_{n,i},\mu_{o,j}} + M[2-\gamma_{I,J}^{LP}-z_{I,k}] \tag{2}$$

$$\sum_{l\in\Gamma}(|k-l|\cdot\delta\cdot z_{J,l}) \leq E_{\mu_{n,i+1},\mu_{o,j}} + M[2-\gamma_{I,J}^{LP}-z_{I,k}] \tag{3}$$

Aufgrund der Komplexität des Steneberg-Modells mit seinen 245 Blöcken von Randbedingungen wurde zunächst untersucht, welche Aspekte der realen Problemstellungen ohne Abändern des Modells durch geeignetes Anpassen der Parametersätze abgebildet werden können.

3.1 Einlinige Anlage

Die Nummerierung der Prozessbäder, sowie der Be-/Entlade- und der Wartungsstation kann wie in Tabelle 4 gezeigt folgendermaßen angepasst werden:

- Die Wartungsstation (Position 1) wird in die manuelle Planung nicht einbezogen und kann im Optimierungsmodell ebenfalls vernachlässigt werden.
- Zur Abbildung des Zwischenhubs wurde im Gegensatz zur manuellen Planung keine zusätzliche Position vergeben, sondern die Dauer des Zwischenhubs zur Fahrzeit zwischen der Be-/Entladestation und den anderen Positionen hinzuaddiert.
- Die identischen Bäder 23 und 24, welche nicht zeitgleich besetzt werden können, sind durch ein durchgängig besetzbares Bad ohne Verlust an Optimierungspotential abbildbar.

Tabelle 4: Anpassung der Positionen aus der manuellen Planung für das Steneberg-Modell

Bezeichnung	W	B/E	Z	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Position in der manuellen Planung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Position im Optimierungsmodell	-	0	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	-

W=Wartungsstation B/E=Be-/Entladestation Z=Zwischenhub P=Prozessbad

Im Optimierungsmodell ist die Entnahme der ersten Trommel aus der Be-/Entladestation zum Zeitpunkt 0 erforderlich. Zum besseren Vergleich des manuellen Plans mit dem optimierten Plan ist es hilfreich, die Zeitachse des manuellen Plans so zu verschieben, dass auch im manuellen Plan die erste Trommel zum Zeitpunkt 0 entnommen wird. Aufgrund der zyklischen Planung ändert sich hierdurch nichts an der Planung, sondern lediglich an der Darstellung.
Die Abtropfzeiten werden zu den Hebezeiten hinzuaddiert. Wie in der manuellen Planung wird für die Abtropfzeiten ein fester Wert angenommen. Dies stellt eine Vereinfachung dar, da die Abtropfzeiten in der Realität innerhalb bestimmter Spannen variieren dürfen.
Auch die feste Vorgabe der Grenzen für die Verweilzeiten der Trommeln in den Bädern sind eine Vereinfachung der Realität. In seltenen Fällen dürfen die Grenzen zu Gunsten einer besseren Planung überschritten werden. Diese Möglichkeit wird bei der manuellen Planung ausgenutzt. Um einen aussagekräftigen Vergleich des manuellen Plans mit dem optimierten Plan anzustellen, werden die vom menschlichen Planer ausgenutzten Grenzen im Modell ebenfalls gelockert.

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Die Fahrzeiten zwischen den Bädern sind für 7 Strecken exakt gemessen. Der Abstand der Bäder zueinander ist konstant. Die Abhängigkeit der Fahrzeiten vom Abstand der Bäder kann durch lineare Interpolation und Extrapolation der Messpunkte approximiert werden. Die Fahrzeiten sind von der Beladung der Trommel abhängig; dieser Aspekt ist im Modell noch nicht abbildbar. In der manuellen Planung wird zum Abfangen dieser Ungenauigkeiten am Zyklusende ein zeitlicher Puffer eingeplant.
Der erste Prozessschritt erhält im Steneberg-Modell nur einen End- und keinen Startzeitpunkt. Umgekehrt erhält der letzte Prozessschritt nur einen Start- und keinen Endzeitpunkt. Ein Vergleich des Start- beziehungsweise Endzeitpunkts des ersten und letzten Prozessschritts, welche im vorliegenden Anwendungsfall dem Be- und Entladen entspricht, fehlt dem Modell. Folglich ist nicht kontrollierbar, wie lange sich eine Trommel in der Be-/Entladestation aufhält und wie viele Trommeln sich zeitgleich in der Anlage befinden.
Die identischen, zeitgleich besetzbaren Prozessbäder 14 und 15 (nach angepasster Nummerierung) sind im Steneberg-Modell nicht direkt abbildbar. Sie können dennoch eingebracht werden, indem für die Beschichtung eines Produkts zwei unterschiedliche Bearbeitungsschemata definiert werden. Die Schemata sind bis auf die Zuordnung zu einem identischen Bad identisch: Dem entsprechenden Prozessschritt wird in einem Bearbeitungsschema das Bad 14, im anderen Bearbeitungsschema das Bad 15 zugeordnet. Bei einer getrennten Optimierung der Aufträge führt diese Art der Parametrierung bei einer gleichmäßigen Aufteilung der Chargen auf die Bearbeitungsschemata zu keinem Verlust an Optimierungspotential.

3.2 Großanlage mit zwei Linien

Die beiden Linien der Großanlage sind wie in Abschnitt 1 beschrieben an den Enden mit jeweils einem Querumsetzer verbunden. Diese übernehmen den Transport der Trommeln von einer auf die andere Linie. Für die Umsetzdauer auf eine andere Linie existiert eine fest einzuhaltende Zeitspanne, sowie feste Senk-, Hebe- und Abtropfzeiten. Sie verhalten sich somit aus Sicht des Modells identisch zu den Prozessbädern und können als solche modelliert werden.
Das Steneberg-Modell kann ausschließlich linienförmige Anlagen abbilden, weshalb die in Bild 2 dargestellte Ringstruktur aufgebrochen werden muss. Dies erfolgt im Modell durch die Nummerierung der Beladestation, Entladestation, Prozessbäder und Umsetzer. Erhält die Beladestation die Position 0 und wird die Nummerierung im Uhrzeigersinn entlang der Ringstruktur fortgeführt, so teilt sich, wie Bild 4 a) zeigt, die Fahrwagenreihe 1 in zwei Bereiche auf. Die Nummerierung der Fahrwagen ist im Modell so zu wählen, dass der erste Fahrwagen Transporte von und zu der ersten Position übernimmt und der letzte Fahrwagen Transporte von und zu der letzten Position. Somit muss bei der Auftrennung an der Beladestation die Nummerierung der Fahrwagen wie in Bild 4 a) in rot dargestellt erfolgen. Für die Bestimmung des Fahrwagenabstands werden die Fahrwagennummern herangezogen. Mit der Nummerierung aus Bild 4 a) müssten Fahrwagen 1 und Fahrwagen 8 einen Mindestabstand von $7 \cdot \delta$ zueinander einhalten. In der Realität genügt jedoch ein Mindestabstand von δ. Folglich ist nur eine korrekte Berechnung des Mindestabstands bei einer Auftrennung der Ringstruktur an einem der Querumsetzer wie in Bild 4 b) gezeigt möglich, da an diesen Stellen die Fahrwagenreihen enden.

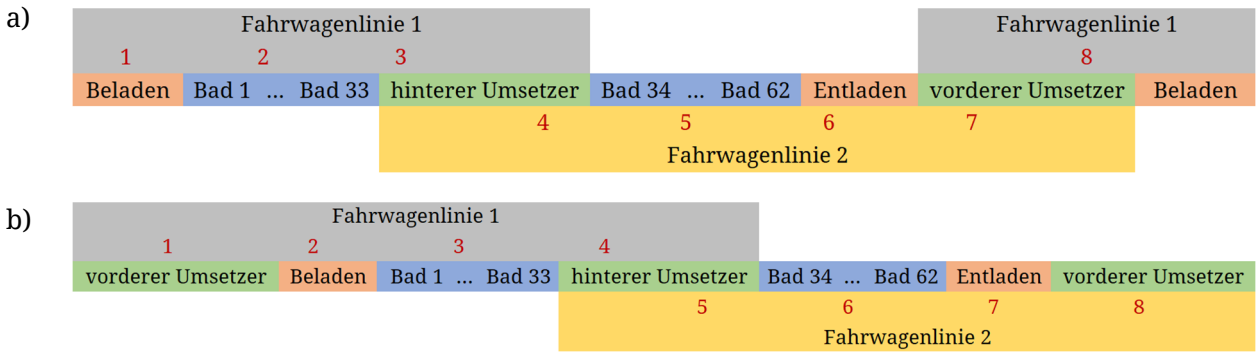


Bild 4: Auftrennen der Ringstruktur der Großanlage an unterschiedlichen Positionen. a) Auftrennen an der Beladestation, b) Auftrennen am vorderen Umsetzer; in rot dargestellt ist die Nummerierung der Fahrwagen

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Aus Sicht des Modells existiert nur eine Linie und somit nur die Begrenzung der Fahrwagen am Anfang und am Ende dieser Linie. Die reale Anlage besitzt jedoch zwei Linien und damit vier Begrenzungen der Fahrwagen. Durch die in Bild 4 b) dargestellte Auftrennung der Ringstruktur können die Fahrwagen über den hinteren Umsetzer hinaus weiterfahren und die mechanische Begrenzung der realen Anlage wird nicht eingehalten. Das Festsetzen der Variablenwerte für die Fahrwagenzuordnung, sodass Zuweisungen eines Fahrwagens der Linie 1 zu einem Transport auf Linie 2 und umgekehrt unterbunden wird, verhindert das Überschreiten der Grenze lediglich wenn der Fahrwagen eine Trommel transportiert. Eine Leerfahrt über den hinteren Umsetzer hinaus, wie beispielsweise eine Ausweichfahrt, kann hierdurch aber nicht verhindert werden. Wie bereits bei der einlinigen Anlage ist auch hier mit dem Steneberg-Modell die Anzahl der Trommeln in und deren Verweilzeit an der ersten und letzten Position nicht kontrollierbar. In diesem Fall handelt es sich um den vorderen Umsetzer. Die Fahrwagenanzahl wird im Modell durch einen festen Parameter abgebildet, ist in der Realität für diesen Anwendungsfall jedoch ein Freiheitsgrad.

4 Lösen des Modells für reale Parametersätze

Wird das Modell mit den Daten der Anlage parametriert, kann mit dem Standardlöser CPLEX innerhalb von 24 h keine zulässige Lösung gefunden werden. Der verwendete Rechner besitzt einen Intel® Core™ i7-10510U Prozessor mit einer Grundtaktfrequenz von 1,8 GHz und insgesamt 8 Threads. Zur Lösung der Modelle wurde 1 Thread verwendet. Bei allen hier angegebenen Zeiten handelt es sich um „wall clock time“. Zur Reduktion der Lösungszeit wurden Vereinfachungsstrategien aus der manuellen Planung in das Modell zu übernommen. In der manuellen Planung werden für alle Aufträge individuelle Pläne erstellt. Diese werden je nach Auftragslage miteinander kombiniert. Die manuell erstellten Pläne sind zyklisch und jeder Prozessschritt des Auftrags wird, auch wenn mehrere Chargen bearbeitet werden sollen und sich mehrere Trommeln in der Anlage befinden, nur einmal eingeplant. Hierdurch ergibt sich gegenüber azyklischen Plänen und Plänen, in denen jeder Prozessschritt explizit geplant wird, ein sehr viel kürzerer Planungshorizont und die Planungskomplexität wird reduziert. Gleichzeitig geht hierdurch aber auch Optimierungspotenzial verloren.
Das Prinzip dieser Vereinfachung veranschaulicht der Fahrplan der sechsten Testinstanz aus der Veröffentlichung von Steneberg in Bild 5. In dieser Testinstanz werden zwei Bearbeitungsschemata mit je 2 Chargen eingeplant. Zu Bearbeitungsschema 1 gehören die hell- und dunkelorangene Charge, zu Bearbeitungsschema 2 die hell- und dunkelgrüne Charge. Ab dem Zeitpunkt $\frac{\Pi}{2}$ wiederholt sich der Plan, wobei die Chargen eines Bearbeitungsschemas vertauscht sind. Da beide Chargen eines Bearbeitungsschemas im linken Teil und im rechten Teil des Plans auf exakt dieselbe Weise bearbeitet werden, erstellt der menschliche Planer ausschließlich den linken Teil des Plans. Im Optimierungsmodell wird dies umgesetzt, indem 2 Bearbeitungsschemata mit je einer Charge definiert werden. Diese Vereinfachung führt immer dann zu keinem Verlust an Abbildungsgenauigkeit, wenn die Anzahl der Chargen jedes Bearbeitungsschemas um den gleichen Faktor reduziert wird. Sollen vom ersten Bearbeitungsschema beispielsweise 3 Chargen bearbeitet werden, während gleichzeitig vom zweiten Bearbeitungsschema 2 Chargen bearbeitet werden, ist keine Vereinfachung des Parametersatzes möglich.

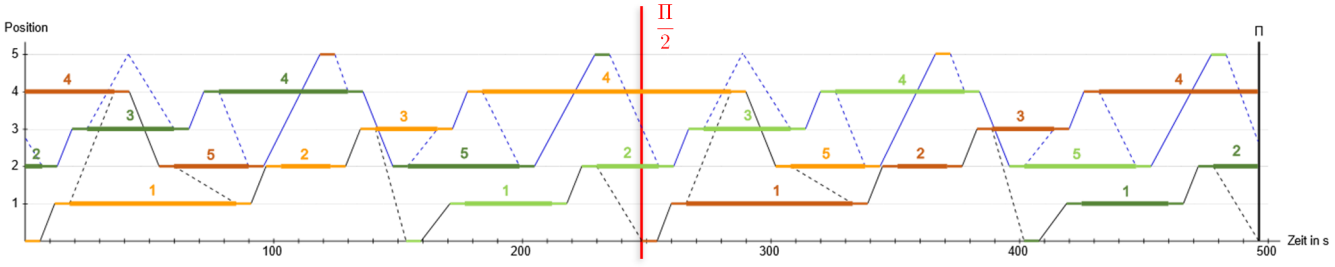


Bild 5: Ergebnis der sechsten Testinstanz von Steneberg mit 2 Bearbeitungsschemata orange und grün mit jeweils 2 Chargen hell und dunkel. Ab dem Zeitpunkt $\frac{\Pi}{2}$ wiederholt sich der Plan mit vertauschten Chargen.

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Um das Steneberg-Modell mit Standardlösern lösen zu können, wurden diese Heuristiken der manuellen Planung auf das Modell abgebildet. Die Anzahl der Chargen a je Bearbeitungsschema n wird auf 1 reduziert. Aufgrund des identischen Bads der einlinigen Anlage werden 2 Bearbeitungsschemata verwendet. Weiterhin beschränkt sich die Optimierung auf den ersten Auftrag. Hierdurch kann die Modellgröße derart reduziert werden, dass der CPLEX-Löser innerhalb von 13 min eine optimale Lösung findet. Um den optimierten Plan mit der manuellen Lösung vergleichen zu können wurde dieser, insbesondere mit Blick auf die Modellschwächen, untersucht. Dabei konnten keine Fehler, das heißt keine Abschnitte im Plan gefunden werden, welche in der Realität nicht durchführbar sind. Beispielsweise befindet sich zu jedem Zeitpunkt nur eine Trommel in der Be-/Entladestation. Zu beachten ist, dass die Fahrzeiten approximiert wurden und von den realen Zeiten abweichen können. Dieser Aspekt trifft jedoch sowohl auf das Optimierungsmodell als auch auf die manuelle Planung zu. Der in der manuellen Planung am Ende des Zyklus eingebrachte Puffer zum Abfangen dieser Abweichungen wurde zum Vergleich mit dem optimierten Plan herausgerechnet. Mit dem vom Optimierungsmodell erstellten Fahrplan lassen sich innerhalb von 17 880 Sekunden 30 Chargen bearbeiten, während mit dem manuell erstellten Plan für dieselbe Anzahl an Chargen 22 110 Sekunden benötigt werden. Dies entspricht einer Verbesserung um 19,13 %.
Die Optimierung zeigt, dass eine weitere Trommel im Prozess untergebracht werden kann, indem die identischen Bäder besser ausgelastet werden. In folgendem Bild 7 ist links ein Ausschnitt des manuell erstellten und rechts ein Ausschnitt des mit dem Optimierungsmodell erstellten Fahrplans dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich der Fahrweg von Fahrwagen 2 (grüne Linie) im Bereich der identischen Bäder 17/14 und 18/15 in den Plänen unterscheidet. Im optimierten Fahrplan wird noch während des Pro-

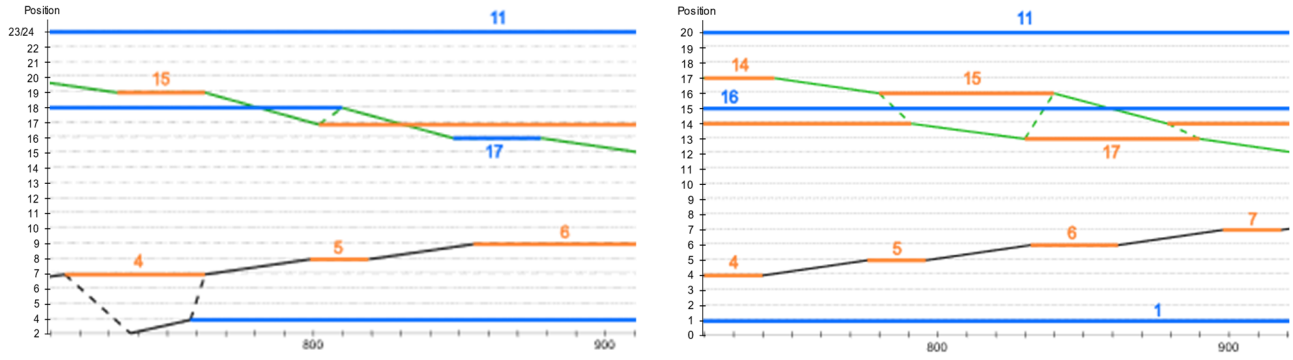


Bild 6: Vergleich des manuell erstellten Fahrplans (links) mit dem optimierten Fahrplan (rechts)

Tabelle 5: Lösungszeiten bei Anwendung des Steneberg-Modells mit Vereinfachung auf die Großanlage

Auftragsart	Anzahl der Prozessschritte *i*	Anzahl der Bearbeitungsschemata *n*	Anzahl der Fahrwagen *h*	Lösungszeit in [h:min:s]
A	25	2	2	00:00:05
A	25	2	4	00:08:33
A	25	2	6	00:53:17
A	25	2	8	01:34:28
B	13	4	2	00:00:17
B	13	4	4	00:06:11
B	13	4	6	00:14:44
B	13	4	8	00:19:58
C	30	2	2	00:00:26
C	30	2	3	00:04:55
C	30	2	4	10:41:31
C	30	2	5	>48:00:00

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

zessschritts 15 eine Trommel aus dem Bad 17 entnommen. Nach dem Prozessschritt 15 kann die Trommel direkt in das frei gewordene Bad gesetzt werden. Die Zeitspanne, in der Bad 17 nicht belegt ist wird hierdurch möglichst kurzgehalten.
Diese Vereinfachung wurde ebenfalls auf den Parametersatz der Großanlage angewendet und das Modell exemplarisch für drei unterschiedliche Auftragsarten gelöst. Dabei zeigte sich, dass die Vereinfachung nicht genügt, um die Lösungszeit auf unter eine Stunde zu reduzieren. Die Ergebnisse können der folgenden Tabelle 5 entnommen werden.

5 Fazit und Ausblick

Die Arbeit zeigt, dass das Steneberg-Modell viele Aspekte der Feinplanung realer Trommelgalvanikanlagen abbildet. Es konnten jedoch Modellschwächen identifiziert werden, die entweder zu schlechteren oder zu fehlerhaften Plänen führen. Im nächsten Schritt soll das Modell daher, um die fehlenden Aspekte erweitert werden. Weiterhin wird deutlich, dass die Übertragung manueller Heuristiken auf das Optimierungsmodell die Lösungszeit deutlich reduzieren kann. Die Anwendung des vereinfachten Modells auf die Großanlage zeigt jedoch, dass weitere Lösungsansätze entwickelt werden müssen, um Fahrpläne für größere Anlagen mit mehreren Linien, über 60 Bäder und mehr als 4 Fahrwagen zu berechnen. In Folgearbeiten sollen daher die Modellstruktur analysiert und geeignete Ansätze wie lazy constraints, Aggregation oder Dekomposition untersucht werden, um die Modellgröße weiter zu reduzieren und die Berechnung zu parallelisieren. Zudem soll die Belegungsplanung um die drei Planungsschritte Ressourcenplanung, Auftragsplanung und reaktive Planung erweitert werden, um die gesamten Prozesse zum Betrieb der Galvanikanlagen automatisiert zu planen und zu steuern, sowie auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren.

6 Literatur

[1] J. Kallrath, Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis, Wiesbaden: Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.

[2] W. Domschke, A. Scholl und S. Voß, Produktionsplanung - Ablauforganisatorische Aspekte, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag , 1997.

[3] S. C. Steneberg, „MILP model for multi-product, multi-part and multi-hoist cycle shops,“ in *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2013)*, 2013.

[4] N. P. Basán und C. A. Méndez, „Hybrid MILP/Simulation/Heuristic Algorithms to Complex Hoist Scheduling Problems,“ *Computer Aided Chemical Engineering,* Bd. 38, 2016.

[5] Y. Jiang und J. Liu, „A new model and an efficient branch-and-bound solution for cyclic multi-hoist scheduling,“ *IEE Transactions,* Bd. 46, 2014.

[6] J. M. Y. Leung, G. Zhang, X. Yang, R. Mak und K. Lam, „Optimal Cyclic Multi-Hoist Scheduling: A Mixed Integer Programming Approach,“ *Operations Research,* Bd. 52, 2004.

[7] Z. Zhou und L. Li, „A solution for cyclic scheduling of multi-hoists without overlapping,“ *Annals of Operations Research,* Bd. 168, 2009.

Open Access. © 2022 S. Reimschüssel, U. Fuchs, G. Sand
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

CPLEX-basierte Produktionsablaufplanung

A. Herdt[1], M. Scheidig[1], C. Jentner[1], G. Sand[2]

Zusammenfassung

Das Ziel dieses Projektes ist, die bestehende tägliche Produktionsablaufplanung in der Handgalvanik bei dem Lohngalvanikbetrieb C. Jentner GmbH mit Hilfe eines mathematischen Modells zu optimieren. Hierfür wurde das Flexible-Job-Shop-Modell von Ziaee ([1], S. 91-95) ausgewählt und auf die Gegebenheiten vor Ort angepasst. Es gehört zu den MILP-Problemen (mixed integer linear programming-gemischt ganzzahlige Programmierung). Bei der Verwendung des Modells für die Praxis stellt die Modellgröße, die benötigt wird, um die Vorgänge in der Produktion ausreichend abbilden zu können, ein Problem dar. Diese führt zu langen Lösungszeiten, die für den täglichen Einsatz in der Produktionsablaufplanung ungeeignet sind. Zur Lösung dieses Problems wurde ein problemspezifisches Verfahren basierend auf Aggregations- und Dekompositionstechniken entwickelt. Durch Anwendung dieses Verfahrens kann die Problemgröße für den Solver klein und so die Lösungszeit in einem für die tägliche Produktionsablaufplanung annehmbaren Rahmen gehalten werden.

Stichwörter

Flexible Job Shop, Mixed Integer Linear Programming, Produktionsablaufplanung, Modellierung großer Systeme, Aggregation, Dekomposition

1 Einführung

In der Industrie wird es für die Unternehmen immer wichtiger, flexibel auf neue Auftragslagen zu reagieren. Auch in der Galvanikindustrie sehen sich die Unternehmen diesem Druck ausgesetzt. So auch der Lohngalvanikbetrieb C. Jentner. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen die vorhandenen Anlagen und Ressourcen durch einen optimierten Produktionsablauf ideal genutzt werden. Bislang erfolgte die Tagesplanung bei C. Jentner heuristisch. Das bedeutet, dass qualifizierte Mitarbeiter des Unternehmens anhand ihrer Erfahrung einen Produktionsablaufplan erstellen. Je nachdem, welcher Mitarbeiter mit dieser Aufgabe betraut ist, kann der Plan entsprechend variieren. Hilfreich bei der Produktionsablaufplanung wäre daher ein Werkzeug in Form einer Software, welche innerhalb von kurzer Zeit einen optimalen Produktionsablaufplan für einen Produktionstag erstellen kann. Auf dem Markt gibt es bisher nur Planungswerkzeuge, die kaum flexibel sind, wie zum Beispiel für Stanzautomaten, deren Durchlaufzeiten sowie die Art des Stanzgutes konstant bleiben. Änderungen sind bei diesen nur begrenzt durchführbar. Durch die große Auftragsvielfalt bei C. Jentner ist ein hohes Maß an Flexibilität des Planungswerkzeuges gefragt. Daher wurde in Zusammenarbeit mit dem Steinbeis-Transferzentrum „Modellierung und Optimierung“ das Projekt „CPLEX- basierte Produktionsablaufplanung“ ins Leben gerufen. Das Projekt startete im Juli 2020 mit ersten Recherchen zu veröffentlichten mathematischen Modellen, welche ein ähnliches Problem bereits abbilden und lösen können. Es wurde das FJSP-Modell von Ziaee ([1], S. 95-99) ausgewählt und auf die bestehenden Verhältnisse bei

1 C. Jentner GmbH, Pforzheim
2 Steinbeis-Transferzentrum „Modellierung und Optimierung technischer Systeme“ und Hochschule Pforzheim

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

C. Jentner angepasst und erweitert. Ziel des Projektes ist mit Hilfe dieses modifizierten Modells eine Optimierung der Produktionsablaufplanung in der manuellen Gestellgalvanik bei C. Jentner zu realisieren.

1.1 Galvanik

In diesem Kapitel werden zunächst kurz die chemischen Grundlagen der Galvanotechnik erklärt. Des Weiteren wird auf die Gestellgalvanik bei C. Jentner eingegangen.

1.1.1 Galvanisches Beschichten

In der Galvanik wird sich zunutze gemacht, dass wässrige Lösungen von Salzen, Säuren und Basen elektrischen Strom leiten. Durch Wanderung der Ionen kommt es zu einem Stromtransport. Wenn nun das wandernde Ion ein Metallion ist und auf eine Elektrode trifft, kann sich das Metallion beim Entladen auf der Elektrode als reines Metall abscheiden. Diesen Vorgang bezeichnet man als galvanisch Beschichten ([2], S.319). Der zu überziehende Gegenstand fungiert als Kathode. Er wird mit dem Material der Anode, die aus Metall in fester Form, wie zum Beispiel Kupfer, Silber oder Nickel besteht, überzogen.

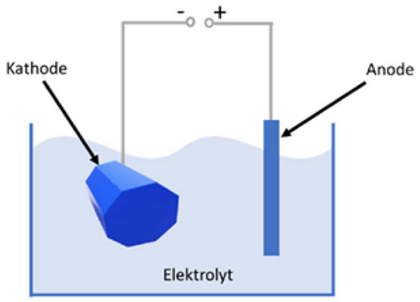


Bild 1: Galvanisches Bad mit Gleichstrom-Spannungsquelle, Kathode und Anode

Es gibt für den Prozess des Galvanisierens mehrere chemische Behandlungsbäder, die verwendet werden. Diese umfassen das Reinigen, das tatsächliche Galvanisieren und das Spülen ([2], S.320). Die Eigenschaften des Überzuges können durch unterschiedliche Reihenfolgen, Stromstärken und Operationsdauern in den galvanischen Bädern beeinflusst werden.

1.1.2 Gestellgalvanik bei C. Jentner

Man unterscheidet zwischen Trommelgalvanik, Bandgalvanik und Gestellgalvanik. Bei der Bandgalvanik werden zum Beispiel Drähte oder Stanzbänder in Durchlaufanlagen, welche durch Elektrolyt-Bäder führen, galvanisiert. Bei der Trommelgalvanik werden kleinere Werkstücke aufgrund ihrer Größe als Schüttgut in große Trommeln, die in große Elektrolyt-Becken getaucht werden, galvanisiert. Bei der Gestellgalvanik werden die Werkstücke auf Warengestelle gesteckt bzw. aufgehängt. Bei C. Jentner sind die Werkstücke zum Beispiel Ringe, Ketten, Armbänder, Schleifringe, OP-Pinzetten, Endkappen, Schrauben, Schlüssel oder Steckverbindungen. Je nach Größe kann ein Warengestell 1 bis etwa 500 Werkstücke enthalten. Folgende Abbildung (Bild 2) zeigt jeweils ein Warengestell mit Schraubverbindungen, Endkappen für ein Kordelarmband und OP-Besteck.

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

Bild 2: Warengestell mit Schraubverbindungen, Endkappen für ein Kordelarmband, OP-Besteck (v.l.n.r.)

Ein Kundenauftrag kann aufgrund seines Umfanges mehrere Warengestelle umfassen. Diese durchlaufen dann dieselben Prozessschritte wie Reinigen, Spülen, Beschichten mit dem gewünschten Metall (Kupfer, Nickel, Silber, Gold usw.), Spülen und Trocknen mit denselben Prozesszeiten.
Die Prozesszeiten der verschiedenen Aufträge können sehr unterschiedlich sein. Das Reinigen beträgt durchschnittlich 1- 2 Minuten. Beim Beschichten sind Verweilzeiten von einer Minute bis weit über zwei Stunden keine Seltenheit. Diese starke Variation beim Beschichten beruht auf den technischen Funktionen der Werkstücke. Beispielsweise erhöhen sehr dicke Silberschichten (~ 50- 100 µm) auf Aluminium und sehr dünne Goldschichten (~ 0,15- 0,5 µm) auf Eisenwerkstoffen die elektrische Leitfähigkeit. Auch im Schmuckbereich können sich dickere Schichten als nützlich erweisen, da trotz der natürlichen Abrasion die Schicht länger bestehen bleibt. Die Warengestelle werden bei C. Jentner von den Mitarbeitern durch den gesamten Produktionsprozess entlang der sogenannten Galvanikstraße (siehe Bild 3) transportiert und manuell in die Bäder getaucht und wieder herausgehoben. Diese Transportzeiten können je nach den örtlichen Begebenheiten (z.B. Entfernung der Bäder) 10 bis 40 Sekunden dauern.

Bild 3: Zwei Galvanikstraßen bei C. Jentner

2 Mathematisches Modell

Für die Beschreibung der Prozesse in der Galvanik-Anlage bei C. Jentner wurde das Modell von Ziaee ([1], S. 95-99) ausgewählt, welches ein Flexible-Job-Shop-Problem beschreibt. Unter Flexible-Job-Shop-Modellen versteht man mathematische Modelle für die Belegungsplanung mit einer gegebenen Anzahl an Aufträgen. Jeder Auftrag besteht jeweils aus einer spezifischen Abfolge von Operationen, die eingehalten werden muss. Jede Operation wird auf eine Ressource eingelastet. Dafür stehen mehrere

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

gleichartige Ressourcen zur Verfügung. Des Weiteren sind den Operationen spezifische Operationsdauern zugeordnet. Im Kapitel 2.1 werden Teile des ursprünglichen Modells von Ziaee vorgestellt und in 2.2 die Anpassungen, welche benötigt wurden, um die Prozesse bei C. Jentner noch detaillierter zu beschreiben.

2.1 Mathematische Formulierung des Modells

Für das Modell wurden mehrere Annahmen getroffen. Erstens sollen alle Aufträge unabhängig voneinander sein und die gleiche Priorität haben. Zweitens soll eine Operation nur an einer Ressource und nicht an mehreren gleichzeitig stattfinden können. Des Weiteren werden in der ursprünglichen Modell-Formulierung Transport- und Bestückungszeiten nicht berücksichtigt. Dieser Punkt wird in Kapitel 2.2 angepasst.

2.1.1 Parameter

Die Parameter werden einerseits durch die Auftragslage am betreffenden Produktionstag als auch durch die bestehenden Verhältnisse in der Galvanikanlage vor Ort bestimmt.

Tabelle 1: Parameter des Ziaee-Modells

Parameter	**Beschreibung**	**Wertebereich**
n	Anzahl der Aufträge	$n \in \mathbb{N}$
i, i'	Index eines Auftrages	$i, i' \in \{1, \dots, n\}$
m	Anzahl der Ressourcen	$m \in \mathbb{N}$
k, k'	Index einer Ressource	$k, k' \in \{1, \dots, m\}$
J_i	Anzahl der Operationen für Auftrag i	$J_i \in \mathbb{N}$
A_{ij}	Menge an Ressourcen auf denen Operation j von Auftrag i stattfinden kann	$A_{ij} \in \{1, \dots m\}$
t_{ijk}	Operationsdauer der Operation j von Auftrag i an Ressource k	$t_{ijk} \in \mathbb{R}^+$
M	hinreichend große Zahl (dient zur Aktivierung bzw. Deaktivierung von Gleichungen bzw. Ungleichungen)	$M \in \mathbb{R}^+$

2.1.2 Variablen

Das Modell ist ein MILP-Modell („mixed integer linear program“). Das bedeutet, dass in dem Modell ganzzahlige und auch kontinuierliche Variablen vorkommen und sowohl die Zielfunktion als auch die Gleichungen und Ungleichungen linear sind. Die Werte der Variablen in der folgenden Tabelle werden innerhalb ihrer definierten Wertebereiche durch die Optimierung bestimmt.

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

Tabelle 2: Variablen des Ziaee-Modells

Variablen	**Beschreibung**	**Wertebereich**
c_{max}	Produktionsspanne	$c_{max} \in \mathbb{R}^+$
c_{ijk}	Fertigstellungszeit von Operation j von Auftrag i an Ressource k	$c_{ijk} \in \mathbb{R}^+$ $\forall i, \forall j \leq J_i, k \in A_{ij}$
x_{ijk}	Operation j von Auftrag i wird an Ressource k durchgeführt oder nicht $x_{ijk} = \begin{cases} 1, (i,j) findet\ an\ k\ statt \\ 0, (i,j) findet\ nicht\ an\ k\ statt \end{cases}$	$x_{ijk} \in \{0,1\}$ $\forall i, \forall j \leq J_i, k \in A_{ij}$
$y_{iji'j'}$	Zeitliche Reihenfolge der Operationen j von Auftrag i und der Operation j' von Auftrag i' mit $i < i'$ $y_{iji'j'} = \begin{cases} 1, & (i',j')\ vor\ (i,j) \\ 0, & (i',j')\ nach\ (i,j) \end{cases}$ Voraussetzung: (i,j) und (i',j') werden an derselben Ressource k durchgeführt ($x_{ijk} = 1$ und $x_{i'j'k} = 1$)	$y_{iji'j'} \in \{0,1\}$ $\forall i, \forall j \leq J_i, \forall i' > i, \forall j' \leq J_{i'}$

2.1.3 Nebenbedingungen

Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung der Produktionsspanne c_{max}. Die Nebenbedingung (2) gewährleistet, dass sich zwei aufeinanderfolgende Operationen zeitlich nicht überschneiden. Die folgende Operation darf frühestens starten, wenn die vorhergehende abgeschlossen ist (Not-earlier-than-Bedingung).

$$\left(\sum_{k' \in A_{ij}} c_{ijk'}\right) - \left(c_{i(j+1)k} - t_{i(j+1)k}\right) \leq M \cdot \left(1 - x_{i(j+1)k}\right) \qquad \forall\ i, \forall\ j \leq J_i, k\ \in A_{i(j+1)}, \tag{2}$$

Die weiteren Nebenbedingungen des Ziaee-Modells können der Quelle [1], S. 96 entnommen werden.

2.2 Anpassung des Modells auf C. Jentner

Die Aufträge:
Im Modell wird jedes Warengestell als gesonderter Auftrag betrachtet. Somit werden Kundenaufträge, welche auf mehrere Warengestelle aufgeteilt werden, im Modell als mehrere Aufträge abgebildet.

Die Operationen:
Die Operationen in der Produktion bei C. Jentner beinhalten das Be- und Entstücken, die Tauchgänge in den jeweiligen Bädern und das Trocknen der Warengestelle in den Trocknern. Im ursprünglichen Modell werden die Transportvorgänge zwischen den Ressourcen mit Begründung ihrer kurzen Dauer als vernachlässigbar betrachtet. Bei C. Jentner sind jedoch die Transportzeiten, die auch das Absenken und Herausheben der Warengestelle umfassen, zeitlich nicht vernachlässigbar, und sie können je nach den örtlichen Begebenheiten (Entfernung der Ressourcen) 10 bis 40 Sekunden dauern. Daher wurde hier zwischen jeder der oben genannten Operationen eine Transportoperation eingefügt.

Die Ressourcen:
Die Ressourcen umfassen in der betreffenden Galvanikanlage bei C. Jentner die Bestückungstische (Operationen Be- und Entstücken), die einzelnen Bäder der Galvanikstraße, die Trockner und die Mitarbeiter, die für die Transportoperationen zuständig sind. Diese werden im Folgenden als Transport-

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

ressourcen bezeichnet. Die Mitarbeiter an den Bestückungstischen werden nicht wie die Transportmitarbeiter extra als Ressource betrachtet, sondern als Einheit mit dem jeweiligen Bestückungstisch (untrennbar).

Die Operationsdauern:
Das ursprüngliche Modell sieht feste Operationsdauern vor, die eingehalten werden müssen. Das Modell wurde so angepasst, dass sich die Operationsdauern in definierten, spezifischen Intervallen bewegen dürfen. Diese Intervalle können je nach Auftrag und Operation variieren. Die Operationsdauer beim Spülen darf etwa in einem größeren Rahmen variieren als jene in einem elektrolytischen Bad, da sonst die technisch geforderten Eigenschaften der Werkstücke ungünstig verändert werden können. Hierfür wurde der Parameter t_{ijk} in eine Variable $t_{ijk} \in \mathbb{R}^+$ umgewandelt und für jeden Auftrag und jede Operation zwei neue Parameter t^{lo} und t^{up} eingeführt.

Tabelle 3: Ergänzung zu Parameter

Parameter	**Beschreibung**	**Wertebereich**
t_{ij}^{lo}	Untere Zeitgrenze für Operation (j,i)	$t_{ij}^{lo} \in \mathbb{R}^+$
t_{ij}^{up}	Obere Zeitgrenze für Operation (j,i)	$t_{ij}^{up} \in \mathbb{R}^+$

Mit Hilfe dieser beiden Parameter wurden zwei neue Schranken hinzugefügt. Diese beschränken die Variable t_{ijk} nach oben bzw. unten.

$$t_{ijk} \geq t_{ij}^{lo} \qquad \forall\, i, \forall\, j \leq J_i \tag{9}$$

$$t_{ijk} \leq t_{ij}^{up} \qquad \forall\, i, \forall\, j \leq J_i \tag{10}$$

Ein zweite Änderung des Modells stellt das Hinzufügen einer weiteren Nebenbedingung dar. Hintergrund ist, dass es zwischen den Bäderressourcen einerseits keine Ablagefläche für Warengestelle gibt und andererseits aus produktionstechnischen Gründen die Operationen eines Auftrages zeitlich nahtlos aneinanderknüpfen müssen. Um die Produktion bei C. Jentner zutreffender abbilden zu können, wurde dem Modell zusätzlich zur Not-earlier-than-Bedingung (2) die Bedingung (2.1) hinzugefügt. Zusammen bilden sie eine No-wait-Bedingung.

$$\left(\sum_{k' \in A_{ij}} c_{ijk'}\right) - \left(c_{i(j+1)k} - t_{i(j+1)k}\right) \geq -M \cdot \left(1 - x_{i(j+1)k}\right) \qquad \forall\, i, \forall\, j \leq J_i, k \in A_{i(j+1)} \tag{2.1}$$

Diese Bedingung ist in Bild 4 veranschaulicht. Betrachtet wird hier die zeitliche Reihenfolge zweier aufeinanderfolgender Operationen *j* und *j+1*. Die Startzeit der Operation *j+1*, die sich aus der Differenz der Fertigstellungszeit und der Bearbeitungszeit ergibt, muss der Fertigstellungszeit der Operation *j* entsprechen.

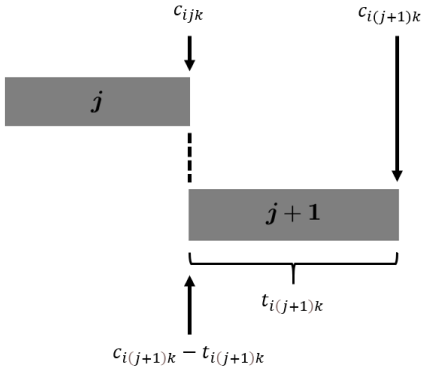


Bild 4: Anschauliche Bedeutung NB (2) und NB (2.1)

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

2.3 Implementierung des Modells

Ziel ist es mit Hilfe des mathematischen Modells eine Software für die tägliche Produktionsablaufplanung zu erstellen, welche als Input die Parameter der jeweiligen Aufträge für den jeweiligen Produktionstag erhält und dann mittels einer Optimierungssoftware und eines Solvers einen Produktionsplan für den Tag liefert. Solver sind Computerprogramme, welche Optimierungsprobleme mit numerischen Methoden lösen können. Für die Lösung des modifizierten MILP-Problems von Ziaee wurde der kommerzielle Solver CPLEX[3] von IBM verwendet. Dieser verendet unter anderem Methoden wie den Simplex-Algorithmus und das Branch and Bound-Verfahren. Bei diesem wird die Menge aller möglichen Lösungen eines Problems in Teilmengen aufgespalten („Branching“). Dabei werden diejenigen Teilmengen ausgeschlossen, die eine optimale Lösung sicher nicht enthalten. Die Überprüfung, ob eine solche Teilmenge eine gesuchte optimale Lösung enthalten kann, geschieht über Schranken („Bounds“). Der Solver CPLEX gehört zu den drei leistungsfähigsten Solvern für MILP-Probleme ([3], S.1928). Zur Implementierung des Modells wurde IBM ILOG CPLEX Optimization Studio[4] (Version 20.1.0) und als Modelliersprache OPL (Optimization Programming Language) verwendet.

3 Problemspezifisches Lösungsverfahren

3.1 Lange Berechnungszeiten

Für die Berechnungen des Modells wurde ein Notebook mit einem i5-Prozessor, 4 Kernen, einer Grundtaktfrequenz von 2,4 GHz und die Standardeinstellung von einem CPU-Thread für den Solver verwendet. Als Erstes wurde das Modell anhand eines historischen Produktionstages von C. Jentner von Beginn des Jahres 2021 getestet. Dieser Tag wurde so ausgewählt, dass er einen typischen Produktionstag darstellt. An diesem Tag wurden 48 Warengestelle bearbeitet und insgesamt 450 Operationen auf 40 Ressourcen verteilt. Das erhoffte Ziel hierbei war, mittels der Optimierung vom Solver einen Produktionsplan mit einer Produktionsspanne berechnet zu bekommen, welche die tatsächliche Produktionsspanne an diesem Tag unterschreitet. Bei der Berechnung wurde jedoch festgestellt, dass der Solver außerordentlich viel Zeit benötigt, um das Optimierungsproblem zu lösen. Die obere Grenze von einer Stunde Lösungszeit sollte für den Einsatz in der täglichen Produktionsablaufplanung nicht überschritten werden. Die Berechnungen für diesen Produktionstag wurden nach 8 Stunden Lösungszeit manuell abgebrochen und das Zwischenergebnis des Solvers hatte eine Optimalitätslücke von 96%. Diese Lücke gibt eine konservative Schätzung des relativen Abstands zwischen dem Wert der besten gefundenen Lösung und dem unbekannten Optimum an. Die vom Solver gefundene, noch nicht sicher optimale, aber zulässige Lösung lieferte einen Produktionsablaufplan, dessen Produktionsspanne rund eine Stunde weniger umfasste als die tatsächliche Produktionsspanne an diesem Tag.

3.2 Reduktion der Lösungszeit

Ein Grund für die langen Lösungszeiten ist die Modellgröße. Daher wurden Methoden zur Verkleinerung jener benötigt. Es wurde ein mehrstufiges problemspezifisches Lösungsverfahren auf Basis von Dekompositions- und Aggregationstechniken entwickelt, um die Modellgröße und entsprechend damit auch die Lösungszeit zu reduzieren. Zusätzlich wurde eine Methode des Symmetriebruches verwendet, der die Größe der Lösungsmenge für den Solver reduzieren soll. Bild 5 zeigt einen Überblick

[3] Ibm.com. 2021. CPLEX Optimizer. [online] Available at: <https://www.ibm.com/de-de/analytics/cplex-optimizer> [Accessed 1 October 2021].

[4] Ibm.com. 2021. ILOG CPLEX Optimization Studio - Überblick. [online] Available at: <https://www.ibm.com/de-de/products/ilog-cplex-optimization-studio> [Accessed 1 October 2021].

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

über den Ablauf des Verfahrens. Das Modell wird von links nach rechts auf mehreren Stufen vereinfacht. Dann wird die Lösung des am stärksten vereinfachten Modells verwendet.
Die Variablenwerte der Entscheidungsvariablen x und y werden benötigt, um einen Teil der Lösung auf der nächsten Stufe vorwegzunehmen und damit die Lösungszeit klein zu halten. Dieser Vorgang wird bis zur Lösung des Modells in seiner ursprünglichen, detaillierten Form wiederholt.

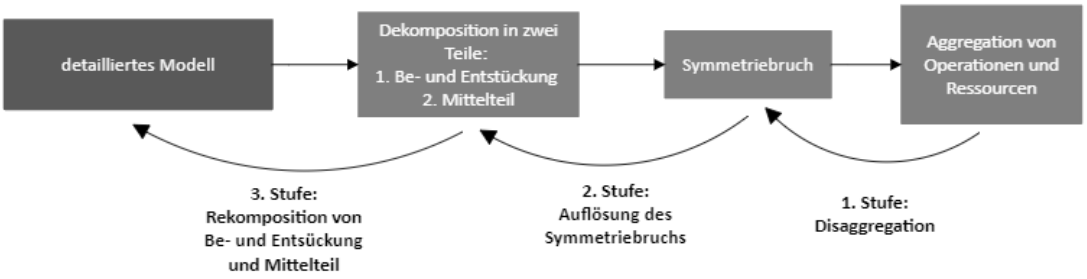


Bild 5: Ablauf problemspezifisches Lösungsverfahren

Der „Proof of Concept“ des mehrstufigen problemspezifischen Lösungsverfahrens wurde anhand eines Beispielproblems mit Daten aus der Praxis durchgeführt. Dieses Beispielproblem beinhaltet zehn Warengestelle, die insgesamt vier unterschiedlichen Aufträgen angehören. Zwei Warengestelle gehören zu einem übergeordneten Auftrag, wenn sie dieselbe Operationsreihenfolge und dieselben festgelegten Operationsdauern haben und an denselben Ressourcen eingelastet sind. Der Solver löste das Problem mit diesen zehn Warengestellen und den zugehörigen Daten in einer Zeit von 5030,97 s. Die optimale Produktionsspanne wurde mit 11 226 s bestimmt.

Im Folgenden wird die Anwendung des problemspezifischen Lösungsverfahren auf dieses Beispielproblem beschrieben. Der erste Schritt des Verfahrens basiert auf einer Dekomposition der Operationen und Ressourcen in zwei Bereiche: Zum einen der Bereich, der das Be- und Entstücken mit den zugeordneten Ressourcen enthält, und zum anderen der „Mittelteil“ mit den restlichen Operationen zwischen Be- und Entstücken und den zugehörigen Ressourcen. Die Motivation für die Dekomposition ist, dass im Be- und Entstücken-Teil viele Symmetrien vorhanden sind. Symmetrie bedeutet hier, dass eine Operation an mehreren Ressourcen durchgeführt werden kann und somit mehrere gleichwertige Lösungen existieren. Indem zunächst einmal nur der „Mitteteil“ betrachtet wird, kann der Lösungsraum für den Solver verkleinert werden.

In der folgenden Übersicht (Bild 6) sind die Parameter für einen der vier Aufträge abgebildet. Er beinhaltet 15 Operationen (Spalte 2) und deren Beschreibungen (Spalte 1). In der ersten Zeile der Tabelle sind die für den Beispielauftrag benötigten Ressourcen aufgelistet. Eine Operation kann an einer Ressource durchgeführt werden, wenn ein Zahlenwert in der betreffenden Zelle steht. Dieser entspricht der Operationsdauer in Sekunden.

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

Tätigkeit	Operations-Nr.	E1	E2	1303	1308	1309	1312	T1	T2	T3
Aufhängen	1									
Transport	2	40	40							
1303Entfettung	3			60						
Transport	4	40	40							
1308/1309Silber	5				5400	5400				
Transport	6	40	40							
1303Entfettung	7			60						
Transport	8	40	40							
1312Rhodium	9						80			
Transport	10	40	40							
1303Entfettung	11			60						
Transport	12	40	40							
Trocknung	13							600	600	600
Transport	14	40	40							
Abhängen	15									

Bild 6: Parameter Auftrag Beispielproblem

Für den Mittelteil wird zuerst der Symmetriebruch durchgeführt: Operationen, die potentiell an mehr als einer Ressource stattfinden können, werden künstlich in mehrere, gleichlange Operationen aufgeteilt, die sequentiell jeweils an einer der möglichen Ressourcen stattfinden. Dieser Symmetriebruch wurde für den Beispielauftrag für die Operation 1308/1309Silber und die Trocknung durchgeführt (rote Umrandung Bild 6). Diese wurden aufgeteilt in 1308Silber und 1309Silber und TrocknungT1-TrocknungT3 (rote Umrandung Bild 7).

Tätigkeit	Operations-Nr.	E1	E2	1303	1308	1309	1312	T1	T2	T3
Transport	1	40	40							
1303Entfettung	2			60						
Transport	3	40	40							
1308Silber	4				2700					
1309Silber	5					2700				
Transport	6	40	40							
1303Entfettung	7			60						
Transport	8	40	40							
1312Rhodium	9						80			
Transport	10	40	40							
1303Entfettung	11			60						
Transport	12	40	40							
TrocknungT1	13							200		
TrocknungT2	14								200	
TrocknungT3	15									200
Transport	16	40	40							

Operations-Nr.	AG1	1308	1309	T1	T2	T3
1	140					
2		2700				
3			2700			
4	320					
5				226.66		
6					226.66	
7						226.66

Bild 7: Auftrag Beispielproblem nach Symmetriebruch (l.) und nach Aggregation (r.)

Auf diesen Mittelteil mit Symmetriebruch wurde ein Aggregationskonzept angewandt: Aufeinanderfolgende Operationen werden zu einer übergeordneten Operation zusammengefasst. Durch die Kopplung von Operationen und Ressourcen können gleichzeitig die den Operationen zugeordneten Ressourcen zu einer übergeordneten Ressource gebündelt werden. Für die Transportoperationen wird hier eine wichtige Annahme getroffen: Es gibt für ihre Durchführung keine Kapazitätsbeschränkung. Die Transportoperation verknüpft nämlich immer zwei Operationen mit den restlichen Ressourcen. Damit diese wiederum in Blöcke zusammengefasst werden können, wird also die Annahme getroffen, dass es genügend Transportressourcen für die Transportoperationen gibt. Die Transportressourcen werden für die Aggregation aus der Menge der Ressourcen herausgenommen. Die Transportzeiten werden auf die Bearbeitungszeit der jeweils vorigen oder nächsten Operation addiert. So erhält man ein Modell mit weniger Ressourcen als das ursprüngliche Modell. Durch die Aggregation und den Symmetriebruch kann jede Operation nur noch an einer Ressource durchgeführt werden. Damit sind die Werte der Binärvariablen x eindeutig besetzt. Für den Beispielauftrag wurden die Operationen 6 bis 11 zu einer Operation und die Ressourcen 1303 und 1312 zur Ressource AG1 gebündelt (siehe Bild 7 rechts). Für das gesamte Beispielproblem konnte die Zahl der Ressourcen von 34 auf 7 und die Zahl der Operationen von 122 auf 51 reduziert werden. Der Solver löst dieses aggregierte Modell des Mittelteils mit Symmetriebruch in 0,08 s. Die Werte der Binärvariablen y aus dieser Lösung, das heißt die

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

Reihenfolgen der zusammengefassten Blöcke, werden für den nächsten Schritt der Disaggregation (siehe Stufe 1, Bild 5) verwendet.

Bei der Rückführung zur Lösung des detaillierten Modells wird das Hauptaugenmerk auf die Variablen x und y gelegt. Die anderen Variablen werden auf jeder Stufe neu vom Solver bestimmt.
Auf der Stufe 1 wird die Bündelung der Operationen und Ressourcen rückgängig gemacht und die Transportressourcen wieder hinzugefügt. Eine Teilmenge der y-Werte kann durch die Lösung des aggregierten Modells mit Symmetriebruch abgeleitet werden. Diese gehen als fixierte Werte in das Modell ein. Der Solver muss also noch die Zuordnung der Transportoperationen zu den Transportressourcen festlegen (x-Werte) und die Reihenfolge der Transportoperationen an der jeweiligen Transportressource (y-Werte). Der Solver löst das Modell auf dieser Stufe in einer Zeit von 5,09 s.

Auf der nächsten Stufe wird der Symmetriebruch des Mittelteils rückgängig gemacht und damit die Anzahl der Operationen reduziert. Für den Auftrag aus dem Beispielproblem bedeutet es, dass die Operationen 4 und 5 und 13 bis 15 (siehe Bild 7) zu den Operationen 5 und 13 aus Bild 6 umgewandelt werden. Es wird wieder eine Teilmenge der x- und y-Werte aus der vorherigen Stufe als fixierte Variablen verwendet. Auf dieser Stufe muss der Solver die Zuordnung der Operationen zu den Ressourcen, auf die der Symmetriebruch angewendet wurde, und die Reihenfolge der Operationen an diesen Ressourcen bestimmen. Der Solver braucht 0,69 s, um das Modell zu lösen.
Die letzte Stufe stellt eine Rekomposition der Modellteile Be- und Entstücken und des Mittelteils dar. Hierfür wird die Zuordnung der Ressourcen und die Reihenfolge an den Ressourcen aus der Lösung des Mittelteils verwendet (fixierte x- und y-Werte). Der Solver muss hier noch die Zuordnung der Bestückung- bzw. Entstückungsoperationen zu den Bestückungstischen und die Reihenfolge an diesen bestimmen. Hier beträgt die Lösungszeit 0,48 s. Diese Lösung ist eine zulässige Lösung des Gesamtproblems.

Durch Summation der jeweiligen Lösungszeiten der einzelnen Schritte des problemspezifischen Lösungsverfahrens erhält man eine gesamte Lösungszeit von 6,34 s. Die Produktionsspanne, die auf dieser letzten Stufe vom Solver bestimmt wurde, beträgt 11 226 s und ist damit identisch mit der optimalen Lösung des ursprünglichen Modells. Der Vergleich zur Lösungszeit des Modells ohne Durchführung des mehrstufigen Lösungsverfahrens, die bei 5030,97 s lag, zeigt eine Reduzierung der Lösungszeit auf 0,126 % des ursprünglichen Wertes. Damit ist der erste Test des Lösungsverfahrens erfolgreich verlaufen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt wurde das mathematische Modell von Ziaee auf die Produktionsverhältnisse bei C. Jentner angepasst. Da die Modellgröße für einen durchschnittlichen Produktionstag zu einer zu langen Lösungszeit führt, wurde ein problemspezifisches Lösungsverfahren basierend auf Dekomposition, Symmetriebruch und Aggregation entwickelt, um die Modellgröße zu verkleinern und damit die Lösungszeit zu reduzieren. Dieses Konzept wurde erfolgreich auf ein kleiner dimensioniertes Beispielproblem angewandt. Im weiteren Verlauf des Projektes soll es noch auf einige Modellgrößen, die einem realen Produktionstag entsprechen, angewandt werden, um auch hier die Konzeptgüte und Lösungszeit zu prüfen. Dabei ist ein wichtiges Kriterium eine Lösungszeit von höchstens einer Stunde zu erreichen. Falls diese weiteren Test erfolgreich verlaufen, soll das angepasste Modell mit dem mehrstufigen Lösungsverfahren in der Praxis für die tägliche Produktionsablaufplanung eingesetzt werden. Falls die Tests zeigen, dass das aktuelle Lösungsverfahren noch nicht ausreicht, um große Modelle in der gewünschten Zeit zu lösen, muss das Lösungsverfahren mit weiteren Techniken zur Reduktion der Lösungszeit kombiniert werden.

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

5 Literatur

[1] Ziaee, Mohsen (2018). A Mixed Integer Linear Programming Model for Flexible Job Shop Scheduling Problem. International Journal of Mathematical and Computer Sciences 12(6): 91-95
[2] Müller, Klaus-Peter (1995). Praktische Oberflächentechnik. 3rd Aufl. Braunschweig: Vieweg.
[3] Jablonsky, Josef (2015). Benchmarks for Current Linear and Mixed Integer Optimization Solvers. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis 63(6): 1923-1928

Open Access. © 2022 A. Herdt, M. Scheidig1, C. Jentner1, G. Sand
This work is protected by copyright and/or related rights.

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03. - 11.03.2022

Bildfilter als Analysewerkzeug im Technologiesektor von Industrie 4.0

F. Albers[1], T. Bartsch[2], D. Kowalke[3], S. Sade[4]

Zusammenfassung

Der Einrichtprozess der Wasserstrahlschneidanlage erfolgt überwiegend als manueller Prozess. Die fehlende Automatisierung führt zu einem hohen Zeitverlust und der dauerhaften Anwesenheit einer Fachkraft. Dieser Umstand wird durch eine Steigerung des Automatisierungsgrades angegangen. Die Steigerung wird durch die Integration einer Umfeldsensorik und die Erstellung eines Algorithmus realisiert. Dieser erkennt die Halbzeuge im Arbeitsraum, um diese anschließend in ein CAD-Modell zu transformieren.

Stichwörter

Automatisierung, Bildverarbeitung, Industrie 4.0, Merkmalsfilter, Wasserstrahlschneiden

1 Problemstellung & Ausgangslage

Aufgrund des hohen manuellen Einrichtaufwands wird ein Algorithmus entwickelt, welcher durch Bildverarbeitung den Einricht- und Bedienungsprozess an einer Wasserstrahlschneidanlage, siehe Bild 1, optimiert. Die Optimierung führt zu einer Zeitersparnis, da der zu erstellende Algorithmus automatisiert die Halbzeuge im Arbeitsraum erkennt und diese als CAD-Datei ausgibt. Zum jetzigen Zeitpunkt müssen diese Dateien von Hand, mit erheblichem Zeitaufwand, erstellt werden.
Eine Umfeldsensorik, in Form einer USB-Kamera, wurde zur Bildgenerierung über dem Maschinenbett implementiert. Die damit erzeugten Bilder stellen die Basis dieses Artikels dar und sind der Ausgangspunkt für alle Manipulationsoperatoren.
In einem früheren Abschnitt des Projektes wurden verschiedene lineare und nichtlineare Merkmalsfilter hinsichtlich ihres Aufbaus und mathematischen Funktionsprinzips untersucht. Der Fokus der Betrachtung war die Reduktion eines Bildes auf seine Kanten, da diese zu den auffälligen Bildmerkmalen gehören. Diese bilden eine geeignete Basis zum Erstellen eines Polygonszuges [1]. Dieser Polygonzug fungiert folgend als Grundlage für das Erzeugen der CAD-Datei. Eine stetige und realgetreue Darstellung der Halbzeugkanten ist dementsprechend unerlässlich für alle Folgeschritte. Der Fokus dieses Artikels liegt in der vollständigen Identifikation der Halbzeugkanten.

1 B. Eng. Franziska Albers, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
2 Prof. Dr. –Ing. Thomas Bartsch, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
3 M. Sc. Dennis Kowalke, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
4 M. Sc. Sercan Sade, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Bild 1: Wassserstrahlschneidanlage
Quelle: [2]

1.1 Störgrößen

Der Arbeitsraum der Anlage ist ein mit metallischen Streben durchzogenes Wasserbecken. Die Streben dienen der Ablage der zu bearbeitenden Halbzeuge und haben den Nebeneffekt ein hohes Reflektionsvermögen zu besitzen. Neben den metallischen Streben ist das Wasserbecken selbst eine Störgröße, da dieses ebenfalls eine Reflektionsquelle darstellt. Die Reflektionserscheinungen, sowohl der Streben wie auch der Wasseroberfläche, sind abhängig von dem Wasserstand im Arbeitsraum, wie auch von den umliegenden Lichtquellen. Zudem ist es möglich, dass die Halbzeugoberflächen durch das Wasserbecken benetzt werden. Neben den örtlichen gegebenen negativen Einflussgrößen spielt auch die Werkstoffauswahl eine Rolle. Die Anlage ist in der Lage diverse nichtmetallische und metallische Werkstoffe zu bearbeiten. Dabei sind beispielsweise Werkstoffdicken von:

- 50 mm bei gehärteten Stählen
- 120 mm bei Nichteisenmetallen
- 140 mm bei Verbundstoffen & Granit/Marmor

schneidbar [3]. Die Vielfältigkeit der Werkstoffe zeigt sich auch in dem Reflektionsverhalten der Halbzeuge. Je nach Werkstoffauswahl ist folglich die Intensitätsverteilung des Bildes unterschiedlich. Insgesamt ergeben sich somit folgende Störgrößen:

- Variable Beleuchtungssituation
- Reflexion Wasseroberfläche
- Reflexion Lamellen
- Wasserstand im Arbeitsraum
- Werkstoffdiversität
- Benetzung der Halbzeuge

1.2 Filterergebnis vor der Algorithmenoptimierung

Bei der Betrachtung der verschiedenen Merkmalsfilter wurden verschiedene Filter wie Prewitt, Sobel, Laplace, Canny, Roberts-Cross und Kirsch untersucht. Bei einem Vergleich anhand der Gesichtspunkte:

- Programmumfang
- Programmkomplexität
- Störanfälligkeit
- Genauigkeit

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

gewann der Kirschfilter. Nicht nur die eigens durchgeführte Versuchsreihe, sondern auch aktuelle Studien, im Bereich der Medizin und der dynamischen Kantendetektion, verweisen auf die Stärken des Kirschoperators [4-6]. Der Operator selbst besteht aus acht Filtermasken, die in Gleichung 1 dargestellt sind. Zwischen den einzelnen Masken wird jeweils um 45 Grad weitergedreht, so dass insgesamt eine vollständige Umdrehung von 360 Grad erreicht wird. Das Grundprinzip dieses Aufbaus ist, dass je stärker ein Filter auf Kanten reagiert, desto stärker ist auch seine Richtungsabhängigkeit [7]. Die Richtungsabhängigkeit äußert sich im Winkelbereich, welcher hier pro Maske 45 Grad beträgt. Zum Vergleich besteht der Prewitt-Filter lediglich aus zwei Masken, eine für die Horizontale und eine für die Vertikale.

$$K_0 = \begin{pmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{pmatrix} \qquad K_1 = \begin{pmatrix} 5 & 5 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{pmatrix} \qquad K_2 = \begin{pmatrix} 5 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{pmatrix}$$

$$K_3 = \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ 5 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & -3 \end{pmatrix} \qquad K_4 = \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & -3 \\ 5 & 5 & 5 \end{pmatrix} \qquad K_5 = \begin{pmatrix} -3 & -3 & -3 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & 5 & 5 \end{pmatrix}$$

$$K_6 = \begin{pmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & 5 \end{pmatrix} \qquad K_7 = \begin{pmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{pmatrix} \tag{1}$$

Beim Anwenden des Kirschfilters auf eine Aufnahme des Arbeitsraumes bei Tageslicht, entsteht das Filterergebnis aus Bild 2. Das ungefilterte Bild ist in Bild 3 aufgezeigt.

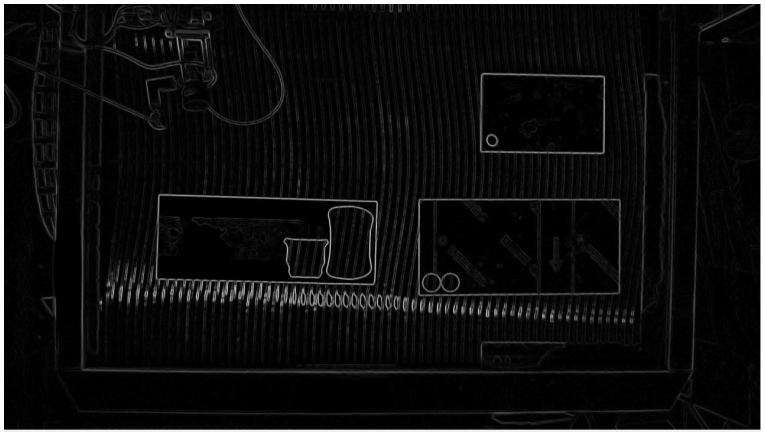


Bild 2: Filterantwort Kirschoperator bei Tageslicht
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

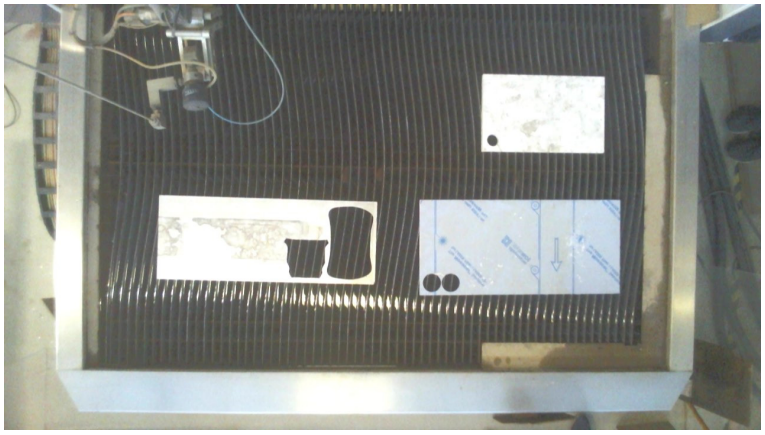


Bild 3: Arbeitsraum bei Tageslicht – ungefiltert
Quelle: Umfeldsensorik

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Die in Bild 2 dargestellte Filterantwort, zeigt die Kanten von allen Objekten, eingeschlossen Lamellen, Schneidkopf und Wasserreflexionen. Die Funktionalität des Kantenoperators ist somit gegeben und die Herausforderung besteht in der Reduktion des Merkmalsbildes auf die Halbzeuge. Auffällig ist die Verschmelzung der erkannten Halbzeugkanten mit den Störeinflüssen der Lamellen und der Spiegelungen. Ebenso zeigt die Grauwertdifferenz die Intensität einer Kante. Dem Beobachter ist es demzufolge möglich, die Kanten des Bildes zu vergleichen. Ein ähnlicher Grauton im Filterergebnis bedeutet eine ähnliche Kantenstärke. Dies dient nur der ersten Einschätzung und nicht der Weiterverarbeitung, bei dieser wird mit der Bildmatrix gearbeitet und den expliziten numerischen Grauwerten. Ziel ist eine kontrollierte Isolation der Halbzeuge vom restlichem Merkmalsbild. Diese Abtrennung der Halbzeuge ist robust zu gestalten, so dass die Veränderung der Lichtsituation, wie zum Beispiel ein verringertes Sonnenlicht, nicht zu einem Scheitern des Algorithmus führt.

2 Vorgehensweise

Die Halbzeugidentifikation ist durch ein zu erstellendes Programm zu erreichen. Die hardwaretechnische Lösung mittels Blenden, Polarisationsfilter oder weiterer Sensorik wird in diesem Artikel nicht thematisiert. Für zukünftige Betrachtungen ist dieser Zweig aber nicht ausgeschlossen. Als Programmierumgebung wird Matlab verwendet.

2.1 Bildaufbereitung vor der Filterung

Bild 3 stellt ein RGB-Bild des Arbeitsraumes dar, welches mit einer HD-USB-Webcam aufgenommen wurde. Bild 2 hingegen ist ein Graustufenbild. Der Operator ist nur auf ein Graustufenbild anzuwenden, weshalb die Reduktion des Bildtensors auf eine Bildmatrix, für diesen Anwendungsfall, notwendig ist und so automatisch das Datenvolumen verringert. Neben der Wandelung des Bildes in ein Graustufenbild, ist das Wegschneiden der Peripherie ein weiterer Bearbeitungsschritt, welcher das Datenvolumen verringert ohne, aufgabenbezogen, benötigte Information zu verlieren. Wird das Bild 3 in ein Graustufenbild überführt und zugeschnitten, ändert sich der Bildtensor von 720 x 1200 x 3, was 2.592.000 Matrixelementen entspricht, zu einer Bildmatrix von 670 x 1091. Diese Bildmatrix besteht aus 730.970 Elementen und bedeutet im Vergleich zum Eingangsbild eine Datenreduktion von 71,8 %. Das Ergebnis dieser Aufbereitung ist Bild 4 zu entnehmen. In allen folgenden Filter- und Manipulationsschritten wird das Eingangsbild zunächst wie aufgezeigt aufbereitet. Bild 4 wird im Folgenden, soweit nicht anders dargelegt, als Eingangsgröße genutzt

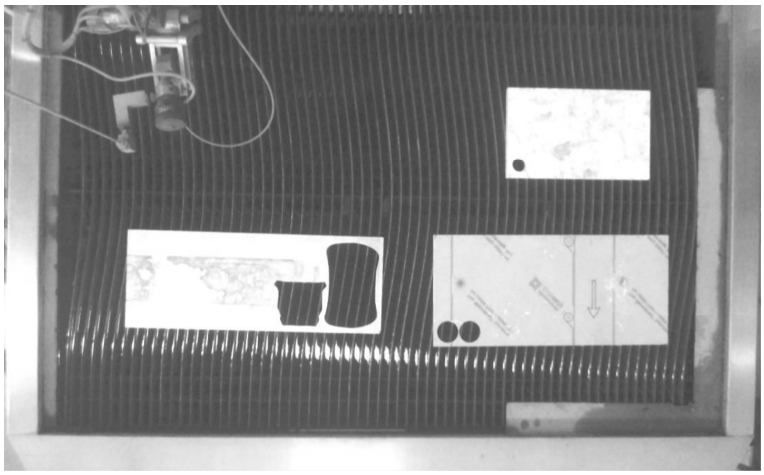


Bild 4: Aufbereitetes Eingangsbild
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2.2 Schwellwertverfahren

Das Schwellwertverfahren gehört zu den direkten Manipulationsmöglichkeiten im Bild, da aktiv Grauwerte in der Bildmatrix geändert werden. Bei einem klassischen Graustufenbild liegt der Wertebereich von 0 bis 255 zur Verfügung [7]. Bei dem Verfahren wird ein Grauwert entweder herabgesetzt, wenn er unter der Schwelle liegt oder analog beim Überschreiten hochgesetzt. Die Reduktion des Wertes ist dann bis zum Wert null möglich und ist als „Auslöschen“ zu verstehen, da der Grauwert null visuell der Farbe schwarz entspricht [7]. Durch die Verschiebung des Grauwertes nach unten bis auf null, wird analog der Grauwert beim Hochsetzen auf 255 verschoben, was die Farbe Weiß verkörpert. Durch die Anwendung des Verfahrens und der beschriebenen Manipulationen wird künstlich ein Schwarzweißbild erzeugt.
Die Herausforderung an diesem Verfahren ist das Bestimmen des richtigen Schwellwertes. Es existieren bei der Wahl des Schwellwertes drei Möglichkeiten.
Erstens der Wert liegt zu niedrig, siehe Bild 5, wodurch Graubereiche fälschlicherweise als Kante interpretiert werden. Zweitens der Wert ist zu hoch, siehe Bild 6, wodurch relevante Bildbereiche unterdrückt werden und drittens der Schwellwert ist optimal. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Halbzeuge vollständig, inklusive ihrer internen individuellen Ausschnitte, angezeigt werden.

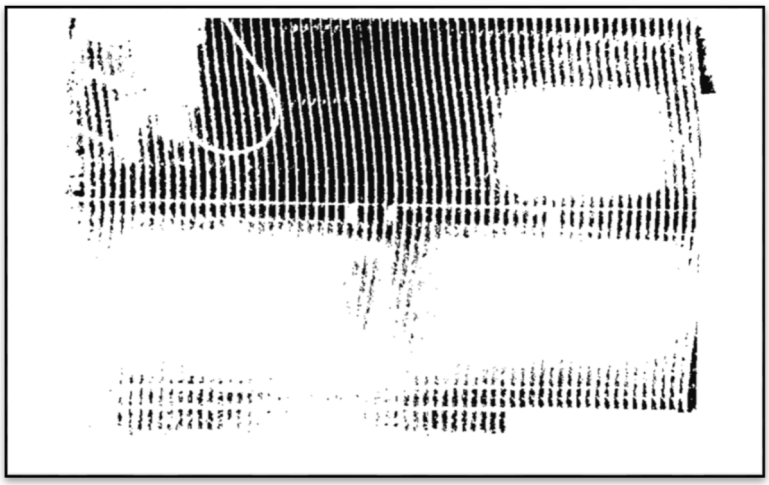


Bild 5: Grauwertmanipulation mit einem Schwellwert von 80 (äußerer Rahmen zur besseren Separation vom Hintergrund hinzugefügt)
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

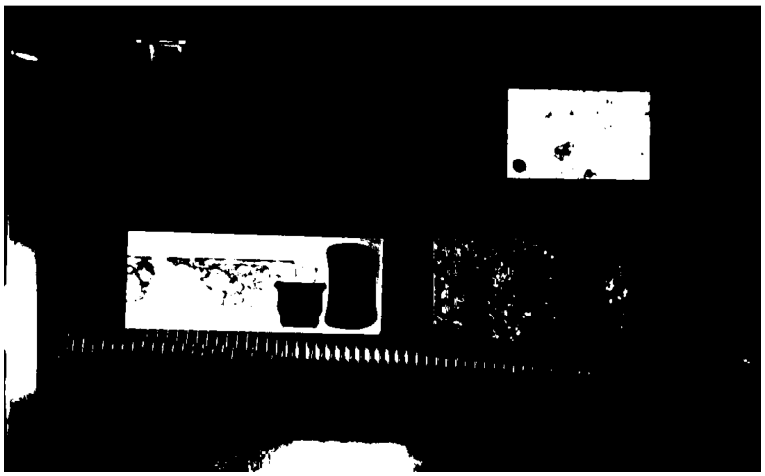


Bild 6: Grauwertmanipulation mit einem Schwellwert von 235
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Anhand von Bild 5 und Bild 6 ist ersichtlich, dass es den optimalen Schwellwert nicht gibt. Selbst bei dem zu hohen Schwellwert von 235 sind Reflexionsartefakte der Wasseroberfläche noch erkannt worden, wobei das rechte untere Halbzeug schon größtenteils unterdrückt wurde. Der perfekte Schwellwert ist daher als Kompromiss zu verstehen, bei welchem das Maximum an unnötigen Bildelementen rausgefiltert wird, ohne dabei fehlerhafte Änderungen an Halbzeugen zu verursachen. Bei der Schwellwertvariation ist der Grauwert von 166 als Optimum festgestellt worden. Diese Filterantwort ist in Bild 7 aufgezeigt. Das Bild zeigt, dass die Halbzeuge bezüglich ihrer inneren und äußeren Konturen vollständig sind.
Neben den Halbzeugen sind partielle Flächen des Schneidkopfs, der Arbeitsraumbegrenzungen und des Anschlags zu erkennen. Als weitere Störgrößen sind die Reflexionen der Lamellen und die Spiegelungen auf der Wasseroberfläche zu nennen. Die aufgezählten Gebiete, ausgeschlossen der Halbzeuge, lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe sind die statischen und die zweite Gruppe die dynamischen Elemente. Zu den statischen Elementen gehören der Schneidkopf, die Arbeitsraumbegrenzungen und der Anschlag und zu den dynamischen die Reflexionen der Lamellen und der Wasseroberfläche.

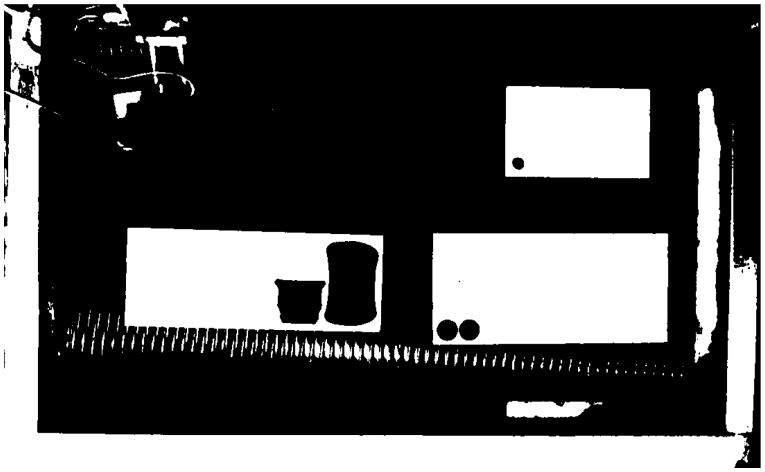


Bild 7: Grauwertmanipulation mit einem Schwellwert von 166
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

2.3 Eliminierung der statischen Elemente

Die Eigenschaft der Statik ist in diesem Kontext rein räumlich zu verstehen. Die Arbeitsraumbegrenzung inklusive dem Anschlag verschieben sich nicht. Dem Schneidkopf wird per Zwangsbedingung eine feste Position zugewiesen. Die Zwangsbindung lautet, für die nachfolgende Vorgehensweise, dass der Schneidkopf bei der Bildaufnahme in Parkposition zu stehen hat. Durch die feste Zuweisung von Positionen für die jeweiligen Elemente ist es möglich durch einfache Subtraktion diese aus der Filterantwort zu löschen. Dabei tritt die Filterantwort aus Bild 7 als Minuend auf und eine manipulierte Bildaufnahme bestehend aus allen statischen Elementen als Subtrahend. Die gewonnene Differenz besteht folglich nur noch aus den Halbzeugen und den dynamischen Elementen, siehe Bild 8.

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

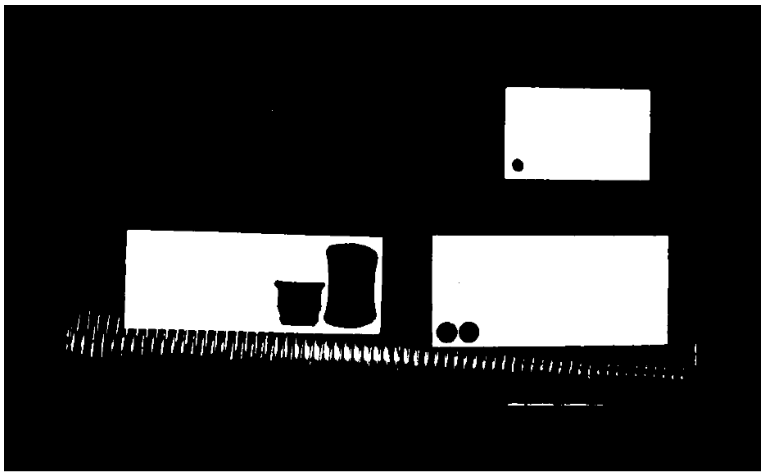


Bild 8: Ergebnis nach Eliminierung der statischen Elemente
Quelle: eigene Darstellung mittels Matlab erstellt

Die kleinen Artefakte im Umfeld des Anschlags sind durch die vorhergegangene Grauwertmanipulation entstanden und sind nicht eine unvollständige Subtraktion des Anschlags. Das Auslöschen dieser Artefakte und der dynamischen Gebiete ist der nächste Arbeitsschritt.

2.4 Eliminierung der dynamischen Elemente

Die Herausforderung der dynamischen Objekte besteht darin, dass sie nicht wie der Schneidkopf, per Zwangsbedingung statisch gestaltbar sind. Sie sind abhängig von verschiedenen Störgrößen, wie Beleuchtung oder Wasserstand, im Arbeitsraum. Dadurch ist eine allgemeine Subtraktion ausgeschlossen. Ebenso ist durch das Schwellwertverfahren aus Unterkapitel 2.2, eine weitere Manipulation der Grauwerte nicht mehr möglich, da die Bildmatrix nur noch aus Einträgen mit 255 oder 0 besteht.
Wird das Bild 8 näher betrachtet fällt auf, dass die Flächen der dynamischen Elemente gegenüber der Halbzeugflächen kleiner sind. Die dynamischen Artefakte bestehen folglich aus weniger Pixeln, was ein Unterscheidungsmerkmal darstellt. Die erstellte Eliminierung baut auf diesen Unterschied auf und filtert Flächen bestehend aus einer bestimmten Pixelanzahl heraus. Bei der Suche nach der richtigen Grenze für die Pixelanzahl wurden verschiedene Größenordnungen getestet. Das Ergebnis der Suche ergab einen Grenzwert von 201 Pixeln. Alle Flächen die kleiner gleich 201 Pixeln sind werden herausgefiltert. Das Ergebnis ist in Bild 9 abgebildet.

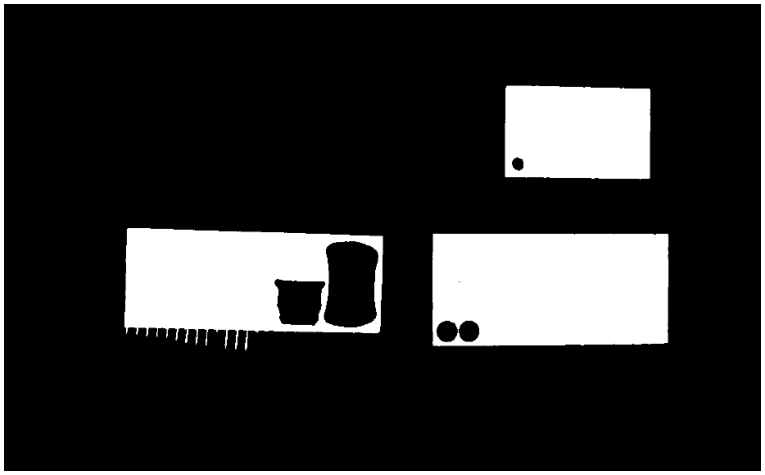


Bild 9: Eliminierung aller dynamischen Elemente mit einer Größe ≤ 201 Pixeln
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Durch diese Unterdrückung entsteht eine mögliche Fehlerquelle, da auch Halbzeuge in derselben Größenordnung unterdrückt werden würden. Wird die Struktur der Reflexionsartefakte betrachtet, fällt auf, dass es sich dabei um den Bereich zwischen zwei Lamellen oder um Reflexionen entlang der Lamellen handelt. Daraus folgt, dass die Artefakte in ihrer Fläche durch die Lamellen begrenzt sind. Da die Lamellen die Ablagefläche für das Halbzeug darstellen, ist ein Halbzeug, welches kleiner ist als der Abstand zweier Lamellen, auf dieser Anlage ohnehin ohne Vorkehrungen nicht bearbeitbar. Die Pixelgrenze von 201 ist somit praktikabel und ein tolerierbarer Fehler. Für den Sonderfall kleinerer Halbzeuge steht weiterhin die manuelle Einrichtmethode zur Verfügung. Nach der aufgezeigten Filtermethodik bleibt mit den Artefakten, die mit dem Halbzeug verschmelzen, ein Problem bestehen. Durch die vorangegangenen Arbeitsschritte liegt ein Schwarzweißbild vor, sodass numerisch keine Separation mehr möglich ist. Die Manipulation entlang des direkten Signalflusspfades ist daher nicht mehr zielführend. Aufgrund dessen wird folgend die Alternative in Form einer Parallelschaltung näher untersucht.

3 Parallelschaltung

Die zugrundeliegende Idee ist anstatt einer Bildaufnahme eine Differenzgröße zu betrachten. Im Kunstbereich, wie auch bei Bildbeschreibungen, sind die Wörter Vordergrund und Hintergrund sehr geläufig. In diesem Kapitel werden diese Bezeichnungen ebenfalls eingeführt. Im Duden ist der Hintergrund definiert als „hinterer, abschließender Teil des Blickfeldes bzw. des im Blickfeld liegenden Raums, Bereichs (von dem sich die Gegenstände abheben)“ [9]. Ein Bereich von dem sich Gegenstände abgrenzen, ist die hier genutzte Bedeutung, weshalb der Arbeitsraum fortan als Hintergrund definiert wird. Das bedeutet, wird ein Bild aufgenommen, wo kein Halbzeug im Arbeitsfeld liegt, illustriert dieses Bild den vollständigen Hintergrund. Demzufolge sind alle zu bearbeitenden Materialen, die in den Arbeitsraum gelegt werden, der Vordergrund. Damit liegt das Interesse nur am Vordergrund und Ziel ist die vollständige Eliminierung des Hintergrundes.

3.1 Eliminierung des Hintergrundes

Da der Hintergrund durch eine Aufnahme des leeren Arbeitsraumes verkörpert wird, ist der erste Schritt die Differenzbildung des vollen und leeren Arbeitsraumes. Die erhaltene Differenz ist als Vergleichsgröße zu verstehen, da alle übereinstimmenden Charakteristika ausgelöscht werden. Die Aufnahme des leeren Arbeitsraumes ist daher kurz vor dem Ablegen von Halbzeugen zu generieren, sodass die dynamischen Elemente ein Maximum an Übereinstimmung besitzen. Wird eine solche Differenz von Bild 3 erschaffen, entsteht Bild 10.

3.2 Überführung in Graustufen & Einsatz von Strukturelementen

Die erstellte Vergleichsgröße, siehe Bild 10, ist ein Bildtensor, welche durch bereits angewandte Algorithmen aus Kapitel 2 in eine Bildmatrix überführt wird. Ebenso wird das Schwellwertverfahren wieder angewendet. Anzumerken ist, dass der Schwellwert aufgrund der vorherigen Differenzbildung von 166 auf 80 angepasst wurde.

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

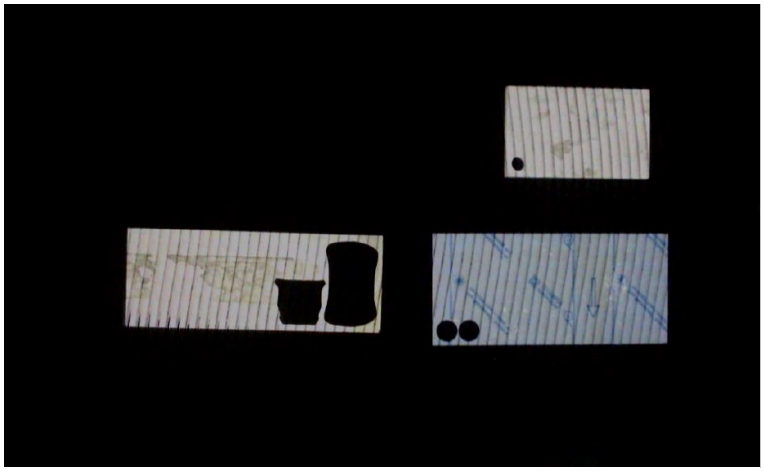


Bild 10: Ergebnis Differenzmethode
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

Die größte Herausforderung in diesem Kontext besteht in dem Schließen der lamellenförmigen Defizitstellen. Diese wird durch den Einsatz von Strukturelementen angegangen. Für diesen Anwendungsfall werden zunächst zwei Linienelemente erstellt, da diese die größte Ähnlichkeit zur Lamellenkontur besitzen. Da die Lamellen nicht linear verlaufen, werden die zwei verschieden orientiert, um die Krümmung der Lamellenkontur anzunähern, siehe Bild 11. Lediglich im vorderen rechten Halbzeug sind winzige Defizite zu erkennen, welche zur einfacheren Erkennung rot umkreist sind. Diese sind mit einem weiteren Strukturelement, dem einer Raute, schließbar, siehe Bild 12. Abschließend ist Bild 12 mithilfe des Kirschoperators auf seine Kanten zu reduzieren. Das Filterergebnis ist Bild 13 zu entnehmen.

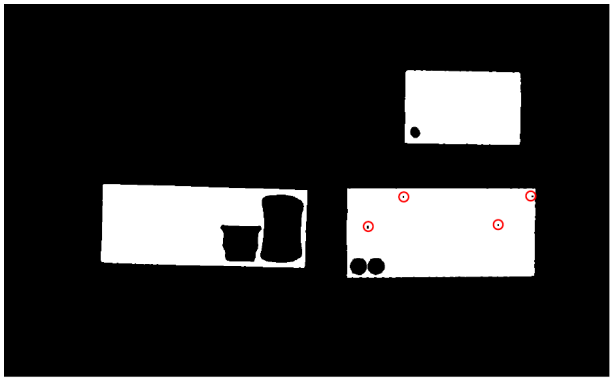


Bild 12: Vergleichsgröße mit Linienelementen
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

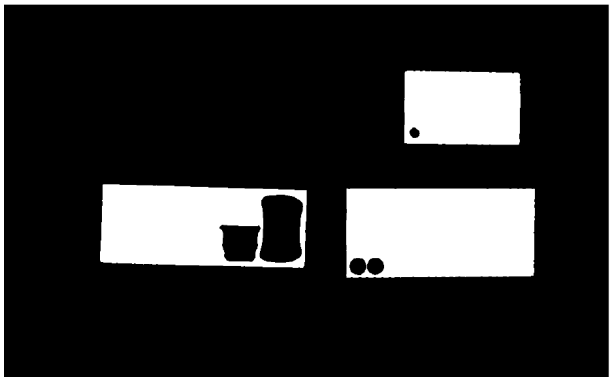


Bild 11: Vergleichsgröße mit zusätzlichen Rautenelementen
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

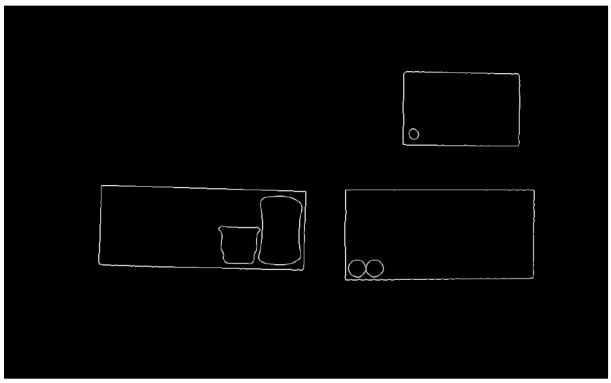


Bild 13: Merkmalsbild generiert durch Kirschfilter
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Testen der Parallelschaltungsalgorithmik

Bild 13 zeigt, dass das gesetzte Etappenziel der Automatisierungsidee erreicht ist. Jedoch ist dies nur erreicht, wenn der gefundene Algorithmus nicht nur für Bild 3, sondern für ein x-beliebiges Bild des Arbeitsraumes funktioniert. Daher ist zu testen, ob die Robustheit des Programmes ausreicht. Dafür wird ein Testbild, Bild 14, herangezogen, welches den Manipulationsprozess aus Kapitel 3 durchläuft. Das Ergebnis ist in Bild 15 dargestellt. Neben dem Testbild, Bild 14, welches exemplarisch aufgezeigt ist, wurde das Programm auch mit über 50 weiteren Bildern getestet. Das Ergebnis lautet: Der Algorithmus funktioniert einwandfrei für das Eingangsbild, an welchem er entwickelt wurde. Bei Veränderung des Eingangsbildes ist der Algorithmus jedoch manuell anzupassen.

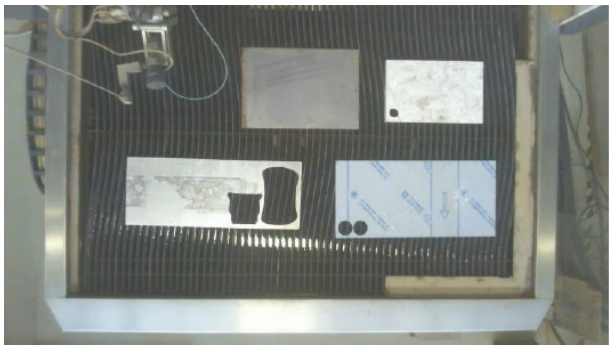


Bild 14: Testbild
Quelle: Umfeldsensorik

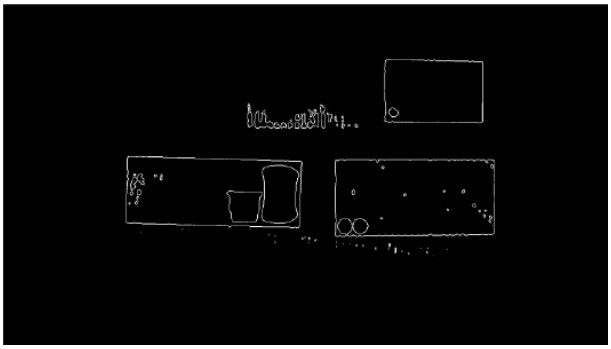


Bild 15: Ergebnisbild
Quelle: eigene Darstellung erstellt mittels Matlab

5 Schlussfolgerungen & Diskussion

Die Komplexität und die Vielzahl an Störgrößen minimieren die Robustheit. Der Algorithmus funktioniert für ein bestimmtes Eingangsbild und ist nur durch Anpassung auf weitere Bilder übertragbar. Auch die Optimierung durch verschiedene Grenzwertverfahren, Schließungen durch Strukturelemente, Unterdrückung kleinerer Artefakte und die Anwendung der Differenzmethode reichen nicht aus, um die gewünschte Prozesssicherheit zu erreichen.
Die Zeitvarianz des Systems erschwert darüber hinaus, die Erstellung eines Lösungskonzeptes. Die benötigten Entscheidungsprozesse, die bei der Separation von Halbzeug und Arbeitsraum nötig sind, sind für den Menschen intuitiv, jedoch für die Maschine teilweise nicht möglich. Eine teils numerische exakte Übereinstimmung der Grauwerte unterbindet die Trennungsmöglichkeit durch die klassischen Kantenoperatoren, weshalb zukünftig das Feld der KI erschlossen wird.

6 Förderhinweis

Das Forschungsprojekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

7 Literatur

[1] Muhs S., Meinel G., Burghardt D.; Dezember 2012; Konzept und Ergebnisse einer automatisierten Baublockabgrenzung aus topographischen Kartenwerken; KN – Journal of Cartography and Geographic Information; S. 145-150; URL: https://doi.org/10.1007/BF03544489 (letzter Zugriff am 19.11.2021)

[2] Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe; Lemgo; Labor für Fabrikautomatisierung; URL: https://www.th-owl.de/produktion/fachbereich/labore/fabrikautomatisierung/technologie/ (letzter Zugriff am 08.12.2021)

[3] Fritz A. H. & Schulze G. (Hrsg.); 2008; Fertigungstechnik; Springer Berlin Heidelberg; URL:https://doi.org/10.1007/978-3-540-76696-4 (letzter Zugriff am 19.11.2021)

[4] Chatterjee S., Suman A., Gaurav R., Banerjee S., Singh A. K., Ghosh B. K., Mandal R. K., Biswas M. & Maji D.; Januar 2021; Retinal Blood Vessel Segmentation Using Edge Detection Method; Journal of Physics: Conference Series 1717 012008; URL: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1717/1/012008 (letzter Zugriff am 19.11.2021)

[5] Gao P., Sun X. & Wang W; 2010; Moving object detection based on kirsch operator combined with Optical Flow; 2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing; S. 620–624; URL:https://doi.org/10.1109/IASP.2010.5476045 (letzter Zugriff am 19.11.2021)

[6] Aparna S., Naidu M.E.; Juli 2016; Dynamic Edge Detection in a Digital Video Stream Using Kirsch Filters; Internationale Zeitschrift für Informatik und Informationssicherheit (IJCSIS),vol. 14, Nr. 7; Juli 2016; S. 871-878; URL: http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25920.87049 (letzter Zugriff am 09.12.2021)

[7] Burger W. & Burge M. J.; 2015; Digitale Bildverarbeitung; Springer Berlin Heidelberg; URL:https://doi.org/10.1007/978-3-642-04604-9 (letzter Zugriff am 19.11.2021)

[8] Zamperoni P.; 1989; Methoden der digitalen Bildsignalverarbeitung; Vieweg+Teubner Verlag; URL:https://doi.org/10.1007/978-3-322-83935-0 (letzter Zugriff am 21.11.2021)

[9] Nachschlagwerk: Duden | Hintergrund | Rechtschreibung, Bedeutung, Definition, Herkunft; URL:https://www.duden.de/rechtschreibung/Hintergrund (letzter Zugriff am 01.12.2021)

Open Access. © 2021, F. Albers, T. Bartsch, D. Kowalke, S. Sade
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Lineare Systemidentifikation des hygrothermischen Verhaltens eines Raumes zur Verwendung in Modellprädiktiven Reglern

Marcel Zehner[1], Alessio Cavaterra[2] und Steven Lambeck[3]

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Linearen Systemidentifikation für ein hygrothermisches Zustandsraummodell des Hrabanus-Maurus-Saals innerhalb der Bibliothek des Bischöflichen Priesterseminars in Fulda. Hier lagern wertvolle historische Dokumente, die besondere Anforderungen an das Raumklima stellen. Für die Einhaltung dieser Anforderungen eignet sich ein Modellprädiktiver Regler (MPC), der in Zukunft im Hrabanus-Maurus-Saal eingesetzt werden wird. Das hier entwickelte lineare Zustandsraummodell kann zukünftig in diesem MPC genutzt werden. Die Modellierung des hygrothermischen Verhaltens erfolgt über eine Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in Form von Zustandsraummodellen. Die darin enthaltenen Parameter können mit Hilfe der vorhandenen Temperatur – und Luftfeuchtigkeitsmessungen der vergangenen Jahre im Hrabanus-Maurus-Saal geschätzt werden. Hierbei werden eine Vielzahl an Initialparametern in Form einer Monte-Carlo-Simulation getestet, um die optimalen Systemparameter zu identifizieren. Im Anschluss werden beide Zustandsraummodelle zusammengefügt und mit einem rein datengetriebenen Ansatz („Black-Box“-Ansatz) verglichen. Die Ergebnisse des hier vorgestellten Ansatzes („Grey-Box“-Ansatz) weisen vor Allem in Bezug auf die Dynamik ein besseres Modellverhalten auf.

Stichwörter

Lineare Systemidentifikation, Modellprädiktive Regelung, Präventive Konservierung

1 Einleitung und Motivation

Kulturgüter müssen unter bestimmten Bedingungen gelagert oder ausgestellt werden, damit die Haltbarkeit verlängert und deren Wert und Bedeutung künftigen Generationen erhalten bleibt. Bei einer Nicht-Einhaltung dieser Bedingungen kommt es zu einem beschleunigten Alterungsprozess, was mit Beschädigung oder Zerstörung des Gegenstandes verbunden sein kann. Alle Vorkehrungen und Maßnahmen, die getätigt werden müssen, um zu dem dauerhaften Erhalt eines bestimmten Kulturgutes beizutragen, bündeln sich unter dem Begriff der Präventiven Konservierung. Hierbei spielen vor Allem die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit eine besondere Rolle (Burmester, 2007). Dementsprechend ist eine Regelung beider Größen unter Beachtung der vorgegebenen Anforderungen von

1 Marcel Zehner, B.Eng., Hochschule Fulda, Fachbereich ET
2 Alessio Cavaterra, M.Eng., Hochschule Fulda, Fachbereich ET
3 Prof. Dr.–Ing. Steven Lambeck, Hochschule Fulda, Fachbereich ET

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

großer Bedeutung. Mit Hilfe eines MPC (Dittmar, 2019) kann eine Mehrgrößenregelung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit im Sinne der Präventiven Konservierung erfolgen. Der MPC wird, wie bereits erwähnt, zukünftig im Hrabanus-Maurus-Saal innerhalb der Bibliothek des Bischöflichen Priesterseminars in Fulda eingesetzt. Die dort befindlichen historisch wertvollen Dokumente stellen besondere Anforderungen an das Raumklima. Im Hrabanus-Maurus-Saal finden seit mehreren Jahren durchgehende Temperatur – und Luftfeuchtigkeitsmessungen statt, wodurch auf eine große Datenbasis zurückgegriffen werden kann. Außerdem befinden sich im genannten Raum Stellglieder mit denen Heizeingriffe, aber auch Be – bzw. Entfeuchtungseingriffe durchgeführt werden können. Daneben ist eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) vorhanden, die die Mess-, Steuer-, und Regelungstechnik vereint. In Zukunft soll auf dieser SPS auch der MPC implementiert werden. Folgendes Bild 1 zeigt eine Übersicht der bestehenden Sensorik und Aktorik im Hrabanus-Maurus-Saal. An den gekennzeichneten Messstellen werden Temperatur – und Luftfeuchtigkeitsmessungen durchgeführt.

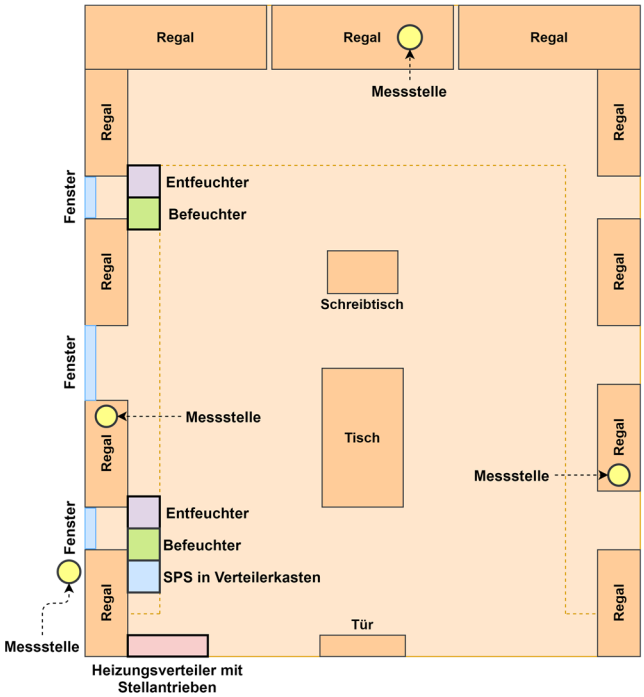


Bild 1: Übersicht über bestehende Sensorik und Aktorik im Hrabanus-Maurus-Saal

Damit der MPC zur Regelung der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit genutzt werden kann, wird ein hygrothermisches Modell des Hrabanus-Maurus-Saals benötigt. Mit Hilfe des Modells kann der MPC die optimale Stellgrößenfolge unter Berücksichtigung der Stell- und Regelgrößenbeschränkungen gemäß den konservatorischen Anforderungen bestimmen.

2 Modellbildung und Lineare Systemidentifikation

Die Modellbildung des hygrothermischen Verhaltens erfolgt mit Hilfe des Beuken-Modells (Cavaterra et al., 2019), wobei das Wärme – und Feuchteübertragungsverhalten durch elektrische Ersatzschaltbilder approximiert wird. Hierzu werden zunächst die Wärme- und Feuchteübertragungsmechanismen in zwei getrennten Zustandsraummodellen zweiter Ordnung abgebildet. Bei der späteren Zusammenführung beider Modelle entsteht ein erweitertes Zustandsraummodell vierter Ordnung für die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit. Das erweiterte Zustandsraummodell besitzt keine Durchgriffsmatrix D. Die Gleichungen (1) und (2) zeigen das Zustandsraummodell zweiter Ordnung für die Temperatur (Wärmeübertragungsverhalten).

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

$$\begin{bmatrix}\dot{\vartheta}_R\\ \dot{\vartheta}_W\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-\frac{1}{C_R}\left(\frac{1}{R_N}+\frac{1}{R_{fast}}\right) & \frac{1}{C_R R_{WR}}\\ \frac{1}{C_W R_{WR}} & -\frac{1}{C_W}\left(\frac{1}{R_{AW}}+\frac{1}{R_{WR}}\right)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\vartheta_R\\ \vartheta_W\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\frac{1}{C_R} & \frac{\eta_{G,R}}{C_R} & \frac{1}{C_R R_{fast}} & \frac{1}{C_R R_N}\\ 0 & \frac{\eta_{G,W}}{C_W} & \frac{1}{C_W R_{AW}} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{Q}_Y\\ \dot{Q}_G\\ \vartheta_A\\ \vartheta_N\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$y = \begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\vartheta_R\\ \vartheta_W\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot x_\vartheta \tag{2}$$

Unter Berücksichtigung der Außentemperatur ϑ_A, der Temperatur des Nachbarraums ϑ_N, dem Heizwärmestrom $\dot{Q}_Y$ und dem Wärmestrom der Globalstrahlung $\dot{Q}_G$ kann sowohl die Raumtemperatur ϑ_R, als auch die Temperatur an der Wand ϑ_W bestimmt werden. Die vier Eingangsgrößen sind in dem Vektor u_ϑ zusammengefasst. Die Gleichungen (3) und (4) können genutzt werden, um den Wasserdampfpartialdruck zu modellieren und beschreiben somit das Feuchteübertragungsverhalten. Hierbei kann der Wasserdampfpartialdruck im Raum p_R und an der Wand p_W berechnet werden. Die Eingänge des Systems werden in dem Eingangsvektor u_p durch den Wasserdampfpartialdruck außen p_A, im Nachbarraum p_N und dem Wasserdampfmassenstrom $\dot{m}_Y$ beschrieben. Die Wasserdampfpartialdrücke eignen sich dazu, dass Feuchteverhalten in Gebäuden zu modellieren. (Kramer et al., 2012)

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\dot{p}_R\\ \dot{p}_W\end{bmatrix} = &\begin{bmatrix}-\frac{1}{C_{p,R}}\left(\frac{1}{R_{p,N}}+\frac{1}{R_{p,WR}}+\frac{1}{R_{p,fast}}\right) & \frac{1}{C_{p,R}R_{p,WR}}\\ \frac{1}{C_{p,W}R_{WR}} & -\frac{1}{C_{p,W}}\left(\frac{1}{R_{AW}}+\frac{1}{R_{WR}}\right)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_R\\ p_W\end{bmatrix}\\ &+\begin{bmatrix}\frac{1}{C_{p,R}R_{p,fast}} & \frac{1}{C_{p,R}R_{p,N}} & \frac{1}{C_{p,R}}\\ \frac{1}{C_{p,W}R_{p,AW}} & 0 & \frac{1}{C_{p,W}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}p_A\\ p_N\\ \dot{m}_Y\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{3}$$

$$y = \begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}p_R\\ p_W\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\cdot x_p \tag{4}$$

Da es sich bei Gleichung (3) um Wasserdampfpartialdrücke handelt, müssen die gemessenen Werte für die relative Luftfeuchtigkeit in Wasserdampfpartialdrücke umgerechnet werden. Erst nach dieser Umrechnung kann die eigentliche Systemidentifikation stattfinden. Mit folgender Berechnungsvorschrift (Kramer et al., 2012) ist dies möglich. Die Funktion $p_{sat}(\vartheta)$ ist temperaturabhängig und beschreibt die Wasserdampfpartialdruckkurve (Häupl et al., 2013).

$$p = p_{sat}(\vartheta)\cdot\varphi \tag{5}$$

Die Parameter innerhalb beider Zustandsraummodelle werden durch die aufgenommenen Messdaten geschätzt. Es erfolgt eine Aufteilung der Messdaten in Trainings – und Testdaten (Aufteilung von 70 % Trainingsdaten und 30 % Testdaten). Die Identifikation der Parameter erfolgt mit den Trainingsdaten. Die Evaluierung des daraus entstandenen Modells wird mit den Testdaten durchgeführt. Dies ist notwendig, um das Bias-Variance-Dilemma (Nelles, 2020) zu berücksichtigen. Bild 2 zeigt das Vorgehen zur Ermittlung der Parameter, die anschließend für das hygrothermische Gesamtmodell genutzt werden. Wie in Bild 2 zu erkennen ist, erfolgt zunächst eine Parameterschätzung für die beiden Teilmodelle (Gleichungen (1) und (2) sowie (3) und (4)), bevor eine Zusammenführung zu einem Gesamtmodell mit den ermittelten Systemparametern durchgeführt werden kann. Bei der Zusammenführung erfolgt in Bezug auf das Feuchtemodell eine Linearisierung der Wasserdampfpartialdruckkurve. Die getrennte Identifikation der einzelnen Teilmodelle bewirkt, dass die Schätzaufgabe durch eine geringere Anzahl an Schätzparametern je Teilmodell weniger komplex wird als eine Schätzung der Parameter des Gesamtmodells. Zusätzlich dazu ist die Wahl der entsprechenden Initialparameter von großer Bedeutung. Da bei der Systemidentifikation lokale Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden,

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

ist es durchaus möglich, dass bei ungünstiger Wahl der Initialparameter ein lokales Minimum erreicht wird und die Konvergenz zum globalen Minimum ausbleibt. Um diesem Sachverhalt entgegenzuwirken, wird mit Hilfe des Latin Hypercube Samplings eine Vielzahl an zufällig verteilten Initialparametervektoren für das Temperatur – und das Feuchtemodell generiert. Diese werden im Anschluss einer Monte-Carlo-Simulation zur Systemidentifikation herangezogen. Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation ist eine Vielzahl an Modellen mit unterschiedlichen Werten für die Systemparameter. Die Modelle und die dazugehörigen Parameter für Temperatur und Wasserdampfpartialdruck mit dem geringsten Fehler auf den Testdaten werden bei der späteren Zusammenführung zu einem Gesamtmodell genutzt. Als Gütemaß wird die best fit rate (BFR) verwendet. Der normalized mean squared error (NMSE) dient als Fehlermaß. Die Berechnung beider Maße orientiert sich an (Kroll und Schulte, 2014). Die Systemidentifikation selbst erfolgt mittels MATLAB und mit Hilfe der System Identification Toolbox. Unter Verwendung des Befehls greyest kann nach Eingabe der Daten und Festlegung der Zustandsraummodelle die Systemidentifikation stattfinden. Hierfür wird der fmincon-Algorithmus verwendet. Dies kann dem oben beschriebenen Befehl als Parameter übergeben werden.

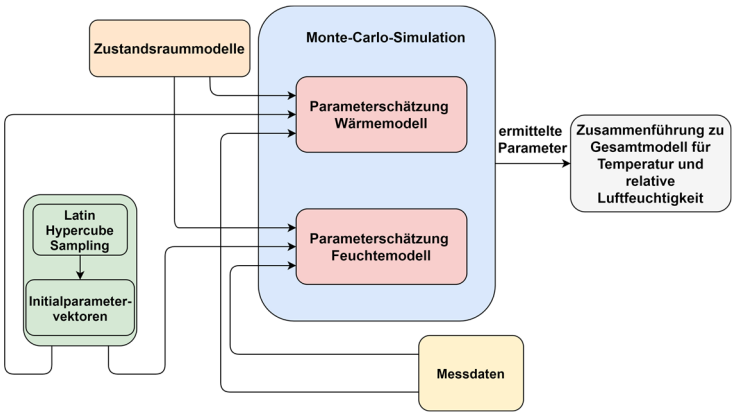


Bild 2: Vorgehen zur Parameterschätzung

Durch die Linearisierung der Wasserdampfpartialkurve (Gleichung (5)), dem anschließenden Einsetzen in das Feuchteübertragungsmodell und dem Zusammenführen beider Modelle ergibt sich ein Zustandsraummodell vierter Ordnung für die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit. Auf die Darstellung der Linearisierung wird im weiteren Verlauf verzichtet, da dies den Rahmen des Beitrags überschreiten würde. Das Gesamtmodell ist in den Gleichungen (8) und (9) zu sehen. Die Systemmatrix A des Gesamtmodells ist nicht vollständig besetzt. Die Elemente $a_{1,3}$, $a_{1,4}$, $a_{2,3}$ und $a_{2,4}$ der Matrix sind auf null gesetzt. Dies sagt aus, dass innerhalb des Modells eine Kopplung von der Temperatur auf die relative Luftfeuchtigkeit nicht berücksichtigt wird. Physikalisch betrachtet stellt dies einen Modellierungsfehler dar, der jedoch im vorliegenden Falle nur einen geringen Einfluss auf die Modellierungsgüte hat.

$$x = \begin{bmatrix} {x_\vartheta}^T & {x_p}^T \end{bmatrix}^T \tag{6}$$

$$u = \begin{bmatrix} {u_\vartheta}^T & {u_p}^T \end{bmatrix}^T \tag{7}$$

$$\dot{x} = \boldsymbol{A} \cdot x + \boldsymbol{B} \cdot u \tag{8}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot x \tag{9}$$

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3 Vergleich mit Black-Box-Modell

Das datengetriebene Modell (Black-Box-Ansatz) ist – wie auch das Grey-Box-Modell – ein Zustandsraummodell vierter Ordnung. Zur besseren Vergleichbarkeit ist die Durchgriffsmatrix D nicht identifiziert worden. Gleichung (10) zeigt die Struktur des Black-Box-Ansatzes mit den Zuständen sowie den Eingangssignalen des Systems. Hierbei stimmen die Dimensionen der Matrizen $\boldsymbol{A}$ und $\boldsymbol{B}$ mit denen aus Gleichung (8) überein. Im Gegensatz zur Systemmatrix $\boldsymbol{A}$ des Grey-Box-Ansatzes werden hier jedoch alle Elemente der Systemmatrix geschätzt.

$$\begin{bmatrix} \dot{\vartheta}_R(t) \\ \dot{\vartheta}_W(t) \\ \dot{\varphi}_R(t) \\ \dot{\varphi}_W(t) \end{bmatrix} = \boldsymbol{A} \cdot \begin{bmatrix} \vartheta_R(t) \\ \vartheta_W(t) \\ \varphi_R(t) \\ \varphi_W(t) \end{bmatrix} + \boldsymbol{B} \cdot \begin{bmatrix} \dot{Q}_Y(t) \\ \dot{Q}_G(t) \\ \vartheta_A(t) \\ \vartheta_N(t) \\ \varphi_A(t) \\ \varphi_N(t) \\ \dot{m}_Y(t) \end{bmatrix} \tag{10}$$

Das Black-Box-Modell und die in den Matrizen enthaltenen Werte sind mit der System Identification Toolbox und dem Befehl `ssest` identifiziert worden. Dieser Befehl nutzt ebenso den fmincon-Algorithmus. Bild 3 visualisiert den gesamten Testdatensatz, sowie die dazugehörigen Modellausgänge für beide Ansätze. Gleichzeitig ist rechts im Bild ein Bereich zu erkennen, der im weiteren Verlauf genauer untersucht wird. Hierbei handelt es sich um einen Zeitabschnitt, in dem das Grey-Box-Modell schlechter abschneidet im Vergleich zum restlichen Testdatensatz.

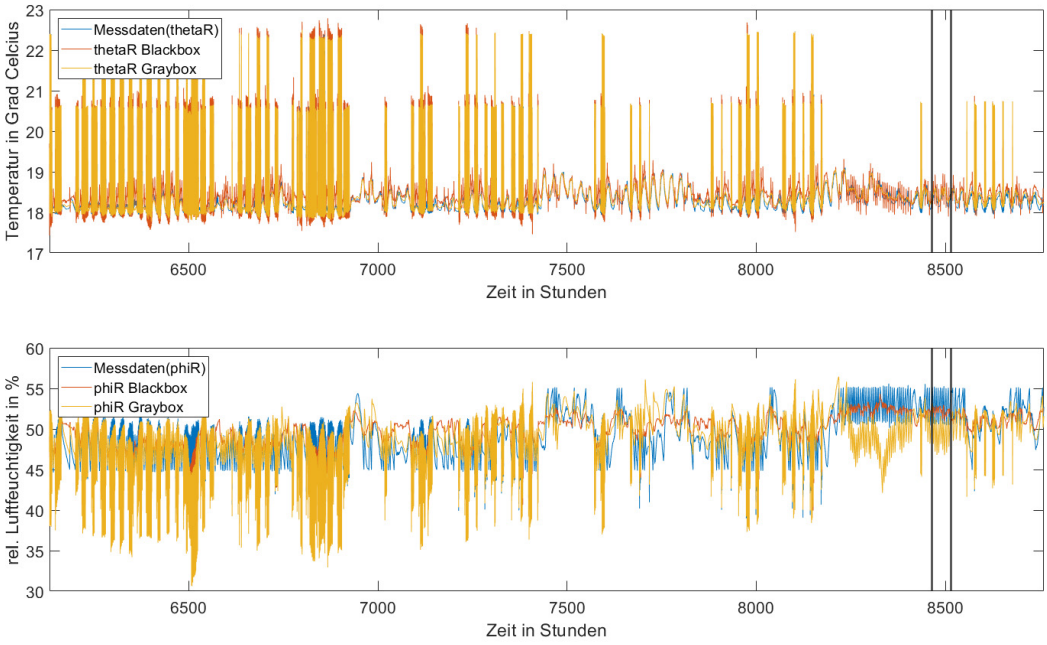


Bild 3: Gesamter Testdatensatz

Der hervorgehobene Bereich in Bild 3 ist in Bild 4 herausgestellt. Auch er veranschaulicht die Messdaten sowie die Ausgänge der beiden Modellierungsansätze.

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

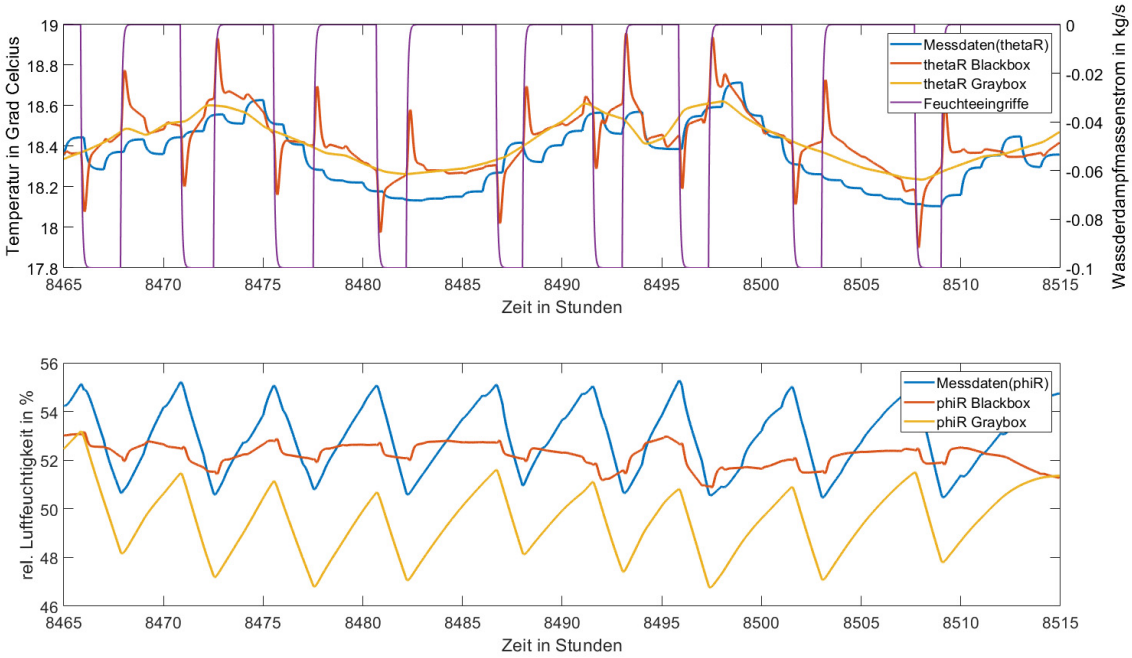


Bild 4: Visualisierung der Modelle, der Messdaten und der Feuchteeingriffe für einen Zeitraum von 50 Stunden

Es wird deutlich, dass der Grey-Box-Ansatz den Verlauf der Temperatur mit hoher Genauigkeit modelliert. Dies zeigt nicht nur Bild 4, sondern auch der berechnete BFR (siehe Tabelle 1). Der Black-Box-Ansatz modelliert ebenfalls den grundsätzlichen Verlauf, jedoch sind hier mehrere Temperaturspitzen zu erkennen. Diese korrelieren mit den Be – bzw. Entfeuchtungseingriffen, die im Hrabanus-Maurus-Saal vorgenommen wurden und sind in Bild 4 visualisiert. Hier ist erkennbar, dass, bedingt durch zu viele Freiheitsgrade, das rein datengetriebene Modell einen nicht physikalisch messbaren Zusammenhang zwischen Be – bzw. Entfeuchtungseingriffen und der Temperatur gelernt hat. Bei Betrachtung des Grey-Box-Modells für die relative Luftfeuchtigkeit ist erkennbar, dass diese die Dynamik der Messdaten mit hoher Genauigkeit modelliert. Jedoch liegt ein konstanter Offset von ungefähr drei Prozent vor. Dieser Offset ist durch die vorliegende Toleranz der Luftfeuchtigkeitssensoren von ungefähr $\pm 2\% rH$ jedoch vernachlässigbar. Der Black-Box-Ansatz ist zwar näher an dem Wertebereich der Daten gelegen, was auch die Best Fit Rate in Tabelle 1 zeigt, allerdings kann dieser die Dynamik der Messdaten nicht abbilden. Mit Hilfe des ersten Differenzenquotienten kann nun gezeigt werden, dass mit dem hier vorgestellten Ansatz die Dynamik mit höherer Genauigkeit approximiert werden kann. Dies zeigen nicht nur die berechneten Gütemaße für den Differenzenquotienten in Tabelle 1, sondern auch das Bild 5. Es ist zu erkennen, dass der Grey-Box-Ansatz, die Dynamik der relativen Luftfeuchtigkeit gut modelliert. Lediglich die Spitzen der Messdatenänderung sind von dem hier vorgestellten Ansatz nicht zu erfassen. Im Gegensatz dazu ist der datengetriebene Ansatz (Black-Box) nicht in der Lage die Änderungen der relativen Luftfeuchte darzustellen.

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

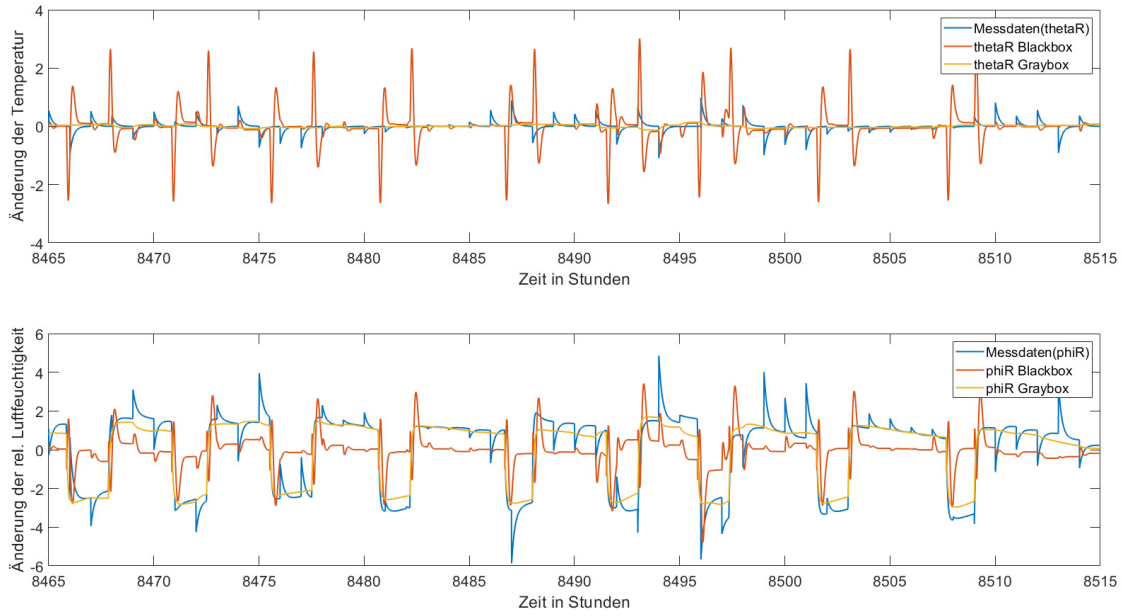


Bild 5: Visualisierung des ersten Differenzenquotienten für den Zeitabschnitt

Die Tatsache, dass der Grey-Box-Ansatz die Dynamik der Luftfeuchtedaten modelliert, jedoch einen konstanten Offset in Bezug auf die Messdaten, kann ebenso mit einem Streudiagramm gezeigt werden. Hierfür werden die in Bild 4 gezeigten Daten in einem Streudiagramm (Bild 6) visualisiert. Auf der Ordinate werden die jeweiligen Modellausgänge gezeigt, wohingegen die Abszisse die Messdaten beinhaltet. Die einzelnen Punktewolken sollten im Idealfall der blau eingezeichneten Winkelhalbierenden folgen und die Steigung dieser abbilden. Ist dies der Fall, so bilden die Modellausgänge die gemessenen Daten exakt ab. Bei Betrachtung der relativen Luftfeuchtigkeit für den Grey-Box-Ansatz ist zu erkennen, dass zwar ein ungefähr dreiprozentiger Offset vorliegt, aber die Punktwolke annähernd parallel zur Winkelhalbierenden liegt. Das Streudiagramm für den Black-Box-Ansatz veranschaulicht, dass die Feuchtigkeitswerte von etwas über 53 %rH nicht abgebildet werden können.

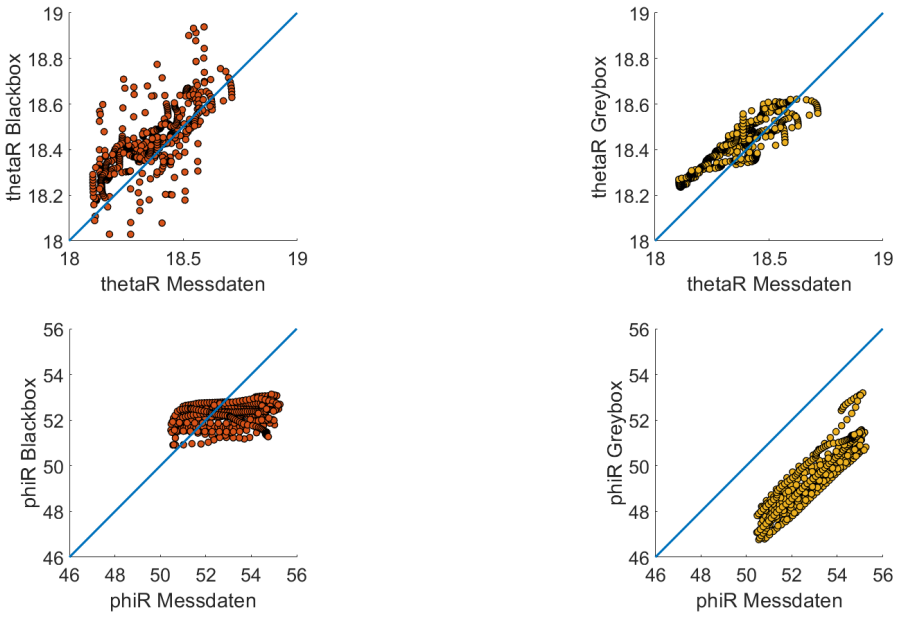


Bild 6: Streudiagramm der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Tabelle 1: Auflistung des BFR und NMSE für den Testdatensatz (DQ = „Differenzenquotient“).

	BFR	BFR(DQ)	NMSE	NMSE(DQ)
Temperatur (Blackbox)	74,33 %	77.89 %	0.066	0.049
Relative Luftfeuchtigkeit (Blackbox)	38,53 %	75.80 %	0.38	0.059
Temperatur (Greybox)	90,32 %	95,06 %	0.009	0,002
Relative Luftfeuchtigkeit (Greybox)	35,23 %	80.84 %	0.42	0.037

4 Fazit und Ausblick

Der hier vorgestellte Ansatz zeigt eine hohe Modellierungsgenauigkeit bezüglich der Raumtemperatur. Ein Black-Box-Ansatz mit denselben Randbedingungen kann diese Genauigkeit nicht erreichen. Bei Betrachtung der relativen Luftfeuchtigkeit ist jedoch ein größerer Modellfehler vorzufinden, als dies beim datengetriebenen Ansatz der Fall ist. Allerdings zeigt der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit, dass die Dynamik der Messdaten mit Hilfe des Grey-Box-Ansatzes deutlich besser modelliert werden kann. Diese Aussage wird nochmals durch die Fehlerbetrachtung des ersten Differenzenquotienten für beide Modelle bekräftigt. Der Grey-Box-Ansatz weist bei der Modellierung der relativen Luftfeuchtigkeit einen durchgängig konstanten Offset zu den Messdaten auf, was mit den vorliegenden Toleranzen der Feuchtigkeitssensoren begründet werden kann. In weiterführenden Arbeiten sollte vor Allem der relativen Luftfeuchtigkeit besondere Beachtung geschenkt werden. Hier ist es beispielsweise möglich, eine nichtlineare Systemidentifikation oder eine Takagi-Sugeno-Fuzzy-Modellierung für das Modell durchzuführen, was für zukünftige Arbeiten auch geplant ist.

5 Literaturverzeichnis

[1] Alessio Cavaterra, Andreas Böttcher und Steven Lambeck (2019). *The “HumFlow” Project – Developing a minimal invasive measurement system for estimating energy and humidity transfer processes through building walls.*

[2] Andreas Kroll und Horst Schulte (2014). *Benchmark problems for nonlinear system identification and control using Soft Computing methods: Need and overview* (25 Ausg.). doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.08.034

[3] Andreas Burmester (2007). Was ist Präventive Konservierung? Eine Einführung. In *Grundlagen der Meßtechnik in der Präventiven Konservierung, Tagungsband* (S. 8-11). München. Abgerufen am 03. 12 2021 von http://www.doernerinstitut.de/de/mitarbeiter/publikationen_burmester.html

[4] Rainer Dittmar (2019). *Model Predictive Control mit MATLAB und Simulink.* InTechOpen.

[5] Oliver Nelles (2020). *Nonlinear System Identification - From Classical Approaches to NeuralNetworks, Fuzzy Models, and Gaussian Processes.* Springer Berlin Heidelberg.

[6] Peter Häupl et al. (2013). *Lehrbuch der Bauphysik Schall -- Wärme -- Feuchte -- Licht --Brand --Klima.* Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-8348-2101-0

[7] Rick Kramer, Jos van Schijindel und Henk Schellen (2012). Inverse Modeling of climate responses of monumental buildings. In *Climate for collections : standards and uncertainties* (S. 425-437).

Open Access. © 2021 Marcel Zehner, Alessio Cavaterra und Steven Lambeck
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

AALE 2022 Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Kombinierte Optimierung für diskontinuierliche Produktion mit nicht definierten Qualitätskriterium

Thomas Schulz[1], Ivan Nekrasov, Ph.D.[2]

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem realen Fall der Chargenproduktion aus der pharmazeutischen Industrie. Das in der Untersuchung betrachtete Problem liegt im Bereich der Optimierung der Chargenqualität und der Minimierung des Ausschusses unter der Gegebenheit, dass die entsprechenden Qualitätsparameter im Unternehmenssteuerungssystem nicht gemessen werden. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Technik führt ein virtuelles Qualitätskriterium ein, das für jede der Chargen angewendet wird, basierend auf dem beschränkten Wissen der Anwender, welche Charge als optimale Charge (auch Golden Batch bezeichnet) betrachtet werden kann und somit als Referenz für die aktuell in Produktion befindliche Charge verwendet werden kann. Zu diesem Zweck verwenden wir das klassische integrale Leistungskriterium, das in der Theorie der optimalen Steuerung dynamischer Systeme weit verbreitet ist, um zu messen, wie weit der aktuelle Zustand des Systems vom 'optimalen' Punkt entfernt ist. Mit Hilfe der beschriebenen Technologie, die aus der genannten Nachbardisziplin stammt, waren wir in der Lage, die Qualität jeder Charge als ein kontinuierliches Messverhältnis zu quantifizieren, was uns erlaubte, mehrere effiziente kontinuierliche Analysetechniken für diesen anfänglichen Chargenproduktionsfall zu verwenden.

Stichwörter

Analytik, Machine Learning, Künstliche Intelligenz

1 Einführung

Effizienz gilt als zentrales Merkmal, das die moderne Managementstrategie eines jeden Unternehmens in jedem Bereich der Industrie definiert [1]. Diese steht folgerichtig und selbstverständlich im Fokus digitaler Lösungen, die zur Steuerung des Unternehmens auf verschiedenen Ebenen seiner Hierarchie eingesetzt werden. Moderne Ausgaben klassischer Industrielösungen wie z.B. Manufacturing Execution Systems (MES) führen messbare Leistungsparameter (sog. KPIs) ein, die das erwähnte allgemeine Verständnis von Effizienz formalisieren und in eine Reihe lokaler Steuerungsziele aufspalten [1, 2]. Diese Ziele sind in vielen Fällen nicht so einfach zu erreichen, weshalb die Formalisierung und Lösung von lokalen Steuerungsproblemen in der heutigen Zeit einen erheblichen Aufwand erfordert und fortgeschrittene mathematische Werkzeuge erfordert.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Optimierung der Endproduktqualität. In den meisten Fällen handelt es sich bei der Qualitätskennzahl um ein Merkmal, das entweder direkt gemessen werden kann (z. B.

1 GE Intelligent Platforms GmbH, Augsburg, Deutschland
2 Russische Plechanow-Wirtschaftsuniversität, Moskau, Russland

Open Access. © 2022 Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

die rheologischen Eigenschaften eines Kraftstoffes oder die Druckfestigkeit von Beton) oder als komplexer Wert berechnet wird (z. B. wird die chemische Aktivität einer Substanz auf der Grundlage der Geschwindigkeit ihrer Reaktion mit im Labor definierten Standardprüfkörpern berechnet). Bei diesen Produktionstypen wird das Ziel der Qualitätsoptimierung mathematisch als eine Zielfunktion eines Minimierungs-/Maximierungsproblems formalisiert, das mit geeigneten mathematischen Methoden erfolgreich gelöst werden kann [3].

In einigen Produktionsbereichen wird die Qualität jedoch nicht in einem einzigen messbaren Parameter zusammengefasst, sondern durch eine Sammlung von binären Prüfzeichen dargestellt, die jeweils die Tatsache widerspiegeln, dass das Endprodukt gegen eine Reihe von Anforderungen getestet wurde und diese Tests erfolgreich bestanden hat [4]. Das Fehlen einer kontinuierlichen Qualitätsfunktion (KPI) macht den oben genannten Optimierungsansatz nicht anwendbar. In diesem Beitrag untersuchen wir einen solchen Fall und schlagen eine Technik vor, wie man das ursprüngliche binäre Qualitätskennzeichnungsproblem erweitern kann, um effiziente und in der Praxis bewährte kontinuierliche Optimierungsmethoden zu seiner Lösung heranzuziehen.

2 Problemstellung der Chargenproduktion

Chargenorientierte Prozesse nehmen einen der bedeutendsten Anteile in der Industrie ein. Als Charge wird eine bestimmte Menge von Gütern bezeichnet, die die gleichen Eigenschaften aufweisen und in einem zusammenhängenden Prozess nach streng nacheinander abgearbeiteten Phasen gemeinsam verarbeitet werden. Im Sinne der Industrie 4.0-Standardarchitektur [5], die auf die Beschreibung der Produktion hochkomplexer Einheiten ausgerichtet ist, können die chargenartigen Prozesse als untergeordnete Vorgänge betrachtet werden, die einfachere Komponenten des endgültigen Hightech-Produkts bilden. Fast alle Produktionsprozesse beinhalten Elemente der Chargenbildung sowohl in der diskreten als auch in der kontinuierlichen Industrie. In der diskreten Produktionstechnik wird eine Charge als Los bezeichnet und ist als eine Gruppe von hergestellten Waren definiert.

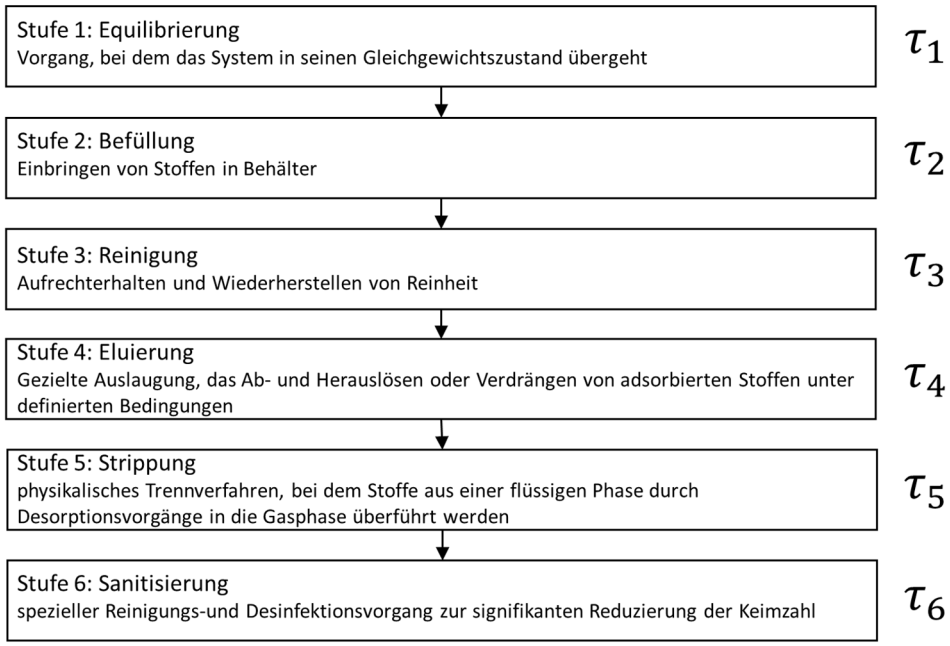


Bild 1: Produktionsstufen (Phasen)

Open Access. © 2022 Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Die Menge des Loses wird durch den Umfang der Produktion und der Prozesswiederholung diktiert: von der Einzelproduktion, über die Serienproduktion und Sortenproduktion bis hin zur Massenproduktion. In ähnlicher Weise wird die Charge in der kontinuierlichen Industrie durch eine bestimmte Menge des Endprodukts repräsentiert (z.B. ein Fass Öl). In diesem Fall wird der Begriff Qualität nicht auf einen einzelnen diskreten Artikel und nicht als kontinuierliche zeitbasierte Funktion angewandt, sondern als eine Eigenschaft der bestimmten Produktmenge, die zu einer Charge aggregiert wird. Innerhalb jeder Charge kann die Qualität kontinuierlich oder periodisch gemessen werden, die resultierende Qualität der Charge ist jedoch ein aggregiertes Verhältnis, das auf diesen Messungen basiert. Darüber hinaus kann jede Phase des Produktionsprozesses lokale, untergeordnete Qualitätsmessungen haben, die alle nachfolgenden Phasen und die gesamte Charge beeinflussen (siehe Bild 1).

3 Implizite Definition von Qualitätskriterien

Die optimale Charge (Golden Batch) Optimierung und die kontinuierliche Optimierung sind zwei effiziente Ansätze zur Verbesserung der Produktionsqualität. Die wichtigste Einschränkung bei der Optimierung besteht darin, dass sie einige gemessene oder berechnete KPI erfordert, die wir minimieren oder maximieren wollen. Das Golden-Batch-Konzept wird zum Vergleich von Chargen verwendet und dient als Untersuchungsgrundlage für den Fall, dass die Qualität aus irgendeinem Grund gesunken ist. Im Folgenden untersuchen wir den Fall, dass der Qualitäts-KPI nicht verfügbar ist. Wir verwenden jedoch die optimale Charge (Golden Batch), um eine Qualitätszielfunktion einzuführen, die für die Minimierung gilt und die Qualität auf ein erreichbares Optimum bringt.

3.1 Integrale Zielfunktionen im Zustandsraum

Betrachten wir einen praktischen Fall von Qualitätsmanagement in der pharmazeutischen Industrie. Wie in Bild 2 dargestellt, besteht der Prozess aus sechs aufeinanderfolgenden Phasen, wobei jede Phase eine bestimmte Dauer von τ_k, $k = 1, \ldots, 6$ hat. Der Produktionsprozess ist charakterisiert durch vier gemessene technische Parameter $x_n(t)$, $n = 1, \ldots, 4$.

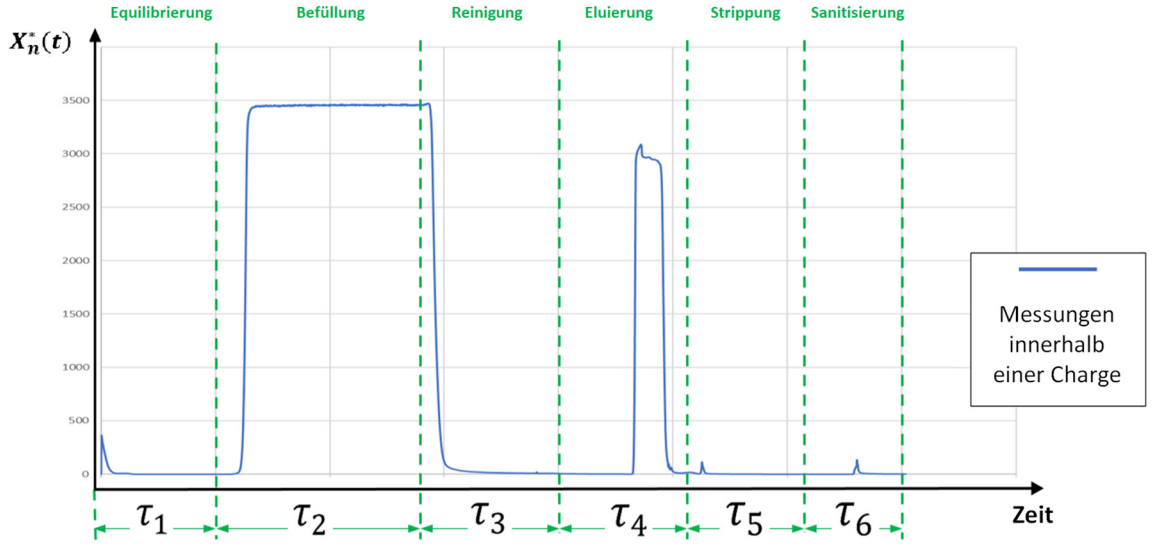


Bild 2: Produktionsstufen (Phasen) und das Profil der optimalen Charge (Golden Batch)

Open Access. © 20xx Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Die Gesamtqualität der Charge wird normalerweise durch die Kennzahl Q charakterisiert, die in Bezug auf die Prozessphasen kumuliert ist

$$Q = \sum_{k=1}^{K} Q_k \qquad (1)$$

wobei $k = 1, \dots, K$ – Nummer der Stufe (Phase) des Prozesses; für den betrachteten Fall K=6 ist.

Das Problem bei dem untersuchten Fall ist, dass die Qualität Q und Q_k nicht direkt gemessen oder berechnet wird, sondern dass stattdessen jede Charge im Labor getestet und binär mit "bestanden/nicht bestanden" bewertet wird. und wird binär mit der Note "bestanden/nicht bestanden" bewertet.

$$Pass(m) = \begin{cases} 1, Test\ bestanden \\ 0, Test\ nicht\ bestanden \end{cases} \qquad (2)$$

wobei m= $1, \dots, M$ – Nummer der Charge ist.

Es liegt auf der Hand, dass ein derartiges "postfaktisches" binäres Testlabel wie $Pass(m)$ nicht als ein hervorragender Qualitätsparameter angesehen werden kann, und diese Situation führt dazu, dass die oben erwähnten Analyse- und Optimierungstechniken nicht anwendbar sind. Positiv ist, dass wir ein explizit aufgezeichnetes Profil aller Parameter des optimale Charge (Golden Batch) in der historischen Datenbank haben. Nachfolgend stellen wir ein Verfahren zur Umgehung des Problems vor, mit dem eine künstliche kontinuierliche Qualitätsfunktion auf der Grundlage der diskreten Pass-Fail-Statistiken und der Trends der optimale Charge (Golden Batch), die wir besitzen, eingeführt werden kann. Dies ermöglicht es, die Leistungsfähigkeit kontinuierlicher Methoden auf den untersuchten Fall anzuwenden.

3.2 Integrale Zielfunktionen im Zustandsraums

Die Zustandsraumtheorie ist ein weit verbreiteter Ansatz für die Analyse multivariabler dynamischer Systeme [6]. Die zentrale Bestimmung dieser Theorie ist die Darstellung des aktuellen Zustands des Systems als Vektor oder Punkt in einem mehrdimensionalen euklidischen Raum (siehe Bild 3). Die Achsen des genannten Raums entsprechen den gemessenen Parametern des Systems x_n, $n = 1, \dots, N$ und während sich diese Parameter in der Zeit ändern, ändert der reflektierende Punkt seine Position in diesem Zustandsraum. Die Spur seiner Bewegung wird gewöhnlich als "Phasentrajektorie" bezeichnet (siehe Abb. 3), wobei davon ausgegangen wird, dass der Zustand des Systems auch als Phase des Systems betrachtet werden kann [6].

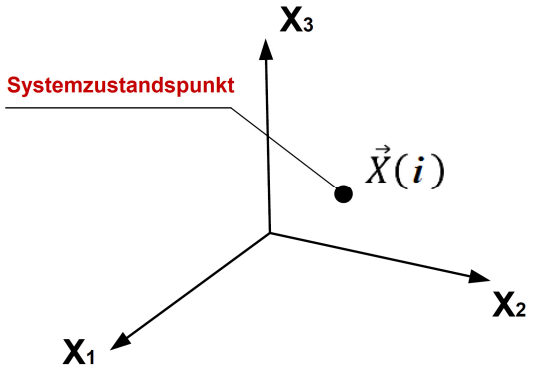


Bild 3: Produktionszustand des industriellen Anwendungsfalles

Da es unendlich viele Varianten gibt, wie sich der Zustandspunkt des Systems im Zustandsraum bewegen kann, könnte der Forscher aus bestimmten Gründen eine von ihnen bevorzugen. In diesem Fall kann die entsprechende Phasentrajektorie als optimal in Bezug auf ein formalisiertes Kriterium Q

Open Access. © 2022 Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

angesehen werden [7]. Wenn man die optimale Phasentrajektorie als ideale Spur des Systems verwendet, kann man messen, wie weit das System zu jedem Zeitpunkt von diesem Referenverlauf entfernt ist (siehe Bild 4).

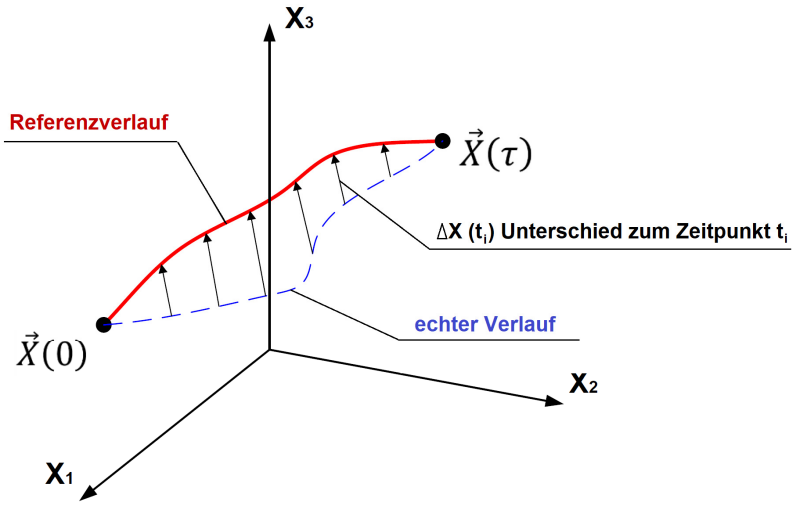


Bild 4: Produktionsstufen des industriellen Anwendungsfalles

Wie in Bild 4 dargestellt, wird dieser Abstand einfach als Differenzvektor zwischen dem Referenzzustand und dem echten Zustand des Systems zu jedem Zeitpunkt dargestellt:

$$\Delta\vec{X}(i) = \overrightarrow{X^*}(i) - \vec{X}(i) \tag{3}$$

Der Abstand selbst wird als euklidische Norm des Differenzvektors berechnet.

$$\left|\Delta\vec{X}(i)\right| = \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \Delta x_n^2(i)} \tag{4}$$

Zeitlich kumuliert können wir diese Differenzvektoren zu einer einzigen Funktion aggregieren, die uns Aufschluss darüber gibt, wie nahe der tatsächliche Pfad des Systems an der Referenzphasenbahn lag. Mathematisch gesehen ist das Aggregieren von Funktionen in der Zeit gleichbedeutend mit dem Integrieren, was uns die Formel für die Funktion der "kumulativen Differenz" liefert - das Äquivalent einer integralen Zielfunktion aus der klassischen Theorie der optimalen Steuerung [7].

$$D = \int_0^{\tau} \left|\Delta\vec{X}(t)\right| dt = \int_0^{\tau} \sqrt{\sum_{n=1}^{N} \Delta x_n^2(t)}\ dt \tag{5}$$

Zeitlich kumuliert können wir diese Differenzvektoren zu einer einzigen Funktion aggregieren, die uns Aufschluss darüber gibt, wie nahe der tatsächliche Pfad des Systems an der Referenzphasenbahn lag. Mathematisch gesehen ist das Aggregieren von Funktionen in der Zeit gleichbedeutend mit dem Integrieren, was uns die Formel für die Funktion der "kumulativen Differenz" liefert - das Äquivalent einer integralen Zielfunktion aus der klassischen Theorie der optimalen Steuerung [7].

$$Q = D^2 = \sum_{i=1}^{I} \sum_{n=1}^{N} [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \tag{6}$$

wobei $x_n(i)$ – zeitdiskrete Messungen der verfügbaren Parameter,
$n = 1, \dots, N$ – Index der Messgröße,
$i = 1, \dots, I$ – Zeitmarken der zeitdiskreten Messung sind.

Open Access. © 20xx Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3.3 Abweichung vom Golden Batch als integrale Zielfunktion

Um auf unseren industriellen Anwendungsfall zurückzukommen, können wir die oben erwähnte Argumentation leicht auf das Konzept des "Golden Batch" anwenden. Lassen Sie uns zu diesem Zweck die folgenden Entsprechungen in der Terminologie und in den Begriffen aufführen:

Nr.	Mathematische Einheit	Industrielles Äquivalent
1.	Zustandsvariable	Gemessene Parameter des Systems
2.	Zustandsvektor	Datensammlung der im System gemessenen Parameter
3.	Referenz-Phasen-Trajektorie (Pfad)	Datensammlung der Trends der gemessenen Parameter im Zusammenhang mit dem Golden Batch
4.	Projektion der Referenztrajektorie auf jede Zustandsvariable	Trend eines einzelnen gemessenen Parameters in Verbindung mit dem Golden Batch
5.	Abstandsvektor	Abweichung vom Golden-Batch-Trend, berechnet durch alle gemessenen Parameter
6.	Abstandsprojektion auf jede Zustandsvariable	Abweichung vom Golden-Batch-Trend für einen einzelnen gemessenen Parameter
7.	Kumulatives Abstandsintegralkriterium	Zeitintegrierte Abweichung vom Golden Batch

Tabelle 1: Korrespondenz von Terminologie und Begriffe

Mit dem gemessenen zeitlichen Profil des Golden Batch durch jeden gemessenen Parameter $x_n^*(t),\ t \in [0, \dots, \tau_{batch}]$ aus der historischen Datenbank (dem explizit angegebenen Golden Batch - siehe Bild 4) können wir die integrale Abweichungscharakteristik einführen, die mit den Formeln (5)-(6) identisch ist und für jede Phase des Prozesses τ_k, $k = 1, \dots, K$ (in unserem Fall $K = 6$, $\tau_6 = \tau_{batch}$) gilt:

$$Q_k = \int_0^{\tau_k} \left[\sum_{n=1}^{N} \left(x_n^*(t) - x_n(t) \right)^2 \right] dt \qquad (7)$$

Dabei sind $x_n^*(t)$ die Profilverläufe des Golden Batch für jeden n-ten gemessenen Parameter, $x_n(t)$ sind die Profilverläufe der aktuellen Charge. Auf der diskreten Zeitskala sieht die integrale Abweichung wie folgt aus:

$$Q_k = \sum_{i=1}^{I} \sum_{n=1}^{N} [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \qquad (8)$$

Summiert man die integrale Abweichung durch alle Phasen des Prozesses, so erhält man die endgültige Formel:

$$Q = \sum_{k=1}^{K} Q_k = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{I_k} \sum_{n=1}^{N} [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \qquad (9)$$

wobei $n = 1, \dots, N$ – Index der Messgröße,
$k = 1, \dots, K$ – Index der Projektphase,
$i = 1, \dots, I_k$ – Zeitmarken der zeitdiskreten Messung innerhalb jeder k-ten Phase durch den n-ten gemessenen Parameter sind.

Open Access. © 2022 Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Implizite Qualitätsoptimierung für die Pharmaindustrie als Anwendungsfall

Nachdem wir eine "künstliche" kontinuierliche Qualitätsfunktion (9) für das ursprünglich binäre Problem der Chargenverwaltung auf MES-Ebene eingeführt haben, sind wir in der Lage, das gesamte Portfolio der in Tabelle 1 aufgelisteten Methoden zu nutzen Die Hauptaufgabe besteht darin, die Ursachen für schlechte Qualität unter den verfügbaren Chargenstatistiken zu finden. Die verfügbaren Chargenstatistiken sind wie folgt:

Nr.	**Parameter**	**Wert**
1.	Anzahl der erfassten Chargen	$M = 42$
2.	Anzahl der Chargen mit schlechter Qualität	5
3.	Anzahl der in jeder Charge gemessenen Parameter	$N = 4$
4.	Anzahl der Phasen (Stufen) im Produktionsprozess	$K = 6$

Tabelle 2: Verfügbare Statistiken der Chargen

Für die weitere Analyse in dieser Arbeit wird die Software Proficy CSense verwendet [8]. Proficy CSense ist ein Software-Framework, das speziell für die Anwendung fortgeschrittener mathematischer Methoden in industriellen Systemen entwickelt wurde. Die von uns durchgeführten Verfahren gehören zu seiner Standardfunktionalität.

4.1 Berechnung des integralen Kriteriums für Chargen und Definition der Grenzqualität

Durch das Kopieren des Golden Batch Chargentrends und der Trends für jede der $M = 42$ Chargen erhalten wir ein ideales Profil des Prozesses für alle 42 in der Statistik verfügbaren Chargen (siehe Bild 5).

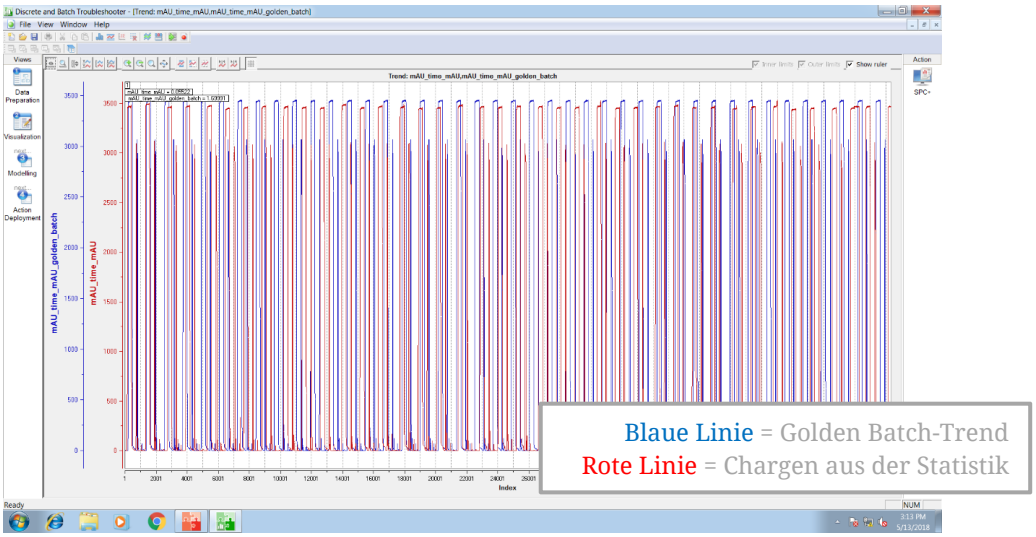


Bild 5: Golden Batch Profil im Vergleich zu allen 42 statistischen Chargen

Mit zwei Profilen - einem für die Konsistenz der 42-mal wiederholten optimalen Charge (Golden Batch, blaue Linie in Bild 5) und einem für die wirklichen Verläufe der 42 Chargen (rote Linie in Bild 5) - und

Open Access. © 20xx Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

unter Verwendung der Formel (9) können wir das kumulative Abweichungsverhältnis für alle 42 Chargen berechnen. Das Ergebnis der Berechnung ist in Bild 6 dargestellt.

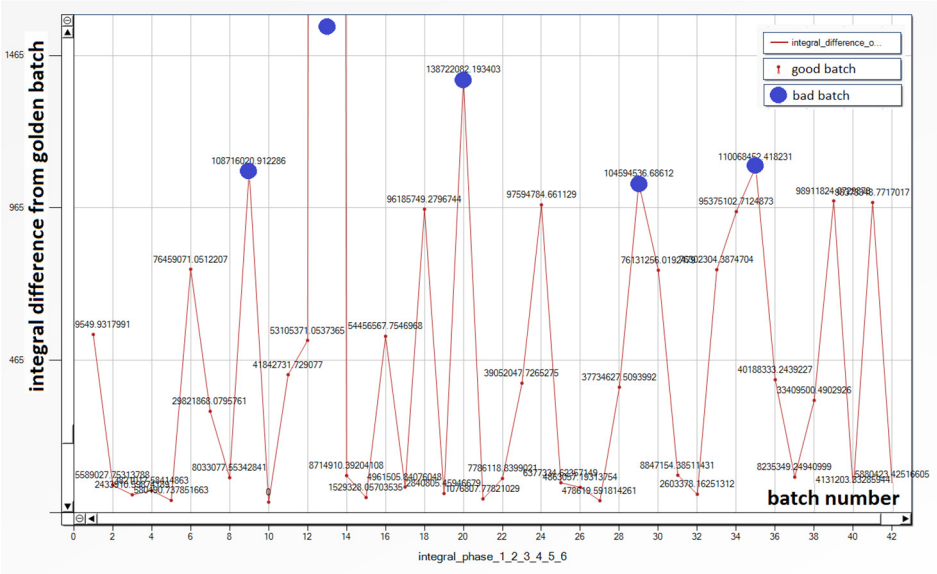


Bild 6: Kumulierte Abweichung für alle statistischen Chargen

Die oben genannten schlechten Chargen sind in Abb. 6 durch blaue Kreise gekennzeichnet. Diese fünf schlechten Chargen entsprechen den fünf Punkten mit dem höchsten Wert des kumulativen Abweichungskriteriums Q. Wie in Bild 6 zu sehen ist, lauten die Nummern schlechten Chargen: **9, 13, 20, 29 und 33**. Anhand dieses Diagramms können wir zwei wichtige Grenzwerte für das Kriterium der kumulativen Abweichung definieren, das auf die Chargen angewendet wird:

- Maximale bekannte Abweichung für Chargen guter Qualität

$$Q_{max}^{good} = \max\left[Q(m)\right] \;\middle|\; Pass(m) = 1 \tag{10}$$

  wobei $m = 1, \dots, M$ – Index der aufgezeichneten Charge ist.

- Minimale bekannte Abweichung für Chargen mit schlechter Qualität

$$Q_{min}^{bad} = min\left[Q(m)\right] \;\middle|\; Pass(m) = 0 \tag{11}$$

  wobei $m = 1, \dots, M$ – Index der aufgezeichneten Charge ist.

Wie in Bild 7 dargestellt bilden die beiden Werte Q_{max}^{good} und Q_{min}^{bad} bilden die Grenzen zwischen qualitativ schlechten und guten Chargen. Im grünen Bereich sind die garantiert guten Chargen enhalten, der gelbe Bereich enthält die garantiert schlechten Chargen. Man beachte, dass die Werte Q_{max}^{good} und Q_{min}^{bad} nie gleich sind, woraus sich ein Unsicherheitsbereich des Qualitätskriteriums ableiten läßt (grauer Bereich in Bild 7). Das bedeutet, dass für den Fall, dass die kumulative Differenz $Q(m)$ zwischen diesen beiden Grenzwerten liegt

$$Q_{max}^{good} < Q(m) < Q_{min}^{bad}$$

unser statistisches Modell nicht bestimmen kann, ob die m-te Charge den Qualitätstest erfolgreich bestehen kann. Der Unsicherheitsbereich wird explizit von den uns zur Verfügung gestellten Chargenstatistiken geerbt, schrumpft aber widerum erheblich, wenn wir Testergebnisse von mehr Chargen akkumulieren. Asymptotisch verschwindet der Unsicherheitsbereich mit zunehmender Anzahl der Chargen

$$\lim_{m\to\infty}\left[Q_{min}^{bad} - Q_{max}^{good}\right] = 0 \tag{12}$$

Open Access. © 2022 Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

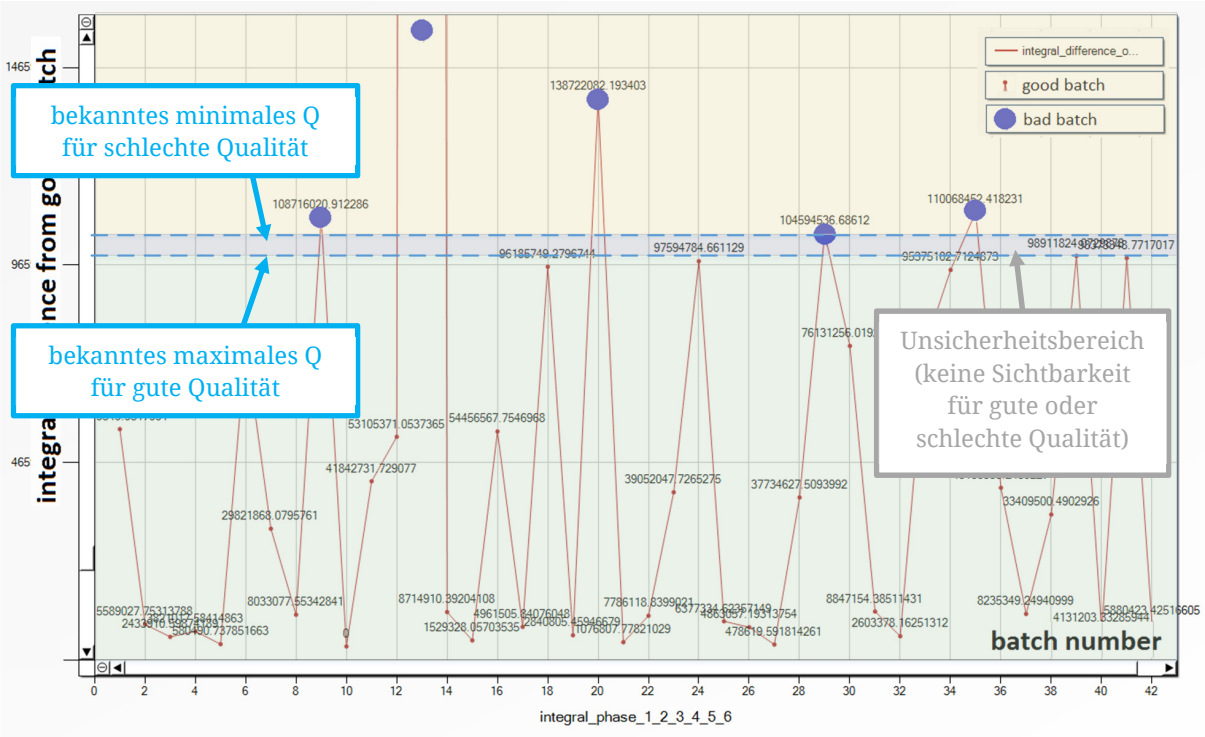


Bild 7: Grenzwerte der Qualität für garantiert schlechte und gute Chargen

4.2 Abgrenzung der Prozessstufen nach dem Einfluss der Endqualität

Wenn man bedenkt, dass sich die kumulative Differenz Q auf den gesamten Prozess der Herstellung der Charge bezieht und als Summe der Abweichungen in jeder Phase gebildet wird (siehe Formeln 1 und 9), kann man die Teilabweichungen jeder k-ten Phase jeder m-ten Charge berechnen (siehe Formel 8)

$$Q_k(m) = \sum_{i=1}^{I} \sum_{n=1}^{N} [x_n^*(i) - x_n(i)]^2 \qquad (13)$$

Auf dieselbe Weise können wir die Grenzen $Q_{max}^{good}{}_k$ und $Q_{min}^{bad}{}_k$ für jede Phase definieren. Darüber hinaus ist es möglich, die Korrelation zwischen der Endqualität und der Abweichung innerhalb jeder k-ten Phase des Prozesses zu berechnen (Kehrwert der Formel 1):

$$cor(Q_k, Q) = \frac{\sum_{m=1}^{M}[(Q_k(m) - \overline{Q_k}) \cdot (Q(m) - \bar{Q})]}{\sqrt{\sum_{m=1}^{M}(Q_k(m) - \overline{Q_k})^2 \cdot \sum_{m=1}^{M}(Q(m) - \bar{Q})^2}} \qquad (14)$$

wobei $m = 1, \dots, M$ – Index der aufgezeichneten Charge,
$k = 1, \dots, \mathrm{K}$ – Index der Phase des Projekts sind.

Die Ergebnisse der Korrelationsberechnung sind in Bild 8 dargestellt. Wie wir daraus ersehen können, sind die Phasen 3, 4 und 5 die am stärksten beeinflussenden Phasen, was uns automatisch hilft, die Ursachen für schlechte Qualität zu finden, indem wir diese Phasen untersuchen. In diesem Beitrag gehen wir nicht näher auf mögliche Optimierungs- und Steuerungsprobleme ein, die wir dank der vorgestellten Technik des kumulativen Abweichungskriteriums zu lösen in der Lage sind. Es wird lediglich ein grundlegender Qualitätsvorhersagealgorithmus als Beispiel betrachtet.

Open Access. © 20xx Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

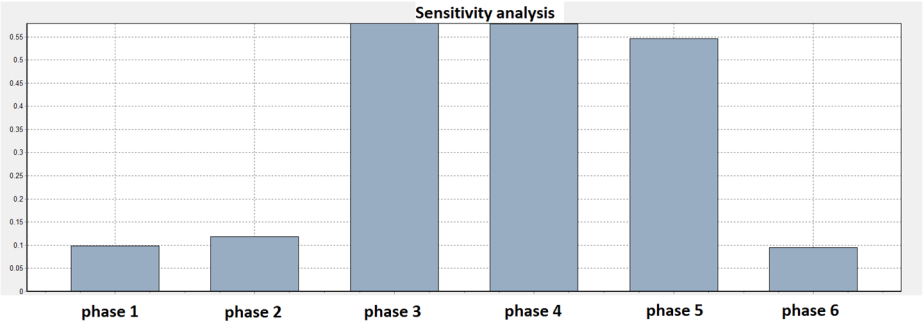


Bild 8: Sensitivitätsanalyse auf der Grundlage von Korrelationskoeffizienten

5 Schlussfolgerung

In dieser Arbeit haben wir die Annahme bestätigt, dass ein effektives Qualitätsmanagement nur dann möglich ist, wenn es eine kontinuierlich gemessene oder berechnete Qualitätsfunktion gibt. Zunächst haben wir die Annahme bestätigt, dass ein effektives Qualitätsmanagement nur dann möglich ist, wenn es eine kontinuierlich gemessene oder berechnete Qualitätsfunktion gibt. Wir haben Anwendungsfälle aufgedeckt, in denen es keine solche Funktion gibt und demonstriert, wie man solche Fälle in klassische kontinuierliche Optimierungsprobleme umwandeln kann. Ein solches Ergebnis wurde durch die Einführung der integralen Zielfunktion "kumulative Golden Batch Abweichung" erzielt, die aus der Theorie der dynamischen Zustandsraumsteuerung übernommen wurde. Die Einführung einer solchen Kriteriumsfunktion ermöglichte es uns, alle verfügbaren Analyse- und Optimierungsmethoden für reale Produktionsfälle zu nutzen, bei denen die Qualität nicht direkt gemessen wurde. Insbesondere waren wir in der Lage, die auf das vorgeschlagene Kriterium angewandte Faktorenanalyse durchzuführen und die Hauptgründe für schlechte Charenqualität zu finden, die periodisch auftraten. Darüber hinaus definierten wir für jede Phase des Prozesses die kleinste Obergrenze für Chargen mit guter Qualität und die größte Untergrenze für Chargen mit schlecher Qualität. Dieses dient zukünftig als Grundlage der Erstellung eines Online-Vorhersagetools für die Prozessqualität. Potenziell bietet der entwickelte Ansatz eine Grundlage zur Implementierung verschiedener intelligenter Steuerungsalgorithmen, einschließlich einiger Elemente der künstlichen Intelligenz [9].

6 Literatur

[1] Peter D. Mauch. Quality management: Theory and Application. CRC Press (Taylor & Francis Group). 2010. London - New York. Seite 143.
[2] Heiko Meyer, Franz Fuchs, Klaus Thiel. Manufacturing Execution Systems: Optimal Design, Planning, and Deployment. McGraw-Hill Companies. 2009. New York. Seite 248.
[3] Stephen Boyd, Lieven Vandenberghe. Convex Optimization. Cambridge University Press. 2004. Cambridge. Seite 716.
[4] CCSA 2009 SA/2009/12/Add.1. Guidelines for the implementation of quality assurance frameworks for international and supranational organisations compiling statistics. 2009. Prepared by Eurostat. Seite 28.
[5] Thomas Schulz [Hrsg.]. Industrie 4.0: Potenziale erkennen und umsetzen. Vogel Business Media. 2017. Würzburg. Seite 57 ff.
[6] Frederick W. Fairman. Linear Control Theory: The State Space Approach. John Wiley & Sons Ltd. 1998. West Sussex. Seite 315.
[7] Richard Vinter. Optimal Control. Springer Science+Business Media LLC (Birkhäuser). 2000. Boston. 507p.
[8] Proficy CSense 8.5 from GE Digital. GE Digital LLC, August 2021, San Ramon: https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/proficy-csense-from-ge-digital.pdf (abgerufen am 08.12.2021).
[9] Jos M.F.ten Berge. Least Squares Optimization in Multivariate Analysis. DSWO Press. 1993. Leiden. Seite 88.

Open Access. © 2022 Thomas Schulz, Ivan Nekrasov, Ph.D.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Entwicklung eines neuronalen Netzwerks als Basis zur automatisierten Holzartenerkennung

A. Bernöcker[1], N. Leiter[1], M. Wohlschläger[1], M. Versen[1]

Zusammenfassung

Holz ist ein vielseitig einsetzbarer nachwachsender Rohstoff. Neben seinem wirtschaftlichen Nutzen ist er für den Erhalt des Klimas unersetzlich. Eine sortenreine Sortierung für die Weiterverarbeitung von Altholz spielt für einen ressourcenschonenden Umgang eine wichtige Rolle. Um das Potenzial eines neuronalen Netzwerks basierend auf Messdaten der bildgebenden Fluoreszenzabklingzeitmessung für die Altholzsortierung aufzuzeigen, wurden zwei unterschiedliche Klassifikationsansätze auf Basis der Programmiersprache Python gewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass die bildbasierte Klassifizierung der Holzart mit einer Genauigkeit von 47,36 % noch ausbaufähig ist. Eine datenbasierte Klassifizierung der Holzart mit einer Identifikationsgenauigkeit von 98,28 % ist dagegen vielversprechend.

Stichwörter

FD-FLIM, Fluoreszenz, Fluoreszenzabklingzeit, Holzart, Neuronales Netz, Klassifizierung

1 Einleitung

Holz wird in der Wirtschaft vielseitig genutzt wird und kann in Deutschland sowohl stofflich als auch energetisch verwertet werden. Für einen ressourcenschonenden Umgang mit dem Primärrohstoff Holz, wird derzeit zunehmend an der Wiederverwendbarkeit von Altholz geforscht, da allein in Deutschland das jährliche Marktvolumen ca. 10 Millionen Tonnen Altholz beträgt [1]. Die Qualität des Altholzes spielt bei der Wiederverwendung eine wichtige Rolle und wird deshalb in vier Altholzkategorien unterschieden: A1 für unbehandeltes Altholz, A2 für Altholz ohne halogenorganische Verbindungen (wie PVC) oder mit Holzschutzmittel behandeltes Altholz, A3 für mit PVC aber ohne Holzschutzmittel behandeltes Altholz und A4, bei dem es sich um kontaminiertes Altholz wie beispielsweise Bahnschwellen, Fenster oder Türen handelt [2]. Derzeit wird das Altholz nach der Altholzverordnung durch Sichtkontrolle zu sortiert [2]. Eine zuverlässige und automatisierte Technik konnte noch nicht eingeführt werden. Gegenwärtig werden hauptsächlich zwei Techniken zur Identifizierung von Holz erforscht: Die Nahinfrarot-Spektroskopie und die Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie. Nach Mauruschat et. al. ist es möglich Holzarten mit Nahinfrarot-Spektroskopie zu identifizieren [3]. Die Erkennung wird jedoch durch die Überlagerung des Spektrums mit dem Absorptionsband des variablen Feuchtigkeitsgehalts im Holz erschwert. Die zweite Methode zur Identifizierung von Holz ist die Röntgenfluoreszenz-Spektroskopie [4]. Diese Methode ist nicht geeignet für eine automatisierte Holzidentifizierung, da nur Schadstoffe wie Schwermetalle mit hohen Ordnungszahlen identifiziert werden können. Somit besteht weiterhin der Bedarf an einer automatisierten Sortierungstechnik für Altholz. Im Laufe der Vorarbeiten konnte bereits mit Hilfe des Frequency-Domain Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy (FD-FLIM) Verfahrens nachgewiesen werden, dass die Identifikation der

[1] Technische Hochschule Rosenheim, Hochschulstr. 1, 83024 Rosenheim

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Holzart und Altholzkategorie aufgrund ihrer charakteristischer Fluoreszenzabklingzeiten möglich ist [5]. Hierbei wurde allerdings eine manuelle Klassifizierung anhand definierter Parameter durchgeführt. Um die manuelle Klassifizierung abzulösen und das Verfahren weiter zu automatisieren, wird der Einsatz eines neuronalen Netzwerks untersucht, das mit den Messdaten der FD-FLIM Messungen trainiert wird. Hierzu werden zwei Lösungsansätze in der Programmiersprache Python verfolgt: eine bildliche Klassifikation durch Merkmalserkennung und eine datenbasierte Klassifikation durch statistische Methoden. Die Klassifizierung der Holzart steht dabei im Vordergrund.

2 Stand der Technik

Um eine neue Methode der Holzartenerkennung vorzustellen, wird zunächst die Theorie der FD-FLIM (frequency domain fluorescence lifetime microscopy) Technik sowie die Grundlagen künstlicher neuronalen Netzwerken erklärt.

2.1 Die FD-FLIM Messtechnik

Fluoreszenz beschreibt die spontane Emission von Licht nach der Anregung eines Materials mit einem Lichtimpuls. Die Fluoreszenzabklingzeit dient in der Fluorometrie zur Unterscheidung verschiedener Fluorophore und liefert Informationen über die chemische Umgebung eines Fluorophors. Die Fluoreszenzabklingzeit gibt die Zeit an, die ein Molekül bei der Fluoreszenz in einem angeregten Zustand bleibt, bevor es ein Photon emittiert und damit in den Grundzustand zurückkehrt. Die Abklingkurve verläuft exponentiell und konvergiert gegen Null. Auf der Grundlage der Systemtheorie kann die Fluoreszenzanregung nicht nur durch einen Anregungspuls (Dirac-Puls) im Zeitbereich erfolgen, sondern auch durch eine Testfunktion wie einer Sinus- oder Rechteckschwingung mit einer bestimmten Modulationsfrequenz ω. Das Fluoreszenzsignal folgt der sinusförmigen Anregung mit gleicher Frequenz phasenverschoben um den Winkel φ. Darüber hinaus ist die Fluoreszenzschwingung in ihrer Amplitude gedämpft und in ihrem Gleichstromwert verschoben. In Abbildung 1 sind die Amplitude der Anregung B, die Amplitude der Fluoreszenzemission b, der Gleichstromwert der Anregung A und der Gleichstromwert der Fluoreszenzemission a sowie die Phasenverschiebung φ markiert [6].

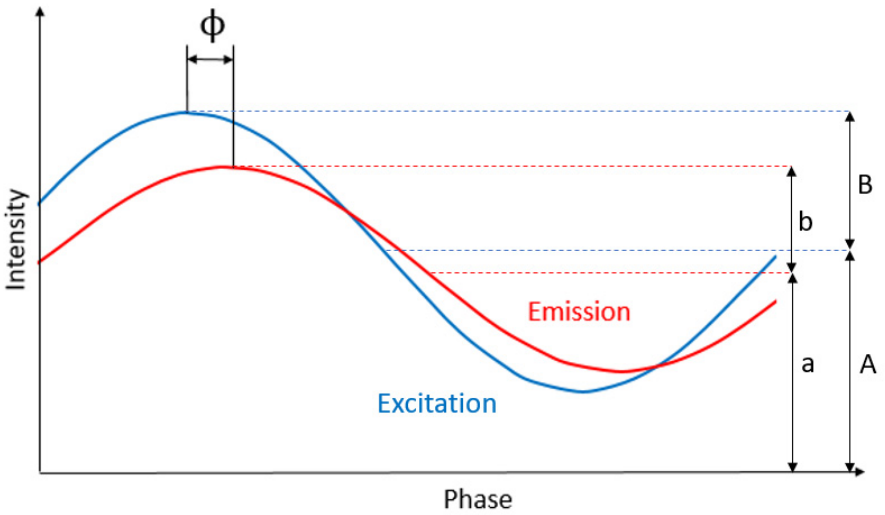


Abbildung 1: Darstellung der Phasenverschiebung φ, der Amplitudendämpfung B, b und der Gleichwertverschiebung A, a des Fluoreszenzsignals

Die Berechnung der Modulationstiefe M erfolgt über die Differenz der Amplitude und der Gleichstromwerte [6]:

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

$$M = \left(\frac{b}{a}\right) / \left(\frac{B}{A}\right) \tag{1}$$

Die Modulationstiefe M und die definierte Modulationsfrequenz lassen auf die modulationsabhängige Fluoreszenzabklingzeit τ_M schließen [6]:

$$\tau_M = \frac{\sqrt{\frac{1}{M^2} - 1}}{\omega} \tag{2}$$

Mit der festgelegten Modulationsfrequenz ω kann die Phasenverschiebung φ zur Berechnung der phasenabhängigen Fluoreszenzabklingzeit τ_{Ph} verwendet werden [6]:

$$\tau_{Ph} = \frac{1}{\omega} * \tan(\varphi) \tag{3}$$

Diese theoretischen Grundlagen bilden die Basis der FD-FLIM Kamera Technik. Der in [5] evaluierte Messaufbau mit einer FD-FLIM Kamera bestimmt die Intensität, die Phasenverschiebung, die Modulationstiefe, die Phasenabklingzeit und die Modulationsabklingzeit einer Holzprobe, welche in Form von ND2 Dateien vorliegen. Bei ND2 Dateien handelt es sich um multidimensionale Bildaufnahmen, welche 103,8 MB groß sind und aus fünf Ebenen bestehen. Jede Ebene bildet eine Matrix mit der Dimension von 1008x1004 Pixeln von den entsprechenden Kenngrößen (Intensität, Phasenverschiebung, Modulationstiefe, phasenabhängige Fluoreszenzabklingzeit und modulationsabhängige Fluoreszenzabklingzeit). Zudem werden Information (Metadaten) über die verwendete Kamera wie der Name, die Temperatur bei der Aufnahme oder die Belichtungszeit gespeichert.

2.2 Künstliche Neuronale Netzwerke

Künstliche neuronale Netzwerke (KNN) sind dem menschlichen Gehirn nachempfunden und werden für maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz eingesetzt. Die Nutzung von KNN ist speziell im Bereich von Big Data oder auch im Bereich der Bilderkennung weit verbreitet. In einem künstlichen Neuron werden die Signale des vorgelagerten Neurons verstärkt oder abgeschwächt. Eine Propagierungsfunktion wandelt die gewichteten Signale in einen Minimal- oder Maximalwert aus den Summen der Eingangssignale. Eine Aktivierungsfunktion berechnet anschließend den Zustand der Neuronen [7].
Da die Probleme der Regression und Klassifikation in der Informatik häufig vorkommen, gibt es hierfür sogenannte Frameworks (vorgefertigte Programmierstrukturen) wie Tensorflow Keras oder SciKit Learn. Tensorflow Keras ist eine von Google bereitgestellte Abstraktionsbibliothek, welche den Vorteil hat, dass Nutzer flexibel und im Baukastenprinzip KNN erstellen können. Zusätzlich bietet Tensorflow Keras eine große Auswahl an bereits vortrainierten Netzwerken [8]. SciKit Learn ist eine freie Softwarebibliothek für maschinelles Lernen auf der Basis von Python [9]. Für die Programmierung von neuronalen Netzwerken werden Hyperparameter verwendet, die vor dem Lernprozess festgelegt werden. Die Hyperparameter beeinflussen das Netzwerk hinsichtlich der Effizienz und Leistung. Eine optimale „Learning Rate“ führt zu guten Ergebnissen bei niedrigen Lernzeiten. Das Trainieren von neuronalen Netzwerken wird mit Epochen durchgeführt. Eine Epoche stellt dabei einen Zyklus dar, bei dem das neuronale Netz einmal mit allen Daten trainiert wurde. Um die Gefahr des „Overfitting“, also das „Auswendig Lernen“ des Netzes beim Trainieren des Netzwerks zu verkleinern, wird die Callback Funktion „Early Stopping“ definiert, welche das Training beendet, sobald der Fehler der Ergebnisse nach einer zuvor festgelegten Anzahl von Epochen stagniert [10].
Im Rahmen der Untersuchungen wurden zwei Arten von künstlichen Neuronalen Netzwerken gegenübergestellt: ein Convolutional Neural Network (CNN) für eine bildbasierte Klassifizierung mittels

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Tensorflow Keras und ein Multilayer Perceptron Network (MLP) für eine datenbasierte Klassifizierung mittels SciKit Learn.
Das CNN ist ein mehrschichtiges feedforward-Netz und gehört zu der Klasse der deepneural-Netze. Das CNN beinhaltet einen Kodierungsblock und einen Prädikationsblock. Im Falle eines Farbbildes, stehen die drei Dimensionen, also Höhe, Breite und Tiefe des Bildes jeweils in Form einer Matrix der „Convolutional Layer“ des Kodierungsblocks zur Verfügung. Zweidimensionales Arrays decken als Filter über das Faltungsprodukt Merkmale auf, wobei teilweise mehrere Filter kombiniert werden. Die Aktivierungsfunktion „Rectified Linear Unit Funktion“ setzt nach jeder Faltung negative Werte auf 0, sodass eine Nichtlinearität eingeführt wird. Es folgt ein „Pooling Layer“ zur Reduzierung der Dimensionalität über einen Filter ohne Gewicht. Üblich ist hier ein sogenannter „Max Pooling Layer“ für eine Weitergabe der maximalen Werte der Pixel. Der Prädikationsblock des CNN besteht aus einem fully-connected-Netz und hat als Ziel die Ausgabe der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Klassen über die Aktivierungsfunktion „Softmax“ [11].
Ein Perceptron ist ein Rechenmodell, welches die Lösung binärer Klassifikationsprobleme vereinfacht. Der Bias ermöglicht dabei dem Netz die Richtungslenkung der Entscheidungstrennlinie, was zu einem schnellen und qualitativ hochwertigen Trainingsprozess führt. Wie das CNN ist auch das MLP ein feedforward-Netz und zählt zu den artifical-neural-Netzen. Während der „Forward Propagation“ werden die Daten von einem „Input Layer“ erfasst. In mehreren „Hidden Layer“ erfolgt der Lernprozess, indem die Gewichte und der Bias berechnet werden und im Output Layer die daraus folgende Fehlerquote bestimmt wird. In der „Backward Propagation“ erfolgt durch die Verarbeitung dieser Informationen inklusive der Fehlerquote eine Neujustierung der Gewichte. Dieser Vorgang wird für einen minimal Fehler wiederholt [12].

3 Methodisches Vorgehen

Das gesamte Projekt wurde in der Programmiersprache Python entwickelt. Verwendet wurde die Python Version 3.8 mit der Entwicklungsumgebung PyCharm Community Edition 2019.3.3

3.1 Die Holzproben

Es werden standardisierte Holzproben der Holzarten Ahorn, Buche, Eiche, Fichte, Lärche und Kiefer verwendet. Die Proben werden an drei Seiten markiert, welche die Schnittrichtung radial, tangential oder Hirnholz bezeichnet. Jede der drei Seiten einer Holzprobe wird mittels FD-FLIM jeweils 16 mal mit den Wellenlänge von 405 nm und 488 nm vermessen, und die Daten werden in Form von ND2-Dateien gespeichert. Das Vorgehen bei den Messungen ist in [5] detailliert dargestellt.

3.2 Die Datenvorbereitung

Die generierten Daten werden über das Python Package „nd2reader“ eingelesen. Aus jeder ND2-Datei werden fünf Matrizen gemäß den fünf Lagen (Intensität, Phasenverschiebung, Modulationstiefe, phasenabhängige Fluoreszenzabklingzeit und modulationsabhängige Fluoreszenzabklingzeit) generiert und im Anschluss als TIF Bild mit der jeweiligen Lagenbezeichnung in einem Ordner gespeichert.
Für die bildliche Klassifizierung und die Verwendung des CNN werden die erstellten TIF Dateien für jede Holzart über das Python Package „tifffile“ geöffnet. Die Bilder werden anschließend für die spätere Betrachtung in ein RGB Bild umgewandelt und abgespeichert. Dieser Schritt ändert die Dimensionalität der Bilder von 1008x1004 auf 1008x1004x3. Für die Normierung der Intensität werden die Matrizen der Intensität mit der Belichtungszeit multipliziert. Um einen größeren Datensatz zu generieren, wurde eine Kombination aus phasenabhängiger Abklingzeit und Intensität kreiert. Zusätzlich werden die Trainingsbilder jeweils um 90, 180 und 270 Grad gedreht. Somit entsteht ein Datensatz aus

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

1404 Trainingsdaten, 144 Validierungsdaten und 84 Testdaten, was einer Gesamtbilderanzahl von 1632 entspricht.
Zur Umsetzung des zweiten Lösungsansatzes wurde ein MLP verwendet, das eine tabellarische Dateneingabe benötigt. Daher werden die ND2 Dateien über eine selbst erstellte Python Funktion geöffnet und die Matrizen der phasenabhängigen und der modulationsabhängigen Abklingzeit extrahiert. Aus den beiden Matrizen wird jeweils die Standardabweichung und der Mittelwert berechnet und über das Python Package „pandas“ als Tabelle gespeichert. Der Datensatz enthält 288 Messungen, der aus 48 Messungen der sechs Holzarten Ahorn, Buche, Eiche, Fichte, Lärche und Kiefer besteht. Aufgrund der Einteilung von 80:20 entsteht ein Trainingsdatensatz von 230 Messungen und ein Testdatensatz von 58 Messungen.

3.3 Die bildbasierten Klassifizierung

Die RGB Dateien werden mit einer Funktion wie folgt aufgeteilt: 60 Prozent Trainingsdaten, 25 % Validierungsdaten und 15 % Testdaten. Mit der von Tensorflor Keras bereitgestellten „Proprocessing“ Funktion des vortrainierten „MobileNet“ wird eine Normalisierung und Aufbereitung der Bilder durchgeführt. Nachdem die Bilder optimal vorbereitet wurden, wird das Netz über die Funktion „build_net“ erstellt. Zu Beginn der Netzwerkerstellung wird dazu das vortrainierte „MobileNet“ von Tensorflow Keras verwendet und als Basis-Model gespeichert. Im Basis-Modell werden die bereits abgestimmten Gewichte des Netzes eingefügt. Mit „Include_top=False“ werden die am Ende verwendeten fully-connected-Layer entfernt, da diese im Anschluss an das Transferlernen neu erstellt werden. Zudem muss dem Netz der benutzerdefinierte Input-Shape mitgeteilt werden. Das Model wird kompiliert und die Optimierungsfunktion „Adam“ mit einer Lernrate von 1e-4 wird an das Modell übergeben. Um „Overfitting“ zu vermeiden, wird ein „Early Stopping“ definiert. Insgesamt wird das Netz 50 Epochen trainiert mit einer „Batchsize“ von 10.

3.4 Die datenbasierten Klassifizierung

Für den Ansatz der datenbasierten Klassifikation wurde der „MLPClassifier“ von SciKit Learn verwendet. Der „MLPClassifier“ ist im Vergleich zu den vortrainierten Bildklassifizierungs-Modellen deutlich schneller zu trainieren und einfacher zu verwenden. Die vorbereite Datentabellen wird als „Pandas Dataframe“ eingelesen. Die Holzart (Klasse), welche dem Netz als Label dient, ist als String in der Tabelle hinterlegt. Ein Teil des „Preprocessing“ besteht darin, über einen „LabelEncoder“ von SciKit Learn die Klasse in einen nummerischen Wert umzuwandeln. Bei 6 Klassen erhält man somit eine Klassenbezeichnung von 0 bis 5. Mit Hilfe des „StandardScaler“ von SciKit Learn werden die zahlenbasierten Daten normalisiert und anschließend in Eingabedaten und Zieldaten aufgeteilt. Die Eingabedaten bestehen aus jeweils dem Mittelwert und der Standardabweichung der Intensität, der phasenabhängigen Abklingzeit und der modulationsabhängigen Abklingzeit. Als Zieldaten dienen die Klassen, die das Netz ausgeben soll. Die Eingabe- und Zieldaten werden jeweils 80:20 in Trainings- und Testdaten geteilt. Nachfolgend wird der „MLPClassifier“ erzeugt. Die „GridSearch“ Funktion durchläuft die möglichen Parameterkombination, trainiert das Netz damit und gibt am Ende aus, welche Kombination das beste Ergebnis geliefert hat. Die Kombination wird im Anschluss dem „MLPClassifier“ übergeben, sodass das Netz trainiert werden kann.

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

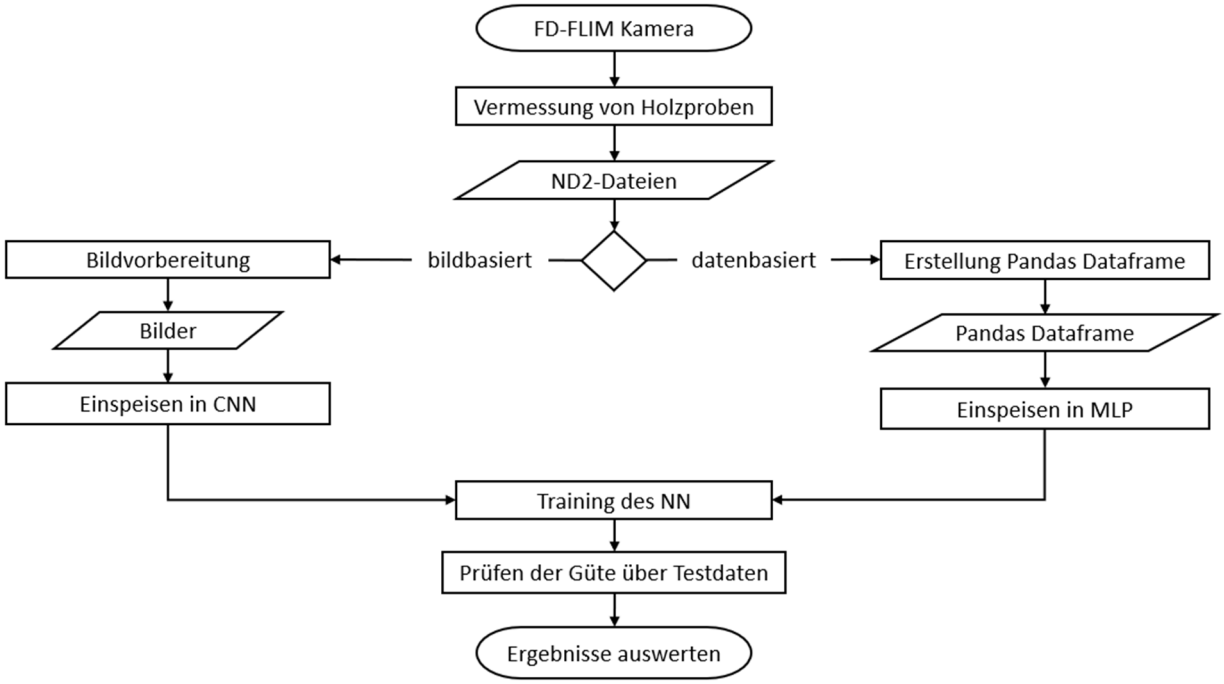


Abbildung 2: Flussdiagramm zur Übersicht des methodischen Vorgehens

4 Ergebnisse und Fazit

4.1 Die Testergebnisse des CNN

In Abbildung 2 ist das Testergebnis des CNN bei einer Anregungswellenlänge von 405 nm mit Hilfe einer Konfusionsmatrix dargestellt.

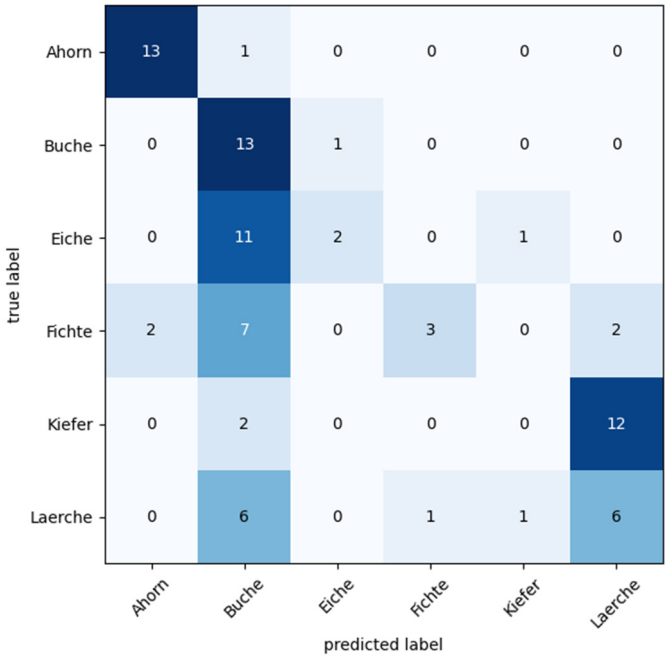


Abbildung 3: Konfusionsmatrix der bildbasierten Klassifizierung von Holzarten bei einer Anregung von 405 nm

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Anhand der Diagonalen in der Konfusionsmatrix ist zu erkennen, dass bei einer Anregungswellenlänge von 405 nm wird die Holzart für 37 von 84 Proben korrekt bestimmt wurden. Die Proben wurden mit einer Erkennungsgenauigkeit von 44,05% zugeordnet. Ahorn und Buche wurden 13 von 14-mal richtig erkannt und schnitten in diesem Test am besten ab. Lärche wurde lediglich 6 von 14-mal erkannt.

Abbildung 3 zeigt analog das Testergebnis des CNN bei einer Anregungswellenlänge von 488 nm.

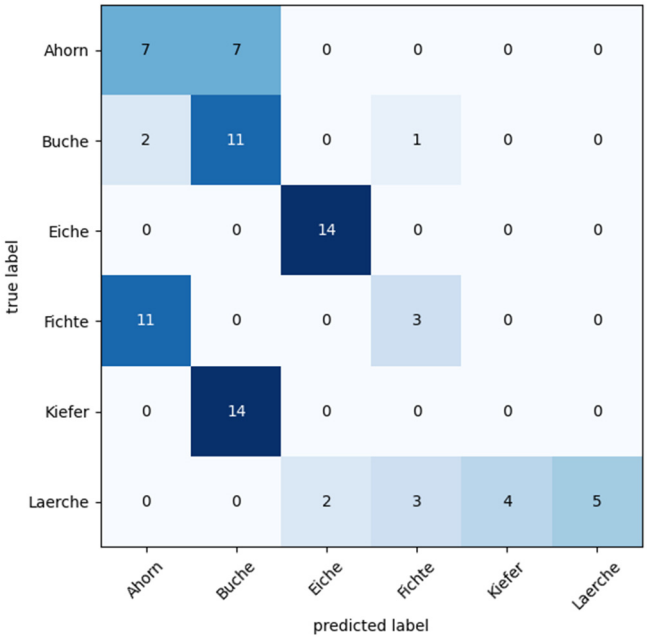


Abbildung 4: Konfusionsmatrix der bildbasierten Klassifizierung von Holzarten bei einer Anregung von 488 nm

Bei einer Anregungswellenlänge von 488nm wurde die Holzart für 40 von 84 Proben korrekt bestimmt. Dies entspricht 47,62% Erkennungsgenauigkeit. Eiche wurde 14 von 16-mal richtig erkannt und schnitt in diesem Test am besten ab. Die Identifikation der Holzarten Fichte, Kiefer und Lärche stellte sich hierbei noch sehr problematisch dar. Lediglich 3-mal wurde Fichte korrekt erkannt, Lärche 5-mal und Kiefer wurde stets falsch zugewiesen.

4.2 Die Testergebnisse des MLP

In Abbildung 4 ist das Testergebnis des MLP bei einer Anregungswellenlänge von 405 nm in einer Konfusionsmatrix dargestellt.

Die Matrix zeigt, dass bei einer Anregungswellenlänge von 405nm die Holzart für 57 von 58 Proben korrekt bestimmt. Dies entspricht einer Genauigkeit von 98,28 %. Ahorn, Eiche, Fichte und Kiefer wurden jeweils 10 von 10-mal und Buche 9-mal richtig erkannt. Lärche wurde einmal fälschlicherweise Fichte zugeordnet.

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

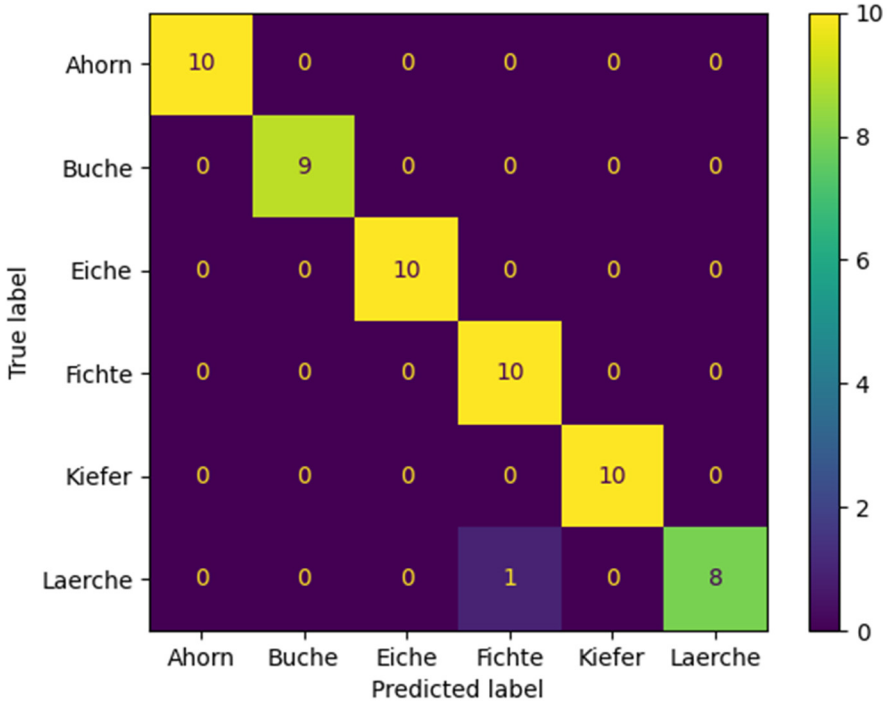


Abbildung 5: Konfusionsmatrix der datenbasierten Klassifizierung von Holzarten bei einer Anregung von 405 nm

In Abbildung 5 ist analog das Testergebnis des MLP bei einer Anregungswellenlänge von 488 nm dargestellt.

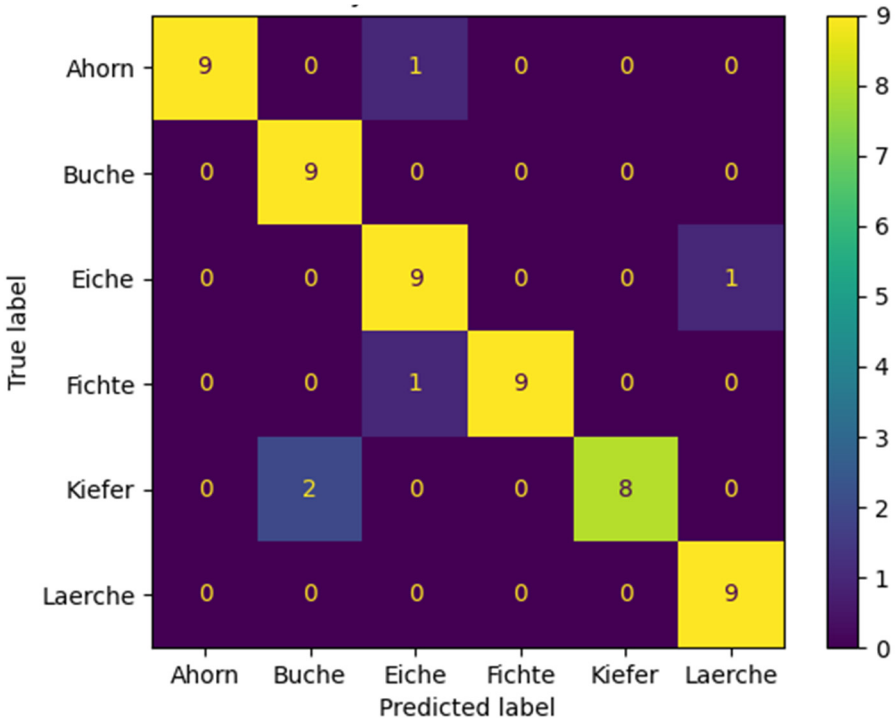


Abbildung 6: Konfusionsmatrix der datenbasierten Klassifizierung von Holzarten bei einer Anregung von 488 nm

Die Diagonale der Konfusionsmatrix zeigt, dass bei einer Anregungswellenlänge von 488nm die Holzart für 53 von 58 Proben korrekt bestimmt wurde. Dies entspricht einer Identifikationsgenauigkeit

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

von 91,38%. Buche und Lärche wurden jeweils 9 von 9-mal richtig erkannt und schnitten in diesem Test am besten ab. Die Identifikation der Holzarten Ahorn, Eiche und Fichte wurden jeweils einmal nicht erkannt. In zwei Fällen wurde Kiefer fälschlicherweise Buche zugeordnet.

4.3 Fazit

Die durchgeführten Tests zeigen zwei sehr unterschiedliche Ergebnisse für die verwendeten neuronalen Netze. Die bildliche Klassifizierung unter Verwendung eines CNN konnte mit Ergebnissen unter 50 % bis jetzt noch nicht die gewünschten Ergebnisse erzielen. Dennoch ist das Potenzial der Bildklassifizierung vorhanden. So könnten durch Erweiterungen des standardisierten Probensatzes und Bereinigung der Daten bessere Ergebnisse erreicht werden. Das Augenmerk sollte jedoch auf die datenbasierte Klassifizierung gerichtet werden. Mit einer Anregungswellenlänge von 405 nm wurden 57 von 58 Holzproben richtig zugewiesen, was einem Ergebnis von 98,28 % entspricht. Hier können die gewählten Parameter noch ausgearbeitet werden, da bis jetzt lediglich die Standardabweichung und Mittelwert der gesamten Matrix verwendet wurden. Die Testergebnisse der datenbasierten Klassifizierung der Holzart bei einer Anregungswellenlänge von 405 nm sind sehr vielversprechend und zeigen ein hohes Potenzial der FD-FLIM Technik für die Holzindustrie. Das Ergebnis soll mit größeren Datensätzen weiter evaluiert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Eine sortenreine Sortierung für die Weiterverarbeitung von Altholz spielt für einen ressourcenschonenden Umgang eine wichtige Rolle. Derzeit wird das Altholz durch Sichtkontrolle sortiert. Eine zuverlässige und automatisierte Technik konnte noch nicht eingeführt werden. Die Altholzsortierung soll in Zukunft automatisiert, präzise und fehlerfrei funktionieren, um eine optimale Verwendung des Altholzes zu gewährleisten. Daher wurde die Identifikation von Holzarten mittels FD-FLIM und neuronalen Netzwerken analysiert. Es wurden zwei neuronale Netze für die Holzartidentifikation entwickelt und an 6 Holzarten getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bildklassifizierung mittels CNN noch nicht für eine solide Identifikation von Holzarten geeignet ist. Eine datenbasierte Klassifizierung mittels MLP ist mit 98,28 % hingegen äußerst erfolgsversprechend. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Anregungswellenlänge von 405nm für die Identifikation von Holzarten besonders geeignet ist. Die Ergebnisse bestätigen somit, dass ein hohes Potenzial der Altholzsortierung mittels FD-FLIM in Kombination mit KNN vorhanden ist. Die Unterscheidung verschiedener Holzarten mittels neuronalen Netzes und FD-FLIM soll weiter ausgebaut und optimiert werden.

6 Literatur

[1] Meinlschmidt, Peter; Berthold, Dirk; Briesemeister, Robert: *Neue Wege der Sortierung und Wiederverwertung von Altholz*. In: Recycling und Rohstoffe, Band 6, 2013, S. 153-176

[2] Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholverordnung – AltholzV) (BGBl. I S. 3302), zuletzt geändert durch Art. 62 G v. 29.3.2017

[3] Mauruschat, D.; Plinke, B.; Aderhold, J.; Gunschera, J.; Meinlschmidt, P.; Salthammer, T.: *Application of near-infrared spectroscopy for the fast detection and sorting of wood–plastic composites and waste wood treated with wood preservatives.* In: Wood Sci Technol 50, 2016, S. 313–331. DOI: 10.1007/s00226-015-0785-x

[4] Hasan, R.; Solo-Gabriele, H.; Townsend T.: *Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology:* part II. Sorting efficiencies. In: Waste management, 31, 4, 2011a, S. 695–704. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.10.024.

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

[5] Leiter, N.; Wohlschläger, M.; Auer, V.; Versen, M.; Laforsch, C.: *A novel approach to identify wood species optically using fluorescence lifetime imaging microscopy*. Sensor and Measurement Science International Digital Conference 2021, AMA Service GmbH, ISBN: 978-3-9819376-4-0 , S. 169 – 170.
[6] Valeur, B.; Berberan-Santos, M.: *Moleculare Fluorescence*. WILEY-VCH Verlag, Weinheim 2012
[7] Schmitz, Julian: *Grundlagen Neuronaler Netze*. Fakultät für Informatik, Technische Hochschule München
[8] Hope, Tom; Resheff, Yehezkel S.; Lieder, Itay: *Einführung in Tensorflow*. O'Reilly Verlag, Mai 2018
[9] Brownlee, Jason: *Gentle introduction to scikit-learn a python machine learning library*. Python Machine Learning, 2014
[10] Steinwendner, Joachim; Schwaiger, Roland: *Neuronale Netze programmieren mit Python.* 2. Aufl., Rheinwerk. Bonn 2019
[11] IBM Cloud Education: *Convolutional neural networks*. Online: https://www.ibm.com/cloud/learn/convolutional-neural-networks, 2020
[12] Pandey, Shivangi: *Perceptron (Multilayer) Neural Network Algorithm.* Online: https://pianalytix.com/perceptronmultilayer-neural-network-algorithm, Pianalytix Edutech Pvt Ltd, 2020

Open Access. © 2022 A. Bernöcker, N. Leiter1, M. Wohlschläger1, M. Versen1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Untersuchungen zur echtzeitfähigen Bilderkennung mit neuronalen Netzen auf konventionellen Industriesteuerungen

C. Wree[1], R. Raßmann[2], J. Daâs[3], F. Bause[4], T. Schönfeld[5]

Zusammenfassung

Fertigungssysteme für die individualisierte Produktion erfordern Arbeitsabläufe, die von einzelnen Objekten abhängig sind. Maschinelles Lernen (ML) bietet die Möglichkeit, verschiedene Objekte mit Hilfe eines neuronalen Netzes zu klassifizieren. Abhängig von den Klassifikationsergebnissen können Entscheidungen für den nachfolgenden Produktionsschritt getroffen werden. Es wird untersucht, ob es möglich ist, ein neuronales Netz zur Bilderkennung in Echtzeit und in Koordination mit den Maschinen- und Bewegungssteuerungsaufgaben auszuführen. In dieser Arbeit wird die Umsetzung und Messung mit Hilfe einer SPS-Laufzeitumgebung auf einem Standard-Industrie-PC durchgeführt. Die Ausführungszeiten verschiedener Methoden zur Implementierung neuronaler Netze werden gemessen und verglichen. Das schnellste neuronale Netz benötigt eine durchschnittliche Ausführungszeit von nur 39 µs. Darüber hinaus werden die Eigenschaften der verschiedenen Methoden in Bezug auf das Training und die Implementierung der neuronalen Netze innerhalb verschiedener industrieller Steuerungen diskutiert.

Stichwörter

Maschinelles Lernen, Intelligente Fertigungssysteme, Individualisierte Produktion

1 Einleitung

Individualisierte Produktionssysteme werden vorgeschlagen, um Produkte für einen einzigen Kunden zu niedrigen Kosten herzustellen [1]. Für jedes dieser Produkte sind andere Fertigungsvorgänge erforderlich. Die Bilderfassung, -verarbeitung und -analyse (Machine Vision) ist eine wesentliche Komponente zur Unterstützung dieser produktabhängigen Vorgänge.
Herkömmliche Bildverarbeitungssysteme beruhen auf der Merkmalsextraktion [2]. Sobald die Produkte jedoch in Form, Farbe oder Oberflächenbeschaffenheit variieren, werden solche Bildverarbeitungslösungen komplex und sind nur mit großem Aufwand und Expertenwissen zu realisieren. In diesen Fällen kann Maschinelles Lernen (ML) sowohl den Programmieraufwand reduzieren als auch die Effizienz herkömmlicher Bildverarbeitungslösungen verbessern [3].
ML bietet die Möglichkeit, verschiedene Objekte mit Hilfe eines neuronalen Netzes zu klassifizieren. Abhängig von den Klassifizierungsergebnissen können Entscheidungen für den weiteren Betrieb getroffen werden. So ist es beispielsweise wünschenswert, dass ein Klassifizierungsergebnis in kürzester

1 Fachhochschule Kiel, Fachbereich Informatik und Elektrotechnik, Grenzstr. 5, 24149 Kiel
2 Fachhochschule Kiel, Fachbereich Informatik und Elektrotechnik, Grenzstr. 5, 24149 Kiel
3 Fachhochschule Kiel, Fachbereich Informatik und Elektrotechnik, Grenzstr. 5, 24149 Kiel
4 Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Hülshorstweg 20, 33415 Verl
5 Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Hülshorstweg 20, 33415 Verl

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Zeit vorliegt, um den nächsten Sollwert eines Bewegungssteuerungsbefehls zu bestimmen. In diesem Echtzeitkontext sind Modelle mit deterministischer Laufzeitkomplexität zu bevorzugen. Dazu gehört das Multilayer Perceptron (MLP) [3].
Bildverarbeitungssysteme für die Produktion werden entweder auf einem externen Computer [2], auf einer intelligenten Kamera [2] oder innerhalb einer SPS-Laufzeitumgebung, die in einem Industrie-PC [4] beheimatet ist, implementiert. Eine SPS-Laufzeitumgebung bietet den Vorteil, dass Maschinensteuerung, Bewegungssteuerung und Bildverarbeitung zentral auf einem Industrie-PC ausgeführt werden können. Dies ermöglicht eine effiziente zeitliche Synchronisation zwischen diesen verschiedenen Aufgaben. Außerdem werden Latenzzeiten und zusätzliche Schnittstellen vermieden.
In diesem Beitrag wird gezeigt, dass es auch möglich ist, ein neuronales Netz zur Bilderkennung zusammen mit den Aufgaben der Maschinen- und Bewegungssteuerung auf der gleichen SPS-Laufzeitumgebung auszuführen.
Der vorliegende Beitrag ist wie folgt aufgebaut. In Kapitel 2 wird erläutert, welche Schritte notwendig sind, um ML in industriellen Steuerungssystemen einzusetzen. Das MLP zur Bildklassifikation wird in Kapitel 3 vorgestellt. In diesem Beitrag werden Convolutional Neuronal Networks (CNN) nicht betrachtet, da sie einen wesentlich höheren Rechenaufwand erfordern und daher auch den Echtzeitanforderungen nicht gerecht werden. In Kapitel 4 werden zwei Anwendungsbeispiele für die individualisierte Produktionssysteme gezeigt. Der Einsatz und die Umsetzung von MLPs für die Anwendungsbeispiele wird in Kapitel 5 erläutert. Die Ausführungszeiten von neuronalen Netzen, die unterschiedlich in die SPS-Laufzeitumgebung integriert sind, werden in den Kapiteln 6 und 7 vorgestellt und verglichen. Darüber hinaus werden die Eigenschaften der verschiedenen Methoden in Bezug auf das Training und die Implementierung der neuronalen Netze erörtert.

2 Allgemeiner Prozess zum Einsatz von Maschinellem Lernen

Im Wesentlichen besteht der Prozess des Maschinellen Lernens und der Integration in ein industrielles Steuerungssystem aus vier Phasen.

- Sammeln von Daten
- Datenaufbereitung
- Training von Modellen
- Einsatz des Modells in der industriellen Steuerung

2.1 Sammeln von Daten

Je nach Anwendung können verschiedene Werkzeuge zur Datenspeicherung verwendet werden. Die Daten können in Dateien oder in einer Datenbank gespeichert werden. Die Datenbank kann sich lokal im Netz oder in der Cloud befinden. Wenn der Rechner mit einer öffentlichen oder privaten Cloud verbunden ist, können die Daten über einen Broker in einem Datenspeicher oder -lager gespeichert werden.
In manchen Fällen sind bereits Trainingsdatensätze verfügbar, die als Ausgangspunkt verwendet werden können. Im Laufe des Projekts können immer mehr Daten innerhalb der jeweiligen Anwendung gesammelt werden und dem ursprünglichen Datensatz hinzugefügt werden bzw. schließlich ganz ersetzen.

2.2 Datenaufbereitung

Um die Daten auf das zu lösende Problem anzuwenden, ist häufig eine Vorverarbeitung erforderlich. Dazu gehört das Screening der Trainingsdaten auf Ausreißer, die das Training erschweren können.

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-ND

Außerdem werden die Daten normalisiert, so dass sie innerhalb eines bestimmten Bereichs von Eingangswerten liegen. Bei der Verwendung von Bildern muss das Bild in manchen Fällen segmentiert und skaliert werden. Mit Hilfe der sogenannten „Data Augmentation“ können die Bilddaten aus dem vorhandenen Datensatz verändert und zusätzlich zu den Trainingsdaten hinzugefügt werden. Der Datensatz wird hierdurch künstlich erweitert [3]. Dies bietet z. B. die Möglichkeit Fremdeinflüsse wie z. B. eine variierende Beleuchtung oder einen verrauschten Hintergrund schon im Training des Modelles mit zu berücksichtigen.

2.3 Training von Modellen

Wenn die Trainingsdaten in Dateien oder Datenbanken vorliegen, müssen sie mit einem ML-Framework gelesen und verarbeitet werden. Eine Vielzahl von ML-Frameworks basieren auf Python™ oder R und sind quelloffen, wie z. B. Keras [5]. Andere sind kommerziell verfügbare Frameworks wie MATLAB [6]. Eine Vielzahl von Standardfunktionen und Toolboxen/Bibliotheken dienen als Schnittstelle für den Zugriff auf die gespeicherten Daten.
Die Arbeit mit dem ML-Framework umfasst die Datenvorverarbeitung und -auswahl, die Modellierung und das Training eines geeigneten ML-Algorithmus und schließlich die Evaluierung des gelernten Algorithmus. Das Ergebnis dieses Entwicklungsschrittes ist ein trainiertes ML-Modell.
Das gelernte Modell muss aus dem ML-Framework exportiert werden, um es in der industriellen Steuerung auszuführen. Viele der ML-Frameworks unterstützen das ONNX-Beschreibungsformat [7]. Aus proprietären Gründen ist es häufig wünschenswert die neuronalen Netze in ein binäres Format zu konvertieren.

2.4 Einsatz des Modells in der industriellen Steuerung

Es gibt viele Möglichkeiten, ein trainiertes neuronales Netz in die echtzeitfähige Laufzeit einer industriellen Steuerung zu integrieren. Ein wesentlicher Schritt ist die Umwandlung des Netzes in maschinenlesbaren Code mit Hilfe eines Compilers. Darüber hinaus spielt die Rechnerarchitektur der industriellen Steuerung eine wichtige Rolle. Hierzu gibt es mehrere Studien und Veröffentlichungen [8]. Nach erfolgreicher Integration werden die ML-Modelle zyklisch im Kontext der Echtzeitumgebung der industriellen Steuerung ausgeführt. Somit stehen alle in der Steuerung vorhandenen Daten in Echtzeit zur Verfügung und die Ergebnisse des ML-Modells können in Echtzeit ausgegeben und weiterverarbeitet werden.
Oft ist es notwendig, trainierte Modelle ohne Neukompilierung und ohne Neustart der Laufzeit zu ersetzen. Dazu müssen sich alle Modellbeschreibungsdateien auf dem Zielsystem befinden und können während der Ausführung der Laufzeit geladen werden.

3 Multilayer Perceptron für die Bildklassifikation

Im Bereich des Maschinellen Lernens gibt es eine Fülle von unterschiedlichen Modellen. Im Echtzeitkontext der Automatisierungstechnik sind Modelle mit deterministischer Laufzeitkomplexität geeignet und zu bevorzugen. Dazu gehört das Deep Multilayer Perceptron [2]. Es wird oft auch als "fully-connected" oder "dense neural network" bezeichnet. Dieses Netz hat wie in Bild 1 dargestellt eine Eingabeschicht, eine oder mehrere versteckte Schichten (hidden layer) und eine Ausgabeschicht. Jede Schicht umfasst eine bestimmte Anzahl von Neuronen, die wiederum aus Gewichten und einer Aktivierungsfunktion bestehen. Vollständig verbunden bedeutet, dass alle Neuronen in einer Schicht mit den Neuronen der nächsten Schicht verbunden sind. Deep MLPs haben mehrere versteckte Schichten. Bei reproduzierbaren Bedingungen können MLPs zur Bildklassifikation verwendet werden. In diesem Falle sind die rechenintensiveren Convolutional Neuronal Networks nicht notwendig [2].

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-ND

Ein mögliches Problem, welches während des Trainings eines neuronalen Netzes auftreten kann, ist dass das Netzwerk einer Überanpassung unterliegt („Overfitting“). Dies bedeutet, dass die zu erlernenden Parameter im Modell wenig generalisiert werden. Stattdessen spezialisiert sich das Netzwerk auf die Trainingsdaten. Overfitting macht sich unteranderem dadurch bemerkbar, dass die Fehlerrate im Training bei den Trainingsdaten immer kleiner wird, gleichzeitig steigt die Fehlerrate jedoch bei den unbekannten Testdaten an.
Durch das Hinzufügen eines „Dropouts“ kann einem „Overfitting“ beim Trainieren eines MLPs entgegengewirkt werden [3]. Der Dropout ist nur während des Trainings aktiv und ist im späteren trainierten Netzwerk nicht mehr vorhanden. Mit Hilfe der Dropout-Funktion können in Abhängigkeit der Dropoutrate eine bestimmte Anzahl von Neuronen zufällig innerhalb einer Sicht deaktiviert werden. Im Bild 1 ist der schematische Aufbau eines MLPs mit einem Dropout von 50% zwischen den beiden versteckten Schichten abgebildet. Während des Trainings werden jedes Mal zufällig 50% der Neuronen deaktiviert und geben somit keine Signale an die zweite versteckte Schicht weiter.

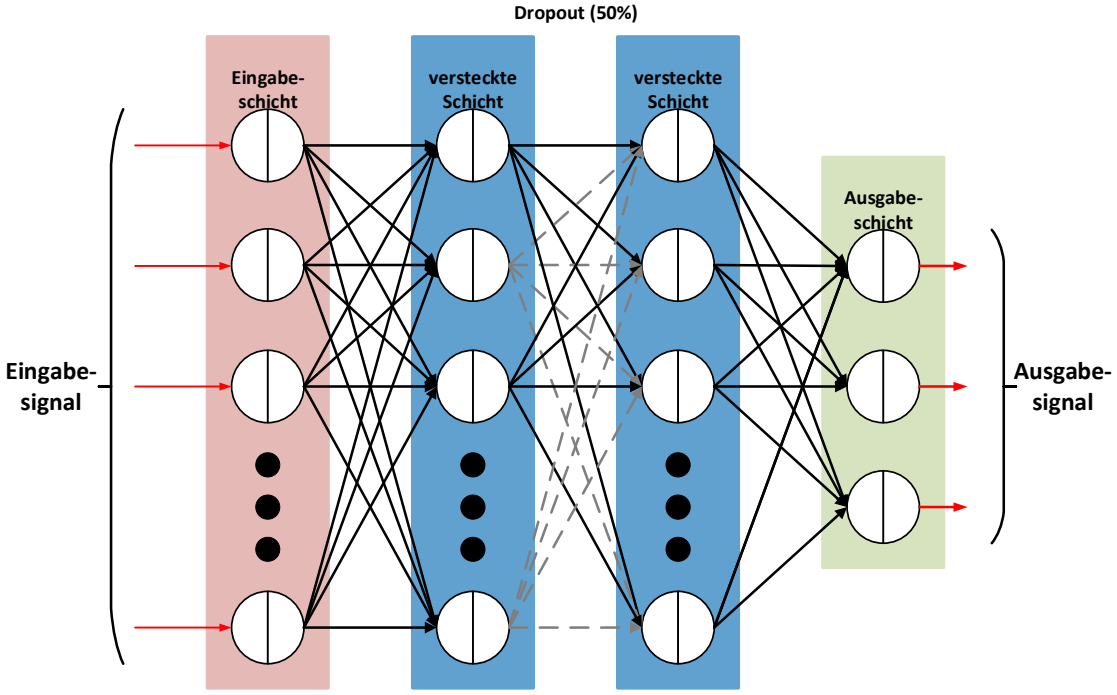


Bild 1: Multilayer Perceptron mit optionalen Dropout-Layer zwischen der ersten und zweiten versteckten Schicht

4 Anwendungsbeispiel in der Echtzeit: Das Produktionssystem

Ausgangslage für diese Untersuchung ist ein flexibles Produktionssystem. Es besteht aus einem Eingangs- und einem Ausgangslager für Werkstücke (Tags). Die Tags werden über einen Deltaroboter aus dem Eingangslager entnommen und können mit einem Transportsystem zu zwei Bearbeitungsmaschinen oder einem Kamerasystem transportiert werden (Bild 2). Das Kamerasystem verfügt über eine LED-Ringleuchte, um den Fremdlichteinfluss zu reduzieren. Die Maschinensteuerung, die Steuerung von Roboter und Transportsystem sowie die Bildverarbeitung werden auf unterschiedlichen Tasks aber in der gleichen Laufzeitumgebung ausgeführt. Die Zykluszeit der Task für den Deltaroboter bzw. für das Transportsystem beträgt dabei nur 250 µs.
Die Zielsetzung für das Produktionssystem ist die Entnahme eines individuellen Werkstücks aus dem Eingangslager, der Transport zum Kamerasystem, die Bildklassifikation mit Hilfe eines MLP und die Ablage des Werkstücks in unterschiedlichen Bereichen des Ausgangslager – je nach Klassifikationsergebnis. Dabei soll die Ausführung des MLPs innerhalb der Laufzeitumgebung so schnell wie möglich

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-ND

durchgeführt werden, damit das Klassifikationsergebnis vor dem nächsten Sollwert für die Bewegungssteuerung des Deltaroboters bzw. des Transportsystems vorliegt.
Das Anwendungsbeispiel wird für die Erkennung handgeschriebener Ziffern zwischen 0 und 9 getestet. Die zu klassifizierenden Ziffern werden von einer beliebigen Person auf die verschiedenen Werkstücke (Tags) geschrieben und unsortiert in ein Eingangslager gelegt. Die Tags werden zum Kamerasystem transportiert. Das jeweilige Bild wird vom MLP eingelesen und das Klassifikationsergebnis wird innerhalb der echtzeitfähigen SPS-Laufzeitumgebung berechnet. Abhängig von diesem Ergebnis werden die Ziffern 0 bis 4 in den oberen Bereich des Ausgangslagers und die Ziffern 5 bis 9 in den unteren Bereich des Lagers ausgegeben. Ein Video zu diesem Demonstrator ist in [9] zu sehen.
Das Anwendungsbeispiel „Ziffernklassifikation“ eignet sich, um das Verhalten bei Produkten mit einer hohen Variation innerhalb der Produktklasse zu untersuchen. Eine herkömmliche Bildverarbeitung ohne Verwendung des Maschinellen Lernens kann diese 10 Produktklassen nicht unterscheiden.
In einem weiteren Anwendungsbeispiel werden vier verschiedene Formen (Kreis, Dreieck, Quadrat, Stern) klassifiziert [10]. Sie werden entweder direkt auf die Werkstücke (Tags) gezeichnet oder auf schwarze Selbstklebefolie gezeichnet, ausgeschnitten und auf die Tags geklebt. In diesem Anwendungsfall kann das Objekt während des Transports seine Rotation ändern. Ein Video dieses Anwendungsbeispiels steht zur Verfügung [11].

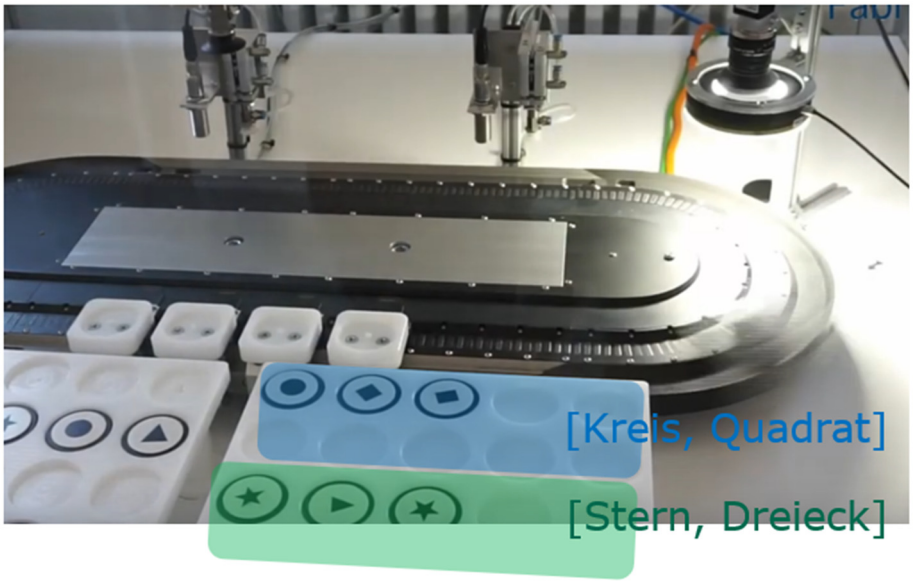


Bild 2: Anwendungsbeispiel zum Einsatz Maschinellen Lernens für individualisierte Produktion

5 Umsetzung

5.1 Sammeln von Daten

Das Training des neuronalen Netzes für das erste Anwendungsbeispiel wird mit dem MNIST-Datensatz [12] und für das zweite Beispiel mit dem four-shapes-Datensatz [13] durchgeführt. Der vorhandene Datensatz kann im nächsten Schritt mit Daten aus dem Produktionssystem erweitert werden, um erneut ein Training durchzuführen, das auf bessere Ergebnisse führt. Sobald genügend eigene Bilder aufgenommen sind, kann das Training komplett auf Daten aus dem Produktionssystem basieren.

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-ND

5.2 Datenaufbereitung

Die 8-bit Graustufenbilder, die im Produktionssystem aufgenommen werden, müssen vorverarbeitet werden. Die Schritte bestehen aus Bildsegmentierung, optionaler Filterung des verrauschten Hintergrunds, Skalierung und Umwandlung in einen Vektor. Diese Funktionen, einschließlich der Erfassung des Bildes, müssen von einer Bildverarbeitungsbibliothek bereitgestellt werden.
Zunächst ist es wichtig, das aufgenommene Bild auf den relevanten Bildausschnitt zu reduzieren (Festlegung der Region of Interest). Dieses Segment ist in Bild 3 rot hervorgehoben.

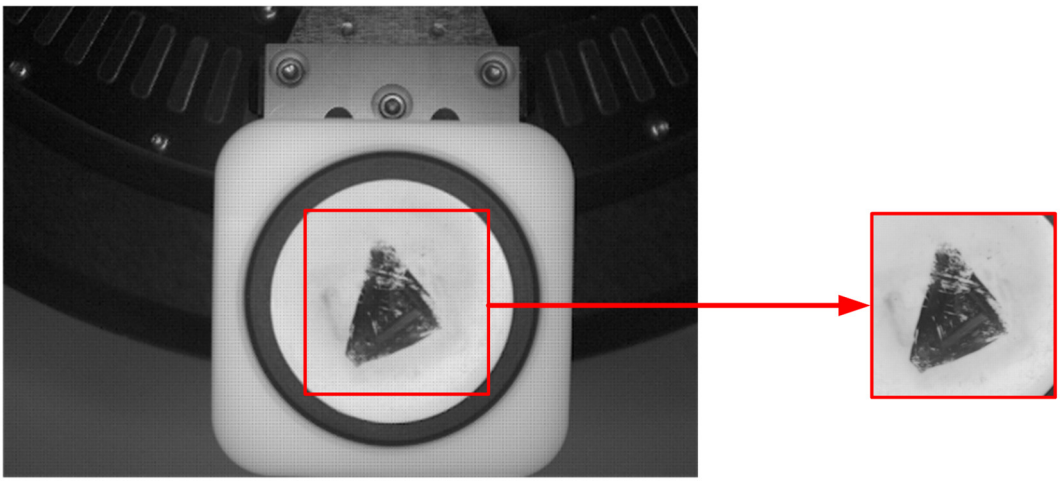


Bild 3: Festlegung der Region of Interest

Eine zweidimensionale Gaußsche Filterung mit integrierter linearer Histogrammspreizung kann verwendet werden, um die Ziffer bzw. die Form vom Rauschen zu trennen. Diese Filterung ist optional und wird nur für das erste Anwendungsbeispiel „Ziffernklassifikation“ durchgeführt.
In beiden Anwendungsbeispielen werden für das Training Bilder mit einer Datengröße von 28x28 Pixeln verwendet. Die Bilder vom original four-shapes-Datensatz besitzen eine Datengröße von 200x200 Pixeln und werden zur Vergleichbarkeit der beiden Anwendungsbeispiele auf eine einheitliche Datengröße von 28x28 Pixel verkleinert. Es ist jedoch auch möglich, eine höhere Auflösung zu verwenden, die insbesondere im zweiten Anwendungsbeispiel zu besseren Klassifikationsergebnissen führen kann.
Die Größe des Bildsegments muss dieselbe Datengröße wie die Trainingsdaten besitzen. Zu diesem Zweck wird die bilineare Filterung gewählt, die das Bildsegment durch eine lineare Interpolation auf die entsprechende Pixelanzahl verkleinert, wie in Bild 4 gezeigt.

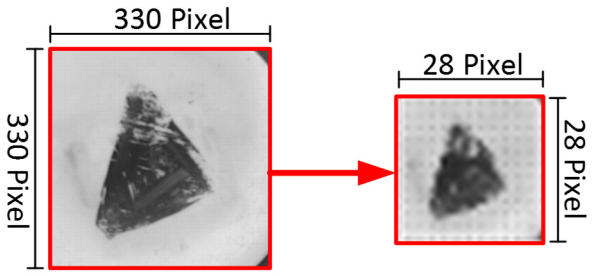


Bild 4: Skalierung des Bildsegmentes (ohne zweidimensionale Filterung)

Das MLP erwartet einen Eingangsvektor. Daher muss das Bild in einen Vektor der Länge 784 umgewandelt werden. Der Eingangs- und Ausgangsvektor des MLPs ist vom Datentyp LREAL oder REAL.

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-ND

Zusätzlich zur Umwandlung der Bilder in Vektoren werden die Werte der Pixel auf einen Bereich zwischen 0 und 1 normalisiert, indem alle Werte durch 255 dividiert werden.

5.3 Trainieren des Modells

Das Training wird mit Keras bzw. MATLABs "Neural Networks Pattern Recognition" durchgeführt.
Im Falle von Keras kann das Training in Google Colab stattfinden. Die bereitgestellte Rechenleistung ist sehr groß, und das Training kann auf einem Grafikprozessor erfolgen. Dies hat den Vorteil, dass die benötigte Trainingszeit im Vergleich zum Training auf einem Standard-PC sehr kurz ist. Außerdem können sehr viele Daten gleichzeitig in das Netz geladen werden.
Bei Verwendung von MATLAB kann das Training über die Cloud-Lösung "MATLAB Online" erfolgen. Offline-Trainingsoptionen sind für Keras und MATLAB ebenfalls verfügbar.
Das Training für die Ziffernklassifikation in Keras bzw. MATLAB basiert auf dem gleichen Modell. Es besteht aus einer Eingabeschicht mit 784 Neuronen und einer Ausgabeschicht mit 10 Neuronen. Zwischen der Eingabe- und der Ausgabeschicht werden zwei versteckte Schichten mit je 90 Neuronen verwendet. Für die versteckten Schichten wird die Aktivierungsfunktion "sigmoid" und für die Ausgabeschicht die Aktivierungsfunktion "softmax" verwendet.
Die Netzwerkarchitektur für die Klassifikation der Formen besitzt einen ähnlichen Aufbau. Die Eingabeschicht besteht aus 784 Neuronen. Anschließend folgen zwei versteckte Schichten mit 512 und 256 Neuronen. Bei beiden versteckten Schichten wird die Aktivierungsfunktion „sigmoid“ verwendet. Die beiden versteckten Schichten besitzen außerdem eine Dropoutrate von 70%. Die Ausgabeschicht besteht aus vier Neuronen mit der Aktivierungsfunktion „softmax“.
Bei Keras wird ADAM als Optimierer gewählt, bei MATLAB ist es der Scaled Conjugate Gradient Algorithmus. In beiden Fällen wird die kategoriale Kreuzentropie als Verlustfunktion verwendet.
Durch die Verwendung von Dropout-Layern können die Ergebnisse für die Klassifikation der Formen im zweiten Anwendungsbeispiel deutlich verbessert werden. Dropout-Layer werden aktuell von MATLABs "Neural Networks Pattern Recognition" nicht unterstützt. Somit wird das Training für das zweite Anwendungsbeispiel in Keras durchgeführt.
Der Original-Datensatz [13] für das Anwendungsbeispiel zur Klassifikation der Formen wird erweitert, in dem der Datensatz erneut geladen und jedes Bild mit Rauschen überlagert wird. Der Datensatz besteht damit aus insgesamt 26308 Bildern. Für das Trainieren über 150 Epochen mit Keras benötigt Google-Colab bei einer „Batch Size“ von 512 insgesamt 82,1 Sekunden.

5.4 Einsatz des Modells in der industriellen Steuerung

Der wesentliche Schritt für den Einsatz des neuronalen Netzes ist seine Umwandlung in maschinenlesbaren Code mit Hilfe eines Compilers. Das Produktionssystem läuft auf einem Industrie-PC. Es beherbergt die Steuerung der Maschine selbst, die Steuerung des Transportsystems, die Steuerung des Deltaroboters, die Bildverarbeitung und das neuronale Netz. Im Folgenden werden drei Optionen für die Implementierung eines trainierten neuronalen Netzes in eine SPS-Laufzeitumgebung vorgestellt.

- Option 1: Nach dem Training eines MLPs mit MATLAB wird das neuronale Netz in einen Simulink-Block mit einem Eingangsvektor und einem Ausgangsvektor exportiert. In einem nächsten Schritt kann der PLC-Coder von Simulink einen Funktionsbaustein für Codesys, B&R Automation Studio, Siemens TIA Portal, Rexroth Indraworks, Rockwell Studio oder Beckhoff TwinCAT 3 generieren. Im Fall des Produktionssystems wird ein Funktionsbaustein für TwinCAT 3 generiert.
- Option 2: MATLAB wird für das Training des MLPs verwendet. Das neuronale Netz wird in einen Simulink-Block exportiert, wie in Option 1 geschehen. Im nächsten Schritt wird das TwinCAT-Target für Simulink verwendet, um das neuronale Netz in C++-Code zu konvertieren und eine ausführbare TwinCAT-Laufzeitdatei zu erstellen, die in die TwinCAT-Lösung integriert werden kann.

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-ND

– Option 3: Das Training des MLPs wird mit Keras durchgeführt und als ONNX-Datei exportiert. Mit dem ML Model Manager der TwinCAT-Bibliothek TF3810 [14] wird sie in eine Binärdatei umgewandelt. Diese Datei wird geladen und in der TwinCAT-Laufzeit mit Hilfe von Funktionsbausteinen der TF3810-Bibliothek ausgeführt.

Die Produktionsanlage wird mit einer TwinCAT-Laufzeit betrieben, die auf einem Industrie-PC C6920 von Beckhoff mit einem Intel®-Celeron®-T3100-1,9-GHz-2-Core-Prozessor gehostet wird. Die verwendete Laufzeitumgebung ist TwinCAT 3.1 Build 4024[6].

6 Ergebnisse

Die drei Optionen werden in der oben beschriebenen SPS-Laufzeitumgebung verglichen. Insgesamt wird jedes Netzwerk jeder Option einhundertmal ausgeführt. Gemessen wird die Zeitspanne von der Bereitstellung der Eingaben bis zum Empfang der Ausgaben des neuronalen Netzes.
Die durchschnittliche / maximale / minimale Ausführungszeit für das neuronale Netz der Ziffernklassifikation von Option 1 beträgt 217 µs, 221 µs und 214 µs. Die durchschnittliche / maximale / minimale Ausführungszeit von Option 2 beträgt 99 µs, 103 µs und 98 µs. Die durchschnittliche / maximale / minimale Ausführungszeit von Option 3 beträgt 54 µs, 59 µs und 53 µs.
Eine weitere Reduzierung der Ausführungszeit der Netzwerke kann durch die Veränderung des Datentyps im neuronalen Netz erreicht werden. Wird der Datentyp von LREAL auf REAL verändert, so verringert sich die durchschnittliche Ausführungszeit bei der Option 1 auf 156 µs und bei der Option 3 auf 39 µs. Bei der Veränderung des Datentyps sind keine signifikanten Abweichungen der Ergebnisse der Netzwerke im Vergleich zum Datentyp LREAL festgestellt worden. Eine Änderung des Datentyps von LREAL auf REAL ist bei der Option 2 nicht möglich gewesen.
Für das zweite Anwendungsbeispiel zur Identifikation der vier Formen beträgt die durchschnittliche Ausführungszeit 275 µs unter Verwendung des Datentyps REAL.

7 Diskussion

Für die erste Option sind folgende Punkte zu nennen:

1. Das Arbeiten mit MATLAB /Simulink wird oft als intuitiv empfunden. Der Export des neuronalen Netzes mit dem PLC-Coder ist einfach.
2. Der Export aus Simulink über den PLC-Coder ist für alle gängigen SPS-Entwicklungsumgebungen möglich.
3. Die PLC-Coder Toolbox ist nicht im Standardumfang von MATLAB enthalten und erhöht die MATLAB-Lizenzkosten.
4. Der Compiler ist ein generischer Code-Translator und ist nicht für neuronale Netze optimiert.
5. Das neuronale Netz benötigt eine durchschnittliche Ausführungszeit von 217 µs. Es ist damit etwa viermal so langsam wie die schnellste Option (3).

Für die zweite Option gilt folgendes:

1. Der Export des neuronalen Netzes mit Simulink Coder erzeugt plattformunabhängigen C/C++ Code. Es wird jedoch ein herstellerspezifisches Target benötigt, um das neuronale Netz in die SPS-Laufzeitumgebung einzubinden.

[6] Es ist zu betonen, dass die folgenden Ergebnisse für eine SPS-Laufzeitumgebung gelten, die auf einem Intel-Multicore-Prozessor beheimatet ist. Es gibt auch Möglichkeiten, die neuronalen Netze auf separaten Prozessoren auszuführen. Siemens bietet z. B. das Erweiterungsmodul TM-NPU [15] für die S7-1500 an, auf dem ein neuronales Netz ausgeführt werden kann.

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-ND

2. Die Integration des neuronalen Netzes in die SPS-Laufzeitumgebung mittels herstellerspezifischer Targets ist auf eine Teilmenge von Automatisierungsanbietern beschränkt. Sie ist oft nur für sogenannte Soft-SPSen möglich. Bei klassischen hardwarebasierten SPSen ist dies nicht möglich.
3. Der Simulink Coder in Verbindung mit der TE1400 von TwinCAT ist im Vergleich zum SPS-Coder kostengünstig.
4. Der Coder verwendet einen Code-Translator, der für ein breites Spektrum von Aufgaben geeignet ist und daher nicht für neuronale Netze optimiert ist.
5. Das neuronale Netz benötigt eine durchschnittliche Ausführungszeit von 99 µs. Es ist damit etwa doppelt so langsam wie die schnellste Option (3).

Bei der Verwendung von MATLAB für das Training des neuronalen Netzes (erste und zweite Option) muss zwischen flachen neuronalen Netzen und tiefen neuronalen Netzen unterschieden werden, da hierfür unterschiedliche MATLAB-APIs (die jedoch in derselben Toolbox verfügbar sind) verwendet werden. Ein fließender Übergang zwischen diesen beiden APIs ist nicht möglich. So werden beispielsweise Dropout-Schichten in den flachen neuronalen Netzen von MATLAB nicht unterstützt.
Die dritte Methode unter Verwendung von Keras und TwinCAT 3 Machine Learning Inference Engine TE3810 hat die folgenden Eigenschaften:

1. Keras ist kostenlos und ein weit verbreitetes ML-Framework in der industriellen Umgebung. Zwischen den verschiedenen Toolboxen gibt es keine Unterschiede in Bezug auf Training, Modellstruktur und Funktionsumfang. Die Verwendung von Dropout-Layern ist möglich.
2. Ein Import des neuronalen Netzes ist über das Standardformat ONNX [7] möglich und kann in eine Binärdatei umgewandelt werden. Somit ist ein Know-how-Schutz möglich.
3. Verschiedene neuronale Netze können während der Ausführung der SPS-Runtime geladen werden.
4. Es ist möglich, Fehlerzustände beim Laden und Ausführen des Netzes abzufragen.
5. Der verwendete Compiler ist für neuronale Netze optimiert.
6. Das neuronale Netz benötigt eine durchschnittliche Ausführungszeit von nur 54 µs, das ist etwa doppelt so schnell wie die zweite Option und etwa viermal so schnell wie die erste Option.
7. Es ist auch möglich, den Datentyp REAL statt LREAL für den Eingangs- bzw. Ausgangsvektor des MLP zu verwenden. In diesem Fall beträgt die Ausführungszeit nur 39 µs statt 54 µs.

Die Abweichung zwischen den Ausführungszeiten der beiden Anwendungsbeispiele lässt sich damit erklären, dass das Modell für den four-shape-Datensatz mehr als fünfmal so viele zu erlernende Parameter besitzt. Somit steigt die Rechenzeit für die Klassifizierung.

8 Fazit

Die Ausführung von neuronalen Netzen zur Bildanalyse wird in Sub-Millisekunden demonstriert. Im besten Fall werden die Klassifizierungsergebnisse auf einem Standard-Industrie-PC in nur 39 µs berechnet. Übliche Bewegungssteuerungsaufgaben werden typischerweise in 1 - 2 ms ausgeführt. In der obigen Anwendung ist die Bewegungssteuerungsaufgabe für das Transportsystem und den Deltaroboter sogar 250 µs schnell. Das heißt, der nächste Sollwert für die Bewegungssteuerung muss innerhalb der nächsten Zykluszeit von nur 250 µs vorliegen. Es wird gezeigt, dass selbst in dieser anspruchsvollen Echtzeitumgebung ausreichend Zeit bleibt, um die Bilder zu klassifizieren und die einzelnen Produkte in Abhängigkeit vom Klassifizierungsergebnis zu bewegen.
Der wichtigste Schritt zum Einsatz des neuronalen Netzes ist seine Umwandlung in maschinenlesbaren Code mit Hilfe eines Compilers. Der Compiler der TwinCAT 3 Neural Network Inference Engine TF3810 ist der effizienteste, da er für neuronale Netze optimiert ist. Darüber hinaus lassen sich damit während der Ausführung der SPS-Laufzeitumgebung verschiedene neuronale Netze laden. Dies bietet den Vorteil, dass individualisierte Produktionssysteme bei einem Wechsel des neuronalen Netzes nicht angehalten, neu konfiguriert und gestartet werden müssen.

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-ND

Die beiden Anwendungsbeispiele konzentrieren sich auf Produktionssysteme, deren Produkte in ihrer Beschaffenheit variieren können. Dazu können auch Qualitätseigenschaften gehören. In diesen Fällen kann Maschinelles Lernen (ML) sowohl den Programmieraufwand reduzieren als auch die Effizienz herkömmlicher Bildverarbeitungslösungen verbessern und so flexible und agile Produktionsprozesse ermöglichen.

9 Quellen

[1] Y. Koren, "The Local Factory of the Future for Producing Individualized Products," in The Bridge, National Academy of Engineering, Band 51, Nr. 1, S. 20-26, April 2021.

[2] C. Demant, et. al., Industrielle Bildverarbeitung, 2011, Springer Verlag.

[3] J. Frochte, „Maschinelles Lernen“, 2019, Carl Hanser Verlag München.

[4] Beckhoff, TF7xxx | TwinCAT 3 Vision, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.beckhoff.com/en-us/products/automation/twincat/tfxxxx-twincat-3-functions/tf7xxx-tc3-vision

[5] Keras, Zugegriffen 28.11. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://keras.io/

[6] MathWorks, MATLAB, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: https://de.mathworks.com/products/matlab.html

[7] ONNX Supported Tools, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: http://onnx.ai/supported-tools

[8] M. Li et al., "The Deep Learning Compiler: A Comprehensive Survey," in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Band 32, Nr. 3, S. 708-727, März 2021, doi:10.1109/TPDS.2020.3030548.

[9] Fachhochschule Kiel, et al., Machine learning for image recognition in the real-time context of industrial control systems, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=KmPGQ2w_Peg&t=3s

[10] J. Fiedler, “Maschinelles Lernen zur Formerkennung in einem flexiblen Fertigungssystem zur Unterstützung individualisierter Produktion“, Bachelor-Thesis, Fachbereich Informatik und Elektrotechnik, Fachhochschule Kiel, Kiel, 2021.

[11] Fachhochschule Kiel, et al., Real-time object recognition with neural networks for industrial control systems, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=DXfj88JkX5YY

[12] Y. LeCunn et al., THE MNIST DATABASE of handwritten digits, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: http://yann.lecun.com/exdb/mnist/

[13] Smeschke, Four Shapes, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kaggle.com/smeschke/four-shapes

[14] Beckhoff, TF3810 | TwinCAT 3 Neural Network Inference Engine, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.beckhoff.com/en-us/products/automation/twincat/tfxxxx-twincat-3-functions/tf3xxx-tc3-measurement/tf3810.html

[15] Siemens, SIMATIC S7-1500 TM NPU, Zugegriffen: 28.11.2021. [Online]. Verfügbar unter: https://new.siemens.com/global/de/produkte/automatisierung/systeme/industrie/sps/simatic-s7-1500/simatic-s7-1500-tm-npu.html

Open Access. © 2022 C. Wree, R. Raßmann, J. Daâs, F. Bause, T. Schönfeld
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.–11.03.2022

3D-Objekterkennung mit Jetson Nano und Integration mit KUKA KR6-Roboter für autonomes Pick-and-Place

Akhila Pullela[1], Elmar Wings[2]

Zusammenfassung

Bildverarbeitungssysteme bieten innovative Lösungen für den Fertigungsprozess. Kameras und zugehörige Bildverarbeitungssysteme können zur Identifizierung, Prüfung und Lokalisierung von Teilen auf einem Förderband oder in einem Behälter mit Teilen eingesetzt werden. Roboter werden dann eingesetzt, um jedes Teil aufzunehmen und im Montagebereich zu platzieren oder sogar um die Grundmontage direkt durchzuführen. Das System für dieses Projekt besteht aus einem Roboter Kuka KR6 900, der die Position (x-, y- und z-Koordinaten des Objektschwerpunkts) und die Ausrichtung eines Bauteils von einem Bildverarbeitungssystem basierend auf einem Jetson Nano erhält. Das Ziel dieses Projekts ist es, eine automatische Erkennung eines Objekts mit Hilfe einer 2D-Kamera und der Auswertung mit dem Deep Learning Algorithmus Darknet YOLO V4 [1] durchzuführen, so dass der Roboter das Objekt greifen und platzieren kann. Dieses Projekt verwendet zwei verschiedene Objekttypen: einen Quader und einen Zylinder. Die Bilderkennung erfolgt mit Hilfe des Jetson Nano, dort erfolgt aus den Pixelkoordinaten die Berechnung der realen Koordinaten, die dann über die TCP/IP-Schnittstelle des Kuka KR6 900 zur Durchführung der Entnahme und Platzierung übermittelt werden. Die Flexibilität des Roboters, dessen Steuerung auf diese Weise von der Bildverarbeitung unterstützt wird, kann den Bedarf an präzise konstruierten Teilezuführungen verringern und so die Flexibilität in der Fertigungszelle erhöhen und kurze Produktionsläufe und Anpassungsfähigkeit ermöglichen.

Stichwörter

Jetson Nano, Kuka, Bilderkennung, yolo, Pick-and-Place

1 Stand der Technik

Pei-Chi Huang und Aloysius K. Mok [2] schlugen 2018 eine Methode für die Amazon Picking Challenge vor, bei der die Informationen vom Xtion-Kamerasensor für etwa 18 Objekte geliefert wurden und ein untexturiertes 3D-Netz durch Object Recognition Kitchen rekonstruiert wurde. Anschließend wurden alle Objektnetze und idealen Griffpositionen in einer CouchDB-Datenbank für spätere Abfragen gespeichert. Um das Zielobjekt in einer Gruppe von Objekten zu erkennen, wurde YOLO eingesetzt, um einen Deep-Learning-Klassifikator zu trainieren, der die Objekte erkennt und die gewünschte Region of Interest (ROI) in einer Kameraansicht in Echtzeit liefert. LineMOD wurde für den Vorlagenabgleich verwendet, um die Position des Objekts zu ermitteln.
Shete, Pritam Prakash und andere [3] schlugen 2015 ein stereobildgesteuertes Telerobotiksystem für autonome Pick-And-Place-Operationen vor. Sie verwendeten ein Paar IP-Kameras als Stereokamera, einen 3D-fähigen Monitor für die Anzeige von Stereoinhalten und ein NVIDIA 3D Vision Pro System für die Verwaltung. Die Koordinatensysteme des Roboters und des stereoskopischen Systems werden

[1] B.Eng. Akhila Pullela, HS Emden-Leer, D-26723 Emden
[2] Prof. Dr. rer.nat Elmar Wings, HS Emden-Leer, D-26723 Emden

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

mithilfe eines planaren Schachbrett-Kalibrierungsmusters in ein vordefiniertes Weltkoordinatensystem transformiert. Für das stereoskopische System wird ein Fehler von weniger als 2 mm in X- und Y-Richtung und weniger als 5 mm in Z-Richtung, der Blickrichtung, angegeben.
T. Kotthauser und G. F. Mauer [4] schlugen eine Methode vor, bei der die Kamerakalibrierung anhand von Kalibrierungsobjekten mit bekannter Geometrie durchgeführt wird, die an bekannten räumlichen Positionen von der Kamera platziert werden. Die räumlichen Positionen werden mittels Triangulation in Matlab rekonstruiert. Eine 3D-Szene wurde aus 2 ebenen Bildern unter Verwendung der epipolaren Geometrie rekonstruiert. Die Fundamentalmatrix, die beliebige Punkte in der 3D-Szene mit ihrem jeweiligen planaren Bild verbindet, wurde mit dem Acht-Punkte-Algorithmus gefunden.
P. Andhare und S. Rawat [5] schlugen eine Methode vor, bei der sie einen Industrieroboter so programmierten, dass er mit Hilfe des maschinellen Sehens ein Pick-And-Place-Verfahren durchführt. Die maschinelle Programmierung umfasst die Objekterkennung, die Bildvorverarbeitung, die Umwandlung von Pixelkoordinaten in Weltkoordinaten unter Verwendung von Transformationseigenschaften und die Berechnung der Ausrichtung des Objekts.

2 Ziele des Projekts

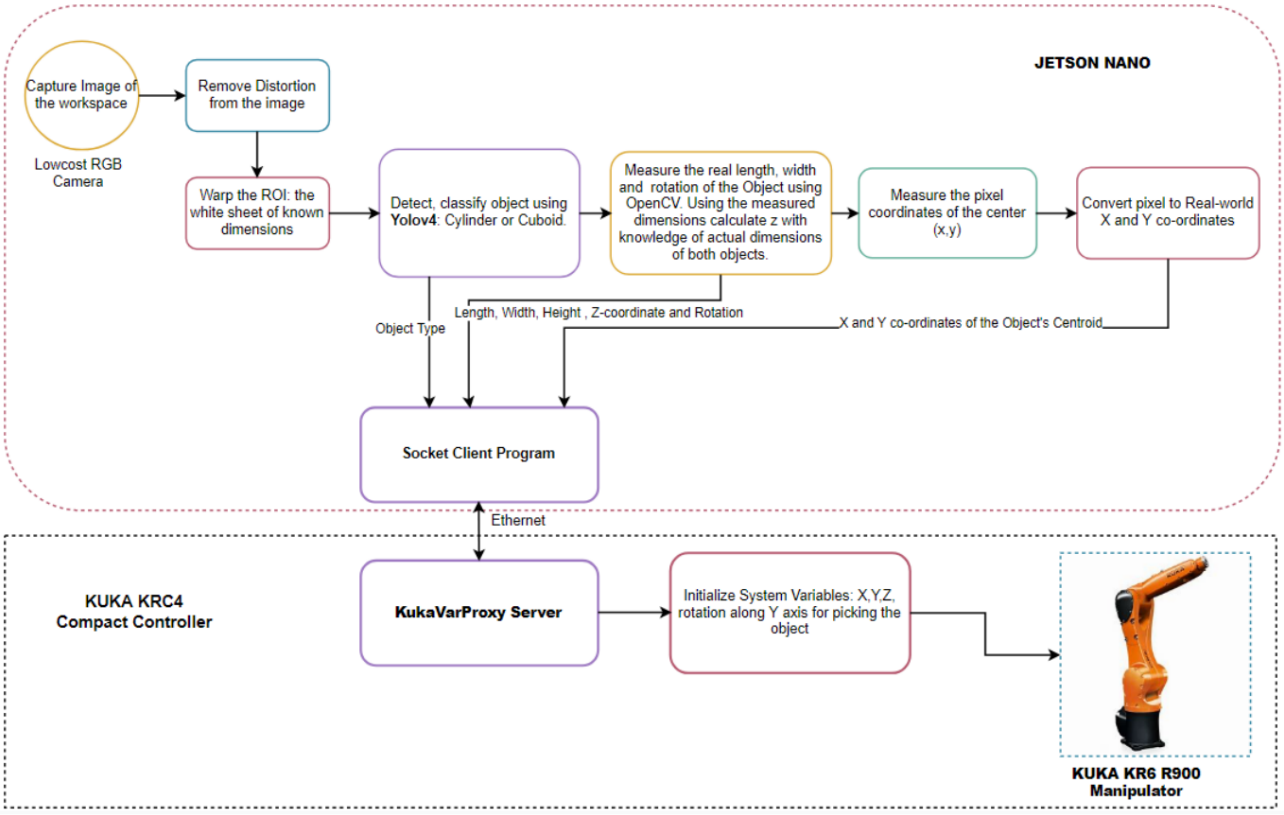


Bild 1: Blockdiagramm der Implementierung

Das grundsätzliche Problem dieser Arbeit ist die Auswahl und Platzierung von Objekten, die sich unter dem Vision-Sensor befinden. Der Sensor ist hier eine Logitech-Webkamera, die mit dem NVIDIA Jetson Nano verbunden ist. Dieser erfasst das Bild der Objekte, die auf einem definierten Arbeitsbereich platziert werden, erkennt und klassifiziert das Objekt mit Hilfe des Deep-Learning-Algorithmus YOLO V4, entzerrt und extrahiert den definierten Roboterarbeitsbereich aus dem erfassten Bild mit Hilfe von Konturerkennungsmethoden von OpenCV. Später wird das Objekt auf dem verzerrten Bild des Arbeitsbereichs mit der Canny-Edge-Detection-Methode von OpenCV lokalisiert und die realen Koordinaten des Schwerpunkts werden aus den Pixelkoordinaten mit Hilfe von Bildmomenten von OpenCV berech-

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

net. Auch die reale Höhe, die reale Breite des Objekts und die Drehung, wie sie in einem zweidimensionalen Bild beobachtet werden, können mit Hilfe von Methoden aus OpenCV und NumPy aus den Pixeln gemessen werden. Diese Werte werden vom Jetson Nano über eine Client-Server-Kommunikation an die Kuka KRC4-Steuerung gesendet, und der Roboter wird so programmiert, dass er den Greifer an den gewünschten Ort bewegt. Der Referenzrahmen, d.h. eine Ecke des weißen Arbeitsbereiches auf dem Tisch als Ursprung, wird für den Roboter mit dem Programmierhandgerät definiert. Die Kameramatrix und die Verzerrungskoeffizienten der Kamera werden mit der Schachbrett-Kalibrierungsmethode berechnet und die Bilder werden zur Verbesserung der Genauigkeit entzerrt.

3 Herausforderungen

Die Objektklassifizierung erfolgt mit YOLO V4, das bei guter Beleuchtung besser abschneidet, wenn der Hintergrund des Objekts einfarbig und hell gefärbt ist. Das Training des Algorithmus für die beiden Objektklassen Zylinder und Quader dauerte in Google Colab aufgrund der Laufzeitbeschränkungen in Colab etwa 35 Stunden. Die Kamera wird in dieser Anwendung als visueller Sensor verwendet. Wenn eine Kamera 3D-Objekte in der realen Welt betrachtet und sie in ein 2D-Bild umwandelt, ist die Umwandlung nicht perfekt. Manchmal sind die Bilder verzerrt: Kanten werden gebogen, abgerundet oder nach außen gestreckt. Dies ist auf die tangentiale und radiale Verzerrung zurückzuführen, die meist durch das Kameraobjektiv und die Position der Kamera verursacht wird. In unserem Anwendungsfall, in dem die Informationen aus dem Bild entscheidend sind, ist es notwendig, diese Verzerrungen zu korrigieren. Um dies zu ermöglichen, werden die Kameramatrix und die Verzerrungskoeffizienten mit Hilfe von Schachbrett-Kalibrierungsmethoden berechnet und die Bilder mit Undistort-Methoden aus OpenCV unverzerrt.

4 Einrichtung des Arbeitsplatzes

Das System wurde in einem vereinfachten Aufbau definiert, der eine repräsentative Betriebsumgebung enthält, d.h. einen Tisch mit einer dunklen Oberfläche, auf dem ein weißer Arbeitsbereich mit bekannten Abmessungen definiert ist, auf dem die Objekte zufällig platziert werden können. Dies ist für die Konturerfassung hilfreich, da die Ränder des weißen Arbeitsbereiches leicht zu detektieren sind und die Objekte darauf leicht zu lokalisieren sind. Es wurde eine Logitech HD C270-Webcam mit USB 2.0 verwendet, um die Bilder des Arbeitsplatzes oben aufzunehmen. Der USB-Anschluss der Webcam ist mit dem Jetson Nano verbunden, siehe Bild 2, der außerhalb des Arbeitsbereichs des Roboters platziert ist, um Schäden zu vermeiden. Auf die Benutzeroberfläche des Jetson Nano kann aus der Ferne oder über einen Monitor zugegriffen werden. Der Kuka KR6 Manipulator hat 6 Freiheitsgrade und kann eine Nutzlast von 6 kg handhaben. Außerdem beträgt die maximale Reichweite des Manipulators in horizontaler Richtung 901 mm. Ein pneumatischer 2-Finger-Greifer ist als Endeffektor am Manipulator KR6 900 montiert. Die KUKA KRC4 compact ist die einheitliche Steuerung für die Bewegungen des Manipulators. Ihre offene Architektur ermöglicht die Steuerung von KUKA-Robotern und externen Achsen. Das Programmierhandgerät ist das Kuka Smart Pad zur Fernsteuerung des Roboters. Der Roboter und seine Steuerung sind in dem Bild 2 dargestellt.

5 Umsetzung der vorgeschlagenen Lösung

Die gesamte Arbeit gliedert sich in die Bereiche Bildverarbeitung, Objekterkennung und -lokalisierung, Koordinatentransformation, Positionsberechnung, Einrichtung einer Client-Server-Architektur zwischen der Kuka KRC4-Steuerung und dem Jetson Nano zur Übermittlung der Koordinaten an den Roboter, damit dieser die erkannten Objekte aufnehmen und platzieren kann.

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Bild 2: Jetson Nano mit Logitech-Webkamera, Kuka KR6 R900 und Smart Pad

5.1 Objekterkennung mit dem Algorithmus YOLO V4

Für die Objekterkennung wurde der Ansatz „Knowledge Discovery in Databases“ [6] verfolgt, der mehrere Schritte wie Datenauswahl, -bereinigung, -vorverarbeitung, -transformation, Datamining usw. umfasst. Es wurde eine Datenbank mit 672 Bildern für Quader und 696 Bildern für zylindrische Objekte in verschiedenen möglichen Ausrichtungen erstellt, indem kontinuierlich Bilder aus dem Livestream der Kamera des Jetson Nano aufgenommen wurden. Für die Vorbereitung des Datensatzes haben wir das YOLO-Beschriftungstool verwendet, mit dem wir Bounding Boxes gezeichnet und die Klassennummer als 0 für die zylindrischen und 1 für die quaderförmigen Objekte markiert haben. Mit diesem Tool wurde eine Textdatei erstellt, die die Klassennummer, die Objektkoordinaten, die Breite und die Höhe für jedes beschriftete Bild enthält. Wir haben ein vortrainiertes YOLO V4-Modell gewählt, das auf dem COCO-Datensatz eine durchschnittliche Genauigkeit von 43,5% und eine Echtzeitgeschwindigkeit von 65 FPS auf einem Tesla V100 erreicht hat. Die Bildrate pro Sekunde ist der übliche Indikator für die Bewertung der Geschwindigkeit, d. h. die Anzahl der pro Sekunde verarbeiteten Bilder. Die durchschnittliche Präzision ist ein weiterer Parameter zur Messung der Genauigkeit eines Modells.

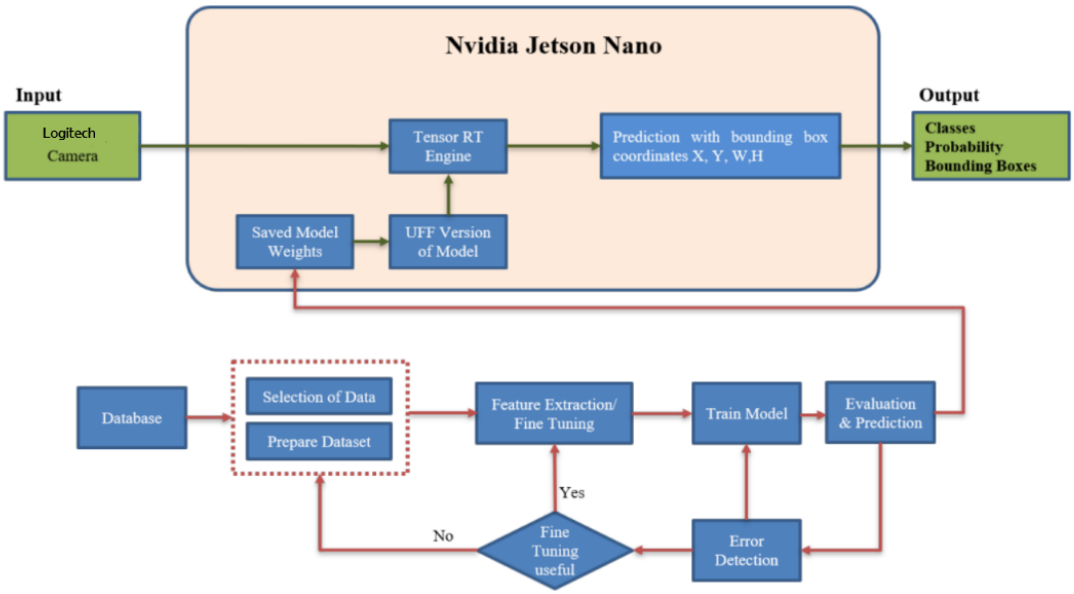


Bild 3: Eingesetzte Architektur für die Objekterkennung mit dem Jetson Nano

YOLO V4 besteht aus dem CSP Darknet53 als Backbone, einem tiefen neuronalen Netz, das hauptsächlich aus 53 Faltungsschichten besteht. Das Hauptziel des Backbones ist es, die wesentlichen Merkmale zu extrahieren. Zwischen dem Backbone und dem Head wird immer der Neck eingefügt, der Objekte in verschiedenen Maßstäben und räumlichen Auflösungen erkennen kann. Der Head

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

eines Objektdetektors ist für die Klassifizierung und Lokalisierung zuständig. Spatial Pyramid Pooling (SPP) wendet maximales Pooling an, während Path Aggregation Network (PAN) angewendet wird, um Merkmale in einer hierarchischen Struktur abzubilden. Zum Trainieren des Modells wird das Darknet aus dem Darknet-Github-Repository in eine virtuelle Maschine geklont. Darknet ist ein Open-Source-Framework für neuronale Netze, das in C und CUDA geschrieben wurde und sowohl GPU als auch CPU unterstützt. Der Laufzeittyp und der Hardware-Beschleuniger sind in Colab Notebook auf GPU eingestellt. Die folgenden Änderungen werden an der Konfigurationsdatei von YOLO V4 vorgenommen:

– Batch Size = 64 und Subdivisions = 16

– Max Batches= 6000, Steps = 4800, 5400

– Number of Filters= 21

– Number of Classes= 2 (Zylinder and Quader) in den YOLO-Schichten in der Konfigurationsdatei.

– Learning rate= .001

– Breite und Höhe der Bilder = 416

Ungefähr 1200 Bilder werden als Trainingsdatensatz ausgewählt und die restlichen Bilder werden als Validierungsdatensatz verwendet. Das Training dauerte aufgrund der Laufzeitbeschränkungen von Google Colab ca. 35 Stunden. Die Gewichte nach jeweils 100, 1000, 2000 Iterationen und die endgültigen Gewichte wurden gespeichert. Es wird festgestellt, dass der durchschnittliche Verlust des Modells für die letzten 1800 Iterationen unter 0,5 liegt und die durchschnittliche Genauigkeit 100% beträgt.
Das Modell wird dann auf dem Jetson Nano eingesetzt. Der Jetson Nano hat eine Tegra-X1-System-on-Chip-Architektur. Es werden Änderungen an dem Makefile vorgenommen, um das Darknet für diese Architektur zu erstellen. Bei der Verwendung des Systems wird eine durchschnittliche Bildrate von 4,2 FPS erreicht. In der Abbildung 4 sind die beiden Objekte Beispielergebnisse dargestellt.

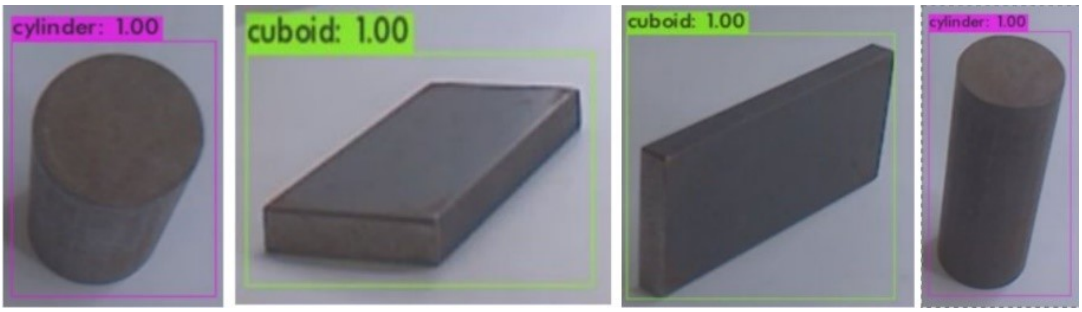


Bild 4: Beispiele von Vorhersagen des Modells zu den Objekten

5.2 Kamerakalibrierung und Vermessung der Verzerrung

Die Kamera wird in dieser Anwendung als visueller Sensor verwendet. Es ist wichtig, die Parameter der Kamera zu kennen, um sie effektiv als visuellen Sensor in unserer Anwendung zu nutzen. Die Kameraobjektive können zu Verzerrungen führen [7], da die Lichtstrahlen an den Rändern eines gekrümmten Kameraobjektivs oft ein wenig zu stark gebogen werden, was zu einer Verzerrung der Bildränder führt. Um die Verzerrungskoeffizienten und die Kameramatrix der Logitech-Webkamera zu messen, haben wir die Schachbrett-Kalibrierungsmethode [8] verwendet. Ein Schachbrett eignet sich hervorragend für die Kalibrierung, da es aufgrund seines regelmäßigen, kontrastreichen Musters leicht automatisch erkannt werden kann. Darüber hinaus sind die Ecken der Quadrate auf dem Schachbrett ideal für ihre Lokalisierung, da sie scharfe Farbverläufe in zwei Richtungen aufweisen. Darüber hinaus sind diese

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Ecken auch dadurch miteinander verbunden, dass sie sich am Schnittpunkt der Linien des Schachbretts befinden. All diese Fakten werden genutzt, um die Ecken der Quadrate in einem Schachbrettmuster zuverlässig zu lokalisieren.
Bei der Kalibrierung berechnen wir die Kameraparameter anhand einer Reihe bekannter 3D-Punkte (X, Y, Z) und ihrer entsprechenden Pixelposition (u, v) im Bild. Für die 3D-Punkte haben wir ca. 40 Bilder eines Schachbrettmusters mit bekannten Abmessungen in vielen verschiedenen Ausrichtungen aufgenommen. Die Weltkoordinaten sind mit dem Schachbrettmuster verbunden, und da alle Eckpunkte auf einer Ebene liegen, können wir Z für jeden Punkt willkürlich auf 0 setzen. Da die Punkte im Schachbrettmuster gleichmäßig verteilt sind, lassen sich die (X, Y)-Koordinaten jedes 3D-Punktes leicht definieren, indem man einen Punkt als Referenz (0, 0) nimmt und die übrigen in Bezug auf diesen Referenzpunkt definiert. Wir haben die OpenCV-Funktionen wie cv2.findchessboardcorners(), die die Ecken im Schachbrett aus dem Bild findet, und cv2.calibratecamera(), die die Bildpunkte und die Objektpunkte nimmt, verwendet. Die Koordinaten der Ecken im angezeigten 2D-Bild werden als Bildpunkte bezeichnet, die auf die 3D-Koordinaten der realen, unverzerrten Schachbrettecken, die als Objektpunkte bezeichnet werden, abgebildet werden. Die Z-Koordinaten bleiben unverändert, aber für die ersten beiden Spalten X und Y wird die Funktion mgrid von Numpy verwendet, um die gewünschten Koordinaten zu erzeugen. mgrid gibt die Koordinatenwerte für eine bestimmte Gittergröße zurück. Die Funktion cv2.calibratecamera() gibt die Kameramatrix und die Verzerrungskoeffizienten zurück. Diese Verzerrungskoeffizienten sind ein Maß für die radiale und tangentiale Verzerrung der Kamera. Die Bilder können mit der Funktion cv2.undistort() entzerrt werden, die die Verzerrungskoeffizienten und das verzerrte Originalbild aufnimmt und ein unverzerrtes Bild zurückgibt.

5.3 Berechnung der Koordinaten der realen Welt aus den Pixelkoordinaten

Da der Roboter Weltkoordinaten erwartet, werden die realen Koordinaten aus den Pixelkoordinaten des Jetson Nano ermittelt. Zunächst wurde eine Region von Interesse extrahiert, in der die Objekte lokalisiert werden sollen, die realen Abmessungen des Objekts wurden gemessen, der Schwerpunkt wurde berechnet, die realen Koordinaten in X- und Y-Achse des Objektschwerpunkts wurden gemessen, wobei eine Ecke des weißen Arbeitsbereiches als Ursprung verwendet wurde, und schließlich wurde die Drehung des Objekts in der 2D-Ebene gemessen. Für die Extraktion des interessierenden Bereichs wurde ein Programm geschrieben, das zunächst einen weißen Arbeitsbereich mit den bekannten Maßen 219mm $\times$ 297mm vom Arbeitsplatz aus entzerrt. Die Kamera wurde senkrecht über der Arbeitsfläche platziert. Der weiße Arbeitsbereich wurde auf einer Ebene mit dunklem Hintergrund platziert, um die Erkennung von Konturen zu erleichtern. Konturen können einfach als eine Kurve erklärt werden, die alle Punkte entlang der Grenze verbindet, die die gleiche Farbe oder Intensität haben. Wir haben OpenCV-Funktionen wie cv2.canny() für die canny-Kantenerkennung und cv2.findcontours() verwendet, um alle Grenzpunkte (X, Y) eines Objekts im Bild zu finden. Das Programm berechnet diejenige Kontur mit den meisten Randpunkten, so dass die Grenzen des weißen Arbeitsbereichs aus dem Bild bekannt sind. Dann wurde mit Hilfe der Funktionen cv2.getPerspectiveTransform() und cv2.warpPerspective() Warp-Transformationen durchgeführt, um eine „Vogelperspektive“ zu erhalten. Mit anderen Worten, die perspektivische Transformation funktioniert für eine Menge von Punkten. Sie wendet die Warp-Matrix auf eine Menge von Punkten in einem Vektor an und legt die Ergebnisse in einem anderen Vektor ab. Die Warp-Perspektive kann Bild A verzerren und das Ergebnis mithilfe der Warp-Matrix in Bild B einfügen. Die Warp-Perspektive wendet dies auf die Koordinaten des Objekts an und verschiebt den Pixelwert zu einem neuen Pixel. Da wir zwei verschiedene Objekte haben, ist es hilfreich, die Abmessungen des Objekts im Bild zu messen, damit die Breite des Greifers des Roboterarms entsprechend angepasst werden kann. Um die tatsächlichen Abmessungen der Objekte zu ermitteln, haben wir Funktionen geschrieben, die den Abstand messen und entsprechend den bekannten skalieren können. Es wird festgestellt, dass die vom Programm gemessenen Abmessungen mit einem Fehler von bis zu ± 3 mm ausreichend genau sind. Beispielhaft ist ein Ergebnis in der Abbildung 5 dargestellt.
Aus den Abmessungen und der Vorhersage von YOLO V4 kann die Höhe des Objekts mit dem Algorithmus, der in Bild 6 dargestellt ist, ermittelt werden.

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

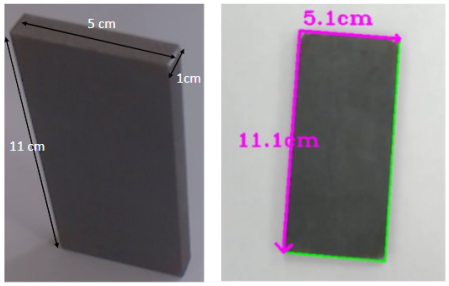


Bild 5: Tatsächliche Abmessungen des Quaders und vom Programm gemessene Abmessungen

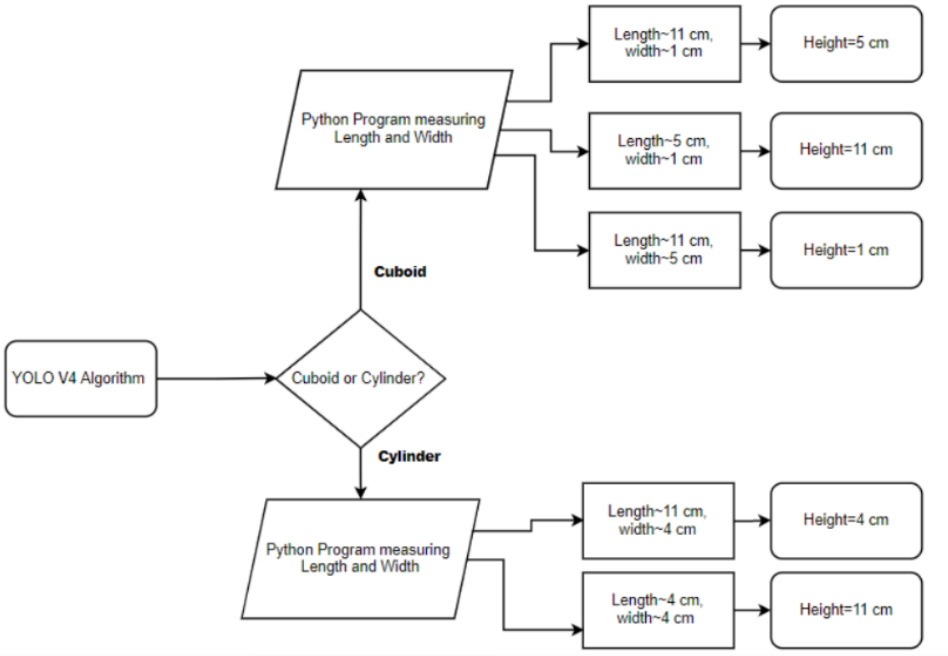


Bild 6: Beispiele von Vorhersagen des Modells zu den Objekten

Um den Schwerpunkt des Objekts zu messen, haben wir ein Programm geschrieben, das die Bounding Box um das Objekt zeichnet und die Bildmomente verwendet, um den Schwerpunkt des Objekts zu finden. Die OpenCV-Methoden cv2.boundingRect() und cv2.moments() werden zum Zeichnen des Begrenzungsrahmens und zum Ermitteln des Schwerpunkts verwendet. Bildmoment ist ein bestimmter gewichteter Durchschnitt der Bildpixelintensitäten, mit dessen Hilfe wir einige spezifische Eigenschaften eines Bildes, wie Radius, Fläche, Schwerpunkt usw., finden können.
Der gemessene Schwerpunkt hat einen Fehler von bis zu ± 3 mm. Es wurde beobachtet, dass die Schwerpunktmessung ungenau ist, wenn mehrere Flächen des Quaders oder Zylinders sichtbar sind. Das Bild sollte direkt über dem Objekt aufgenommen werden und nur die Oberseite des Objekts erfassen. Auch die Schwerpunktmessung für die zylindrischen Oberflächen ist aufgrund der unvollkommenen Anpassung der Begrenzungsrahmen nicht genau. Schließlich haben wir zur Messung der Drehung des Objekts auf der zweidimensionalen Ebene die OpenCV-Methode cv2.minAreaRect() verwendet, um die minimale Fläche des gedrehten Rechtecks zu ermitteln. Diese Methode nimmt als Eingabe einen 2D-Punktesatz und gibt eine Bounding-Box-Struktur zurück, die die folgenden Details enthält: Mittelpunkt (X, Y), (Breite, Höhe) und Drehwinkel.

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

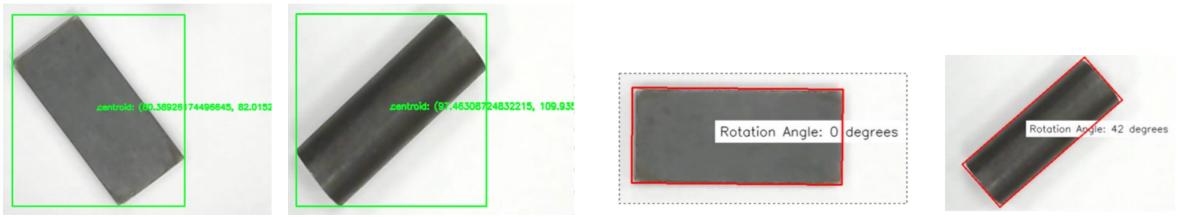


Bild 7: Die grün umrandeten Objekte zeigen vom Programm gemessene reale Koordinaten des Quaders und des Zylinders, die rot umrandeten Objekte die Drehung

5.4 Berechnung der X-, Y- und Z-Koordinaten des Objektschwerpunkts im Bezugssystem des Roboters

Aus dem gemessenen Schwerpunkt können die X-, Y- und Z-Koordinaten berechnet werden, indem man einen Referenzpunkt verwendet und die Offsets, d.h. die gemessenen Schwerpunktkoordinaten, addiert. Zu diesem Zweck können dem Roboter einige Punkte manuell beigebracht werden, und die Richtungen der positiven und negativen Achsen können dabei geschätzt werden. Der Bezugspunkt ist dabei die bekannte Ecke des Arbeitsbereichs, deren Koordinaten bereits bekannt sind.

5.5 Kommunikation zwischen Jetson Nano und Kuka KR6

KukaVarProxy ist ein Server, der auf der KUKA Robotersteuerung läuft und mit dem internen System kommuniziert. Dieser Server hat eine TCP/IP-Schnittstelle zum Kuka-Roboter, die das Lesen und Schreiben von Variablen und Datenstrukturen der gesteuerten Manipulatoren ermöglicht. Der KukaVarProxy-Server lauscht auf dem TCP-Port 7000 auf Netzwerknachrichten, liest und schreibt Daten in die KRC-Systemvariablen. Das Pendant ist ein „HMI“, ein von KUKA bereitgestelltes Programm, das unter Windows läuft und die Schnittstelle darstellt, über die der Roboterbenutzer den Roboter bedienen kann. Um eine TCP/IP-Verbindung herzustellen, wird KukaVarProxy auf dem Betriebssystem der Steuerung ausgeführt und dann die Netzwerkverbindung von KUKA „HMI“ konfiguriert.
Ein Netzwerk-Socket ist ein Endpunkt einer prozessübergreifenden Kommunikation über ein Computernetzwerk. Die Python-Standardbibliothek verfügt über ein Modul namens socket, das eine Low-Level-Schnittstelle für die Internet-Anbindung bietet. Diese Schnittstelle steht in verschiedenen Programmiersprachen zur Verfügung, da sie Systemaufrufe auf Betriebssystemebene verwendet. Die Funktion socket akzeptiert die Argumente family, type und proto. AF_INET ist die Internet-Adressfamilie für IPv4. SOCK_STREAM ist der Socket-Typ für TCP, das Protokoll, das für den Transport unserer Nachrichten im Netzwerk verwendet wird. Das Transmission Control Protocol (TCP) wird verwendet, weil es zuverlässig ist und die Daten in der richtigen Reihenfolge zustellt. Das Socket-Client-Programm verwendet die Funktionen client.connect(), client.send() , client.recv() und client.close(), um eine Verbindung herzustellen, Daten zu senden, Informationen vom Server zu empfangen bzw. das Socket zu schließen.
Um die Verbindung herzustellen, wurde ein Objekt mit dem Namen „Kuka“ erstellt und die IP-Adresse des KukaVarProxy-Servers, der auf KRC4 läuft, gesendet.

5.6 Programmierung der Pick-And-Place-Aufgabe des Roboters

Es wird der Variablentyp E6POS verwendet, um die Koordinaten an den Roboter zu senden. Die E6POS-Variable besteht aus 6 Variablen, die den Punkt im kartesischen Raum und die Ausrichtung des Arms an diesem Punkt darstellen. Aus diesem Grund kann der Programmierer eine E6POS-Variable auf verschiedene Weise referenzieren. Die folgenden Codezeilen wurden in die Datei config.dat geschrieben, nachdem die Benutzergruppe auf „Expertenmodus“ geändert wurde.
Zum Test wurde ein einfaches KRL-Programm definiert, bei dem der Roboter eine Punkt-zu-Punkt-Bewegung zu dem Punkt mp[1] startet, nachdem er die Koordinaten vom PC erhalten hat. In Bild 8 ist

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

das Programm auf unserem PC dargestellt, das die Koordinaten an den Roboter sendet.

```
from kukavarproxy import *
k = KUKA('172.31.1.147')
#The below line of code is a test to see if the connection works.
#The velocity is changed to 33mm/sec.
k.write("$OV_PRO",33)
while True:
    KUKA.write(k,'mp[1].X',693.159851)
    KUKA.write(k,'mp[1].Y',-61.8275452)
    KUKA.write(k,'mp[1].Z',225.734375)
    KUKA.write(k,'mp[1].A',176.281479)
    KUKA.write(k,'mp[1].B',0.495774239)
    KUKA.write(k,'mp[1].C',-176.173706)
```

Bild 8: Python-Programm auf dem PC zum Test zum senden der Koordinaten vom PC zum Kuka

In der Abbildung 9 sind die Schritte aufgeführt, die durchgeführt werden müssen, um den autonomen Entnahme- und Ablagevorgang für den Roboter zu ermöglichen. Vor dem Greifen des Objekts wird eine LIN-Bewegung eingeführt, um eine plötzliche Kollision des Greifers mit der Oberfläche des Objekts zu vermeiden.

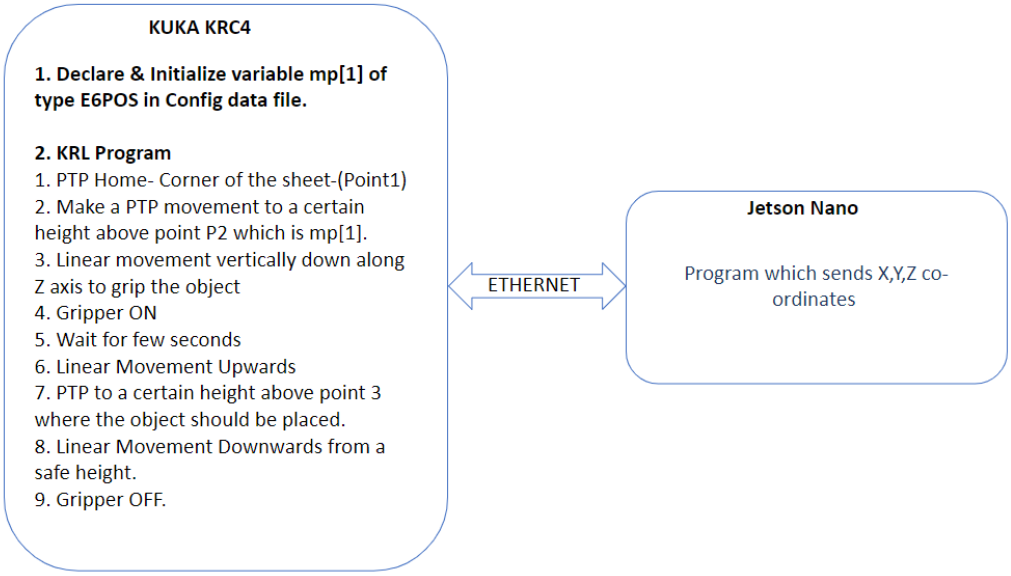


Bild 9: Ablauf des Pick-And-Place-Vorgangs

6 Evaluierung und Ausblick

Durch eine klare Definition der Arbeitsplatzumgebung und eine gute Beleuchtung wurde mit dem Algorithmus YOLO V4 auf dem Jetson Nano eine durchschnittliche Genauigkeit in unterschiedlichen Positionen der Objekte von 100 % und eine Bildrate von 4,2 FPS erreichen. Auch der Schwerpunkt und der gemessene Drehwinkel waren bei den meisten Tests unter guten Lichtverhältnissen ausreichend genau. In einigen Fällen wurde ein Fehler von bis zu 3 mm aufgrund von Schattenwurf beobachtet, der mit Hilfe von Näherungsfunktionen korrigiert werden kann. Bei der Drehung des Objekts wird ein Fehler von bis zu 1 bis 2 Grad beobachtet. Die Client-Server-Architektur wurde erfolgreich eingerichtet, die Koordinaten wurden an den Roboter gesendet und die Bewegung des Roboters konnte durchgeführt werden. Die Flexibilität eines Roboters, der auf diese Weise von kostengünstigen Bildverarbeitungssystemen geführt wird, kann den Bedarf an präzise konstruierten Teilezuführungen verringern und damit die Flexibilität in der Fertigungszelle erhöhen sowie kurze Produktionsläufe und Anpassungsfähigkeit ermöglichen.

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

7 Literatur

[1] Alexey Bochkovskiy, Chien-Yao Wang, Hong-Yuan Mark Liao: „YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection“, 2020, arXiv:2004.10934

[2] P. Huang, A. K. Mok: „A Case Study of Cyber-Physical System Design: Autonomous Pick-and-Place Robot“, 2018 IEEE 24th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), 2018, pp. 22-31, doi: 10.1109/RTCSA.2018.00012.

[3] Pritam Prakash Shete, Abhishek Jaju, Surojit Kumar Bose, Prabir Pal: „Stereo Vision Guided Telerobotics System for Autonomous Pick and Place Operations“, 2015. In Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics (AIR '15). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 41, pp. 1–6. doi: 10.1145/2783449.2783490

[4] T. Kotthauser, G. F. Mauer, „Vision-Based Autonomous Robot Control for Pick and Place Operations“, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2009, pp. 1851-1855, doi: 10.1109/AIM.2009.5229792.

[5] P. Andhare, S. Rawat, „Pick and Place Industrial Robot Controller with Computer Vision“. International Conference on Computing Communication Control and automation (ICCUBEA), 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCUBEA.2016.7860048.

[6] U. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, P. Smyth: „The KDD Process for Extracting Useful Knowledge from Volumes of Data“. 1996, Commun. ACM, 39, pp. 27-34.

[7] C. Cattaneo, G. Mainetti, R. Sala: „The Importance of Camera Calibration and Distortion Correction to Obtain Measurements with Video Surveillance Systems“. 2015, Journal of Physics: Conference Series, doi: 658. 012009. 10.1088/1742-6596/658/1/012009.

[8] Yu S., Zhu R., Yu L., Ai W.: „Effect of Checkerboard on the Accuracy of Camera Calibration“. 2018, doi:10.1007/978-3-030-00764-5_57.

Open Access. © 2022 Akhila Pullela, Elmar Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03 - 11.03.2022

Adaptiver Griff-in-die-Kiste – Die methodische Lücke zwischen Forschung und Industrie

T. Stuke [1], T. Bartsch [2], T. Rauschenbach [3]

Zusammenfassung

Der Konferenzbeitrag zeigt den Forschungs- und Technikstand bezüglich des Griff-in-die-Kiste auf. Basierend auf einer Literaturrecherche werden Beispiele für regelbasierte und lernende Verfahren vorgestellt. Anschließend erfolgt eine systematische Gegenüberstellung der Verfahren. Hierfür werden die Anforderungen, die ein Griff-in-die-Kiste-System zu erfüllen hat, dargelegt. Die Kriterien resultieren aus einer Expertenbefragung des produktionstechnischen Umfelds der Weidmüller Gruppe. Neben den Anforderungen werden die Gewichtungen zur Bildung einer Rangfolge ermittelt. Die erarbeiteten Anforderungen dienen anschließend zur Bewertung der regelbasierten und lernenden Verfahren. Die Analyse mündet in einer methodischen Lücke zwischen beiden Paradigmen und stellt die Ausgangsbasis für die weitere Arbeit zur Entwicklung des industriellen Griff-in-die-Kiste dar. Abschließend werden erste Arbeitsergebnisse zur Objekterkennung von Reihenklemmen veröffentlicht. In einer Untersuchung werden die Zuverlässigkeit, die Robustheit sowie die Einrichtdauer einer Objekterkennung mithilfe von Deep Learning ermittelt. Das angestrebte Forschungsergebnis stellt einen Entwicklungsschritt von automatisierten Systemen, die in einem definierten Wirkbereich eigenständig arbeiten, zu autonomen Systemen, die selbstständig auf zeitvariante Größen reagieren, dar.

Stichwörter

Griff-in-die-Kiste, Bildverarbeitung, Robotik, Deep Learning, lernende Verfahren, regelbasierte Verfahren

1 Motivation

Produzierende Unternehmen stehen in der heutigen Zeit einem Wandel der an sie gestellten Anforderungen gegenüber. Neben den üblichen Zielgrößen wie Kosten, Qualität und Zeit nehmen vor allem Schnelligkeit und Wandlungsfähigkeit an Bedeutung zu, s. [1]. Es ist ein Gesellschaftstrend der Individualisierung zu beobachten, bei dem der Mensch den Wunsch verfolgt, sich von seinen Mitmenschen abzuheben. Als Folge dessen steigt die Produktvielfalt in der Fertigung, während die Losgröße simultan sinkt. Das Resultat in der variantenreichen Produktion elektrotechnischer Komponenten, insbesondere in der Montage, ist bis heute noch oftmals die manuelle Fertigung. Ein großes Hemmnis für die Automatisierung stellt die Bereitstellung der Einzelteile in unstrukturierter Form dar. Die Flexibilität der Hand-Auge-Koordination eines Menschen ist bis heute unübertroffen. Zwar ist die Automatisierung des sog. „Griff-in-die-Kiste“ bereits seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand der Forschung, allerdings existiert bis dato keine Lösung, welche die komplexen Anforderungen im industriellen Einsatz ganzheitlich erfüllt.

1 Tobias Stuke, M. Sc., Weidmüller Interface GmbH & Co. KG, Detmold
2 Prof. Dr.-Ing. Thomas Bartsch, TH Ostwestfalen-Lippe, Lemgo
3 Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Rauschenbach, Fraunhofer IOSB-AST, Ilmenau

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2 Stand der Technik

Mit Beginn der 1990er-Jahre untersuchen Ferrari und Canny [2] die Prozessgrößen des automatisierten Greifens von Bauteilen. Unter Verwendung der Normalkraft sowie des Reibungskoeffizienten berechnet sich die Coulombsche Reibung. Diesen physikalischen Effekt, auch Kraftschluss genannt, nutzen Ferrari und Canny [2] zur Beschreibung des sog. „Wrench“. Das Wrench berechnet sich aus der euklidischen Norm der äußeren Kräfte und Momente, die auf das Objekt wirken, ohne dass der Kraftschluss unterbricht, s. [2]. Die analytische Größe wird im Weiteren dazu genutzt, um geeignete Greifpunkte von ungeeigneten zu unterscheiden, s. [3]. Dupuis et al. [3] nutzen einen Algorithmus mit definierter Schrittweite zur Abtastung diverser Greifpunkte eines einzelnen Pleuels entlang der Richtungsvektoren des dreidimensionalen Raums. Die abgetasteten Greifpunkte werden hinsichtlich des Wrench bewertet und deren Anzahl durch die Anwendung eines Schwellwertes reduziert.
Im weiteren Forschungsverlauf findet die Beschreibung der Objekte mithilfe von CAD-Modellen zunehmend Verwendung, s. [4–8]. Heutzutage haben sich daraus kommerzielle Lösungen, z.B. der Hersteller Keyence, Photoneo oder Pickit, entwickelt, s. [9–11]. Mithilfe des 3D-Modells werden durch den Anwender Erkennungsmerkmale, wie z.B. Ecken und Kanten, aber auch mögliche Greifpunkte im Vorfeld definiert. Die Merkmale dienen anschließend dazu, das Objekt im Ladungsträger zu identifizieren und zu lokalisieren. Die Objektlokalisierung ist eine elementare Aufgabe, für die Buchholz et al. den sog. „RANSAM“-Algorithmus [4], engl. für „Random Sample Matching“, entwickelten. Ziel des Algorithmus ist die Ermittlung einer validen Pose im Haufwerk, unter Anwendung einer schrittweisen Translation und Rotation des Objektes. Spenrath und Pott [5] nutzen für die Ermittlung der Objekt-Pose hingegen ein heuristisches Suchverfahren.
Die zuvor beschriebenen Verfahren werden im Weiteren als „regelbasierte Verfahren“ bezeichnet. Darüber hinaus existiert eine weitere Klasse an Verfahren, die auf Methoden des maschinellen Lernens, wie z.B. dem Deep Learning basieren, nachfolgend „lernende Verfahren“ genannt. Die grundlegende Unterteilung der Verfahren geht auf die Veröffentlichung von Sahbani et al. [12] zurück, in der die Notation „analytische“ und „datengetriebene“ Verfahren Verwendung findet.
Lernende Verfahren nutzen ein Faltungsnetzwerk, engl. „Convolutional Neural Network“, zur Objektlokalisierung oder Greifpunktermittlung. Anhand von Tiefenbildern wird der Zusammenhang zwischen Bildpixel und Greifqualität trainiert, s. [13–16]. Im Beispiel von Pinto und Gupta [13] werden 50.000 Entnahmezyklen zum Training des neuronalen Netzes durchlaufen. Dies entspricht einer Lerndauer von ca. 700 Stunden. Wissenschaftler des Unternehmens Google führen ein Experiment durch, den Griff-in-die-Kiste durch Versuch und Irrtum in unüberwachter Form zu erlernen. In der Studie werden dazu 14 Roboter in 800.000 Lernzyklen über eine Lerndauer von zwei Monaten trainiert, s. [15]. Mahler et al. [14] führen den Lernvorgang ihres „Dex-Net 2.0“-Modells hingegen in überwachter Form durch. Hierfür kommen 6,7 Mio. Tiefenbilder, welche mit guten und schlechten Greifpunkten annotiert sind, zum Einsatz. Die Wissenschaftler Dong et al. [17], Xiang et al. [18] und Deng et al. [19] verfolgen wiederum den Ansatz, die sechs Freiheitsgrade eines räumlich beliebig angeordneten Objektes zu erlernen. Aufgrund der umfangreichen Datenmengen und zahlreichen Trainingszyklen, die für einen Lernprozess vonnöten sind, nehmen in der heutigen Zeit Simulationen stark an Bedeutung zu. Den Einsatz von Simulationstechniken untersuchen Shao et al. [20], Bousmalis et al. [21] und Sundermeyer et al. [22]. Letztere nutzen die Simulation dazu, Greifszenarien anhand der Objekt-Punktwolke zu erzeugen, welche im Anschluss hinsichtlich der Greifqualität bewertet werden. Der Einsatz von Simulationen ermöglicht somit die Erzeugung sehr großer Datensätze, welche zum Training der neuronalen Netze verwendet werden. Der Dex-Net 2.0-Ansatz von Mahler et al. [14] verdeutlicht dieses Vorgehen. Aktuelle Forschungsansätze thematisieren überdies die Verwendung eines geschlossenen Regelkreises zur Bahnführung des Roboters durch das Bildverarbeitungssystem, s. [23, 24]. Diese haben den Vorteil, dass die Trajektorie des Werkzeugmittelpunktes in Echtzeit durch das Bildverarbeitungssystem geregelt wird. In einem Versuch demonstrieren Morrison et al. [23], dass der Roboter auf eine Translation des Objekts um 25 mm sowie eine Rotation um 10 ° dynamisch reagiert, nachdem die Roboterbewegung bereits eingesetzt hat.

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3 Verfahrensvergleich

In diesem Abschnitt werden die regelbasierten und lernenden Verfahren miteinander verglichen und bewertet. Daraus leitet sich eine methodische Lücke ab, welche es zu minimieren gilt, um den Griff-in-die-Kiste im industriellen Einsatz zu etablieren.

3.1 Anforderungen

Im Rahmen der Verfahrensanalyse ist festzustellen, dass keine einheitlichen Bewertungskriterien für Griff-in-die-Kiste-Systeme existieren. Im Rahmen einer Expertenbefragung wurden deshalb Anforderungen an den industriellen Griff-in-die-Kiste innerhalb der Weidmüller Gruppe erarbeitet, s. [25]. Der Teilnehmerkreis setzt sich aus den Fachbereichen Fertigungsplanung, Betriebsmittelplanung, Vorentwicklung, Steuerungsbau, Konstruktion sowie der Montagetechnik zusammen. Die resultierende Anforderungsliste ist Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Anforderungen an den Griff-in-die-Kiste

Nr.	Anforderung	Min. Wert	Max. Wert	Zielwert	Einheit
AF-1	Universalität	3	∞	4	Anzahl der Varianten
AF-2	Ordnungszustand	OZ = 0 / 0	OZ = 3 / 3	OZ = 0 / 0	OZ = OG / PG
AF-3	Objektgröße	5	150	75	Länge in mm
AF-4	Herstellerunabhängigkeit	-	-	hoch	-
AF-5	Einrichtdauer	-	5	4	Zeit in h
AF-6	Zykluszeit	-	12	10	Zeit in s
AF-7	Zuverlässigkeit	80	100	85	Wahrscheinlichkeit in %
AF-8	Robustheit	-	-	hoch	-
AF-9	Kontextwissen	-	-	hoch	-
AF-10	Positioniergenauigkeit	1	8	4	Abstand in mm

Im Nachfolgenden erfolgt eine Erläuterung der Anforderungen. AF - 1: Die Universalität beschreibt die Anpassungsfähigkeit des Systems. Die Implementierung einer neuen Variante ist im Idealfall ohne Aufwand, wie z.B. mechanische Umbauten oder Programmiertätigkeiten, durchführbar. AF - 2: Der Ordnungszustand (OZ) beschreibt den Orientierungsgrad (OG) und Positionierungsgrad (PG) eines Bauteils, s. [26]. Die Anforderung an das Handhabungssystem sind umso komplexer, je geringer der Ordnungszustand ist. AF - 3: Die Objektgröße nimmt Einfluss auf die Komplexität der technischen Handhabungslösung. In dieser Arbeit wird die Ausprägung einer geringen Objektgröße fokussiert, da die zu verarbeitenden elektrotechnischen Komponenten klein sind. AF - 4: Die Herstellerunabhängigkeit beschreibt die Möglichkeit, mit unternehmensinternen Ressourcen Erweiterungen oder Anpassungen an der Hardware oder Software des Systems vorzunehmen. AF - 5: Die Einrichtdauer umfasst den Zeitaufwand, um das Handhabungssystem auf einen bis dato unbekannten Artikel vorzubereiten. Tätigkeiten, die im Zuge des Einrichtens anfallen, sind z.B. mechanisches Umrüsten des Werkzeugs oder programmtechnische Anpassungen. AF - 6: Die Zykluszeit umfasst die Dauer einer vollständigen Handhabungsabfolge, von der Objekterkennung bis zur Objektbereitstellung. AF - 7: Die Zuverlässigkeit entspricht der statistischen Wahrscheinlichkeit, mit der die Teile dem nachfolgenden Prozessschritt zur Verfügung gestellt werden. Sie berechnet sich anhand des Quotienten aus der Anzahl an korrekt entnommenen Objekten und der Anzahl an Entnahmeversuchen. AF - 8: Die Robustheit bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, Veränderungen, ohne Anpassung der anfangs stabilen Konfiguration, zu widerstehen, s. [27]. Ein Beispiel für eine zeitvariante Störgröße ist die Belichtungsintensität, welche in Abhängigkeit des Tageslichteinfalls variiert. AF - 9: Das Kontextwissen stellt den übergeord-

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

neten Rahmen der Handhabungsaufgabe dar. Dieses umfasst neben der Information über die Entnahme-Pose des Objektes auch die Information bezüglich dessen Bereitstellungs-Pose, um den nachgeschalteten Prozessschritt zu ermöglichen. AF - 10: Die Positioniergenauigkeit beschreibt die absolute Genauigkeit, mit der das Handhabungsobjekt nach erfolgreicher Entnahme aus dem Ladungsträger bereitgestellt wird.
Die genannten Anforderungen besitzen eine unterschiedliche Relevanz hinsichtlich der Griff-in-die-Kiste-Lösung, weshalb im Weiteren die Gewichtung der Anforderungen erläutert wird. Im Rahmen der o.g. Expertenbefragung wurden die einzelnen Anforderungen dazu einem paarweisen Vergleich unterzogen. Die resultierende Rangfolge der Anforderungen ist in Abbildung 1 dargestellt.

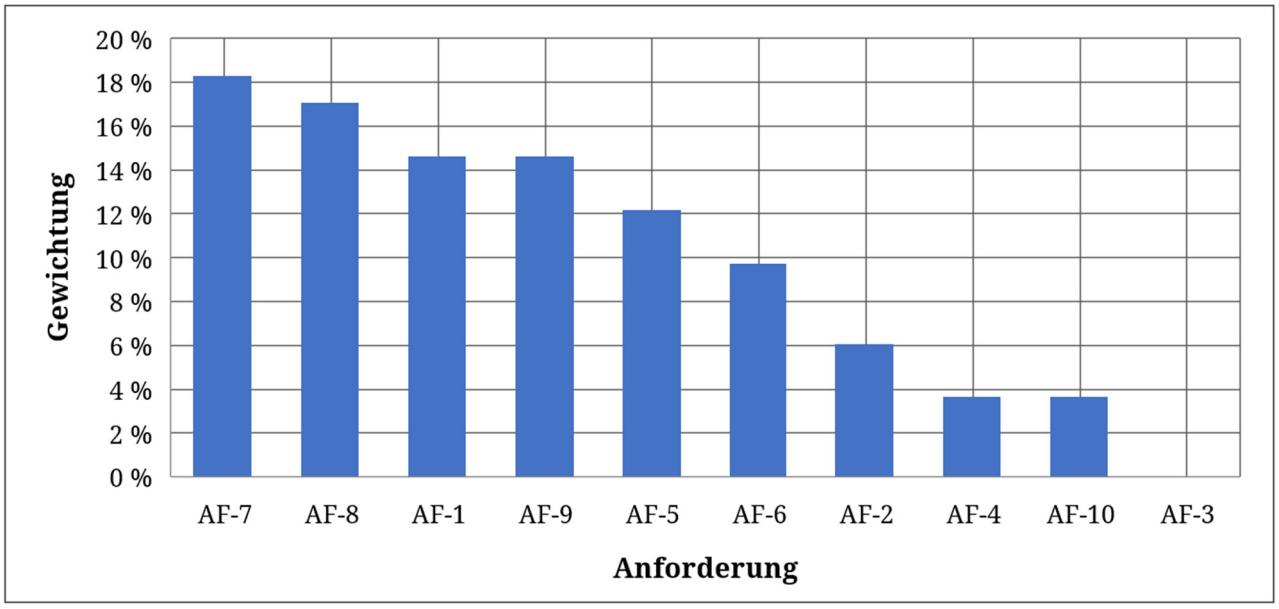


Abbildung 1: Rangfolge der Anforderungen an den Griff-in-die-Kiste

Das Resultat verdeutlicht, dass die wichtigsten Anforderungen an den Griff-in-die-Kiste eine hohe Zuverlässigkeit (18,3 %) sowie eine hohe Robustheit (17,1 %) sind. Die Gewährleistung eines stabilen Teilestroms ist von höchster Priorität, um die nachfolgenden Produktionsschritte sicherzustellen. Die Anforderungen mit dritthöchster Priorität sind die Universalität (14,6 %) und das Kontextwissen (14,6 %). Demnach gilt es eine Lösung zu entwickeln, die für diverse Artikelvarianten einsetzbar ist und die neben dem Wissen über die Entnahmeaufgabe auch Kenntnis über den nachfolgenden Prozessschritt und der dafür benötigten Bereitstellungs-Pose besitzt. Im Feld der mittleren Wertigkeit befinden sich die Anforderungen Einrichtdauer (12,2 %) und Zykluszeit (9,8 %). Die Bedeutung der Kriterien Ordnungszustand (6,1 %), Herstellerunabhängigkeit (3,7 %) und Positioniergenauigkeit (3,7 %) ist gering. Die Objektgröße (0,0 %) wird als unwichtig erachtet und scheidet gänzlich aus. Die Anforderungen werden im Weiteren zur Beurteilung der Griff-in-die-Kiste-Verfahren verwendet.

3.2 Verfahrensbewertung

In diesem Abschnitt findet eine kritische Reflektion der vorhandenen Griff-in-die-Kiste-Ansätze (Kap. 2) statt. Für die Beurteilung der regelbasierten und lernenden Verfahren wird eine Nutzwertanalyse herangezogen. Es gilt die Frage zu beantworten, wie gut die erarbeiteten Anforderungen durch die jeweilige Methode erfüllt werden. Die Bewertung erfolgt anhand einer dreistufigen Skala:

- Bewertungszahl 0: Anforderung nicht erfüllt,
- Bewertungszahl 0,5: Anforderung bedingt erfüllt und
- Bewertungszahl 1: Anforderung überwiegend erfüllt.

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Der Erfüllungsgrad der Anforderungen berechnet sich aus dem Produkt der Bewertungszahl und des Gewichtungsfaktors. Die Bewertung der regelbasierten Verfahren wird anhand der Literaturstellen [3–8, 28] durchgeführt. Zur Bewertung der lernenden Verfahren werden die Ansätze [14–16, 20, 23, 24, 29–31] herangezogen. Das Bewertungsergebnis ist in Abbildung 2 visualisiert und zeigt die Stärken beider Verfahrenstypen. Gleichzeitig wird die Anforderungsgewichtung einbezogen, sodass die Kriterien mit der höchsten Priorität im Fokus stehen. Die Stärken der lernenden Verfahren sind allen voran die Universalität sowie die Robustheit. In den Experimenten von Mahler et al. [14] und Levine et al. [15] werden Entnahmevorgänge von diversen Alltagsgegenständen aus einem Behälter durchgeführt. Durch den gelernten Zusammenhang zwischen Bildpixel und Greifpunkt ist das System in der Lage beliebige Objekte zu greifen. Regelbasierte Verfahren besitzen hingegen eine sehr eingeschränkte Universalität. Lediglich exakt definierte Teile werden einwandfrei identifiziert, lokalisiert und gegriffen. In Bezug auf das Kontextwissen kehren sich die Stärken der regelbasierten und lernenden Verfahren um. Regelbasierte Verfahren verfügen generell über Kontextwissen, da dieses durch den Anwender, in Form der gewünschten Ablage-Pose, programmiert wird. In dem Anwendungsfall von Ellekilde und Petersen [7] werden Stahlwellen nach der Entnahme aus dem Behälter in eine Presse eingelegt. Die entsprechende Ziel-Pose wird dabei manuell definiert, s. [7].

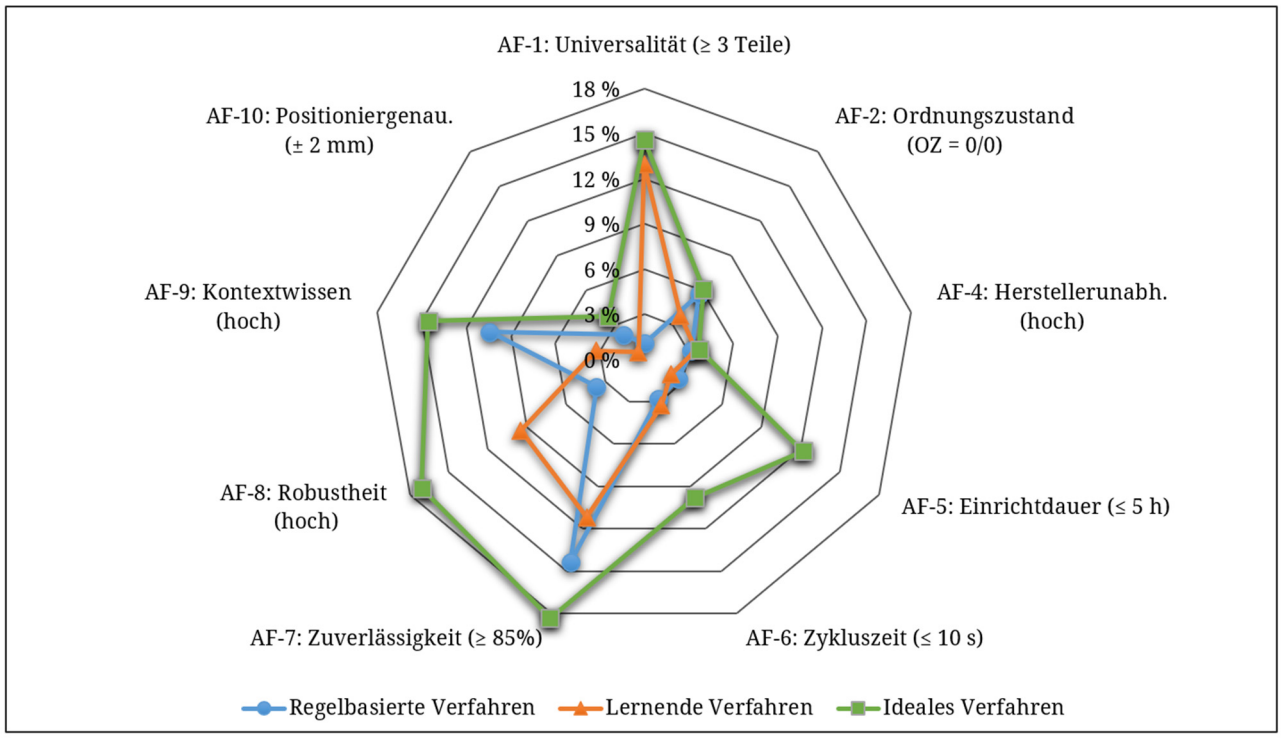


Abbildung 2: Stärken-Diagramm der Griff-in-die-Kiste-Verfahren

Lernende Verfahren verfügen bis dato nicht über Kontextwissen. Aufgrund der Tatsache, dass lediglich der Zusammenhang zwischen Bildpixel und Objekt-Pose bzw. Greifpunkt gelernt wird, hat das Modell keine Kenntnis darüber, welches Teil gegriffen wird oder welcher Prozessschritt im Anschluss folgt. Häufig wird das Objekt nach erfolgreicher Entnahme außerhalb des Behälters fallen gelassen, s. [14, 15]. Eine Stärke der lernenden Verfahren gegenüber den regelbasierten Verfahren ist die Robustheit. Lernende Verfahren sind in der Lage, verschiedene Belichtungen und Hintergründe zu erlernen, sofern der Trainingsdatensatz eine entsprechende Varianz besitzt. Durch die sensorische Aufnahme des Behälterinhaltes aus 50 verschiedenen Perspektiven, auch Mehrfachansicht genannt, gelingt Morrision et al. [23] eine Steigerung der Greifqualität um 10 %. Im Zuge dessen ist ein Anstieg der durchschnittlichen Dauer für einen Greifzyklus von 8,8 s auf 11,4 s zu verzeichnen. Darüber hinaus wird ein geschlossener Regelkreis zur Bahnführung des Roboters unter Verwendung des Sensorsignals angewandt. Dadurch kann das System auf ein Verrutschen der Objekte im Behälter reagieren.

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Maßnahmen wie diese erhöhen die Robustheit eines Griff-in-die-Kiste-Systems. Regelbasierte Verfahren verfügen hingegen über ein Sensorsystem, welches speziell auf die vorherrschenden Bedingungen abgestimmt ist. Varianz in der Umgebungsbelichtung oder in der Hintergrundhelligkeit wirkt sich negativ auf die Zuverlässigkeit der Teileerkennung aus. Infolgedessen werden zusätzliche Maßnahmen zur Sicherstellung einer robusten Objekterkennung erforderlich, wie das Anwendungsbeispiel des Unternehmens BMW verdeutlicht. Für die Handhabung von Karosserieteilen werden Gitterboxen speziell mit einem pinkfarbenen Kunststoff zur Erzeugung eines kontrastreichen, invarianten Hintergrunds ausgestattet, s. [32]. Eine Schwäche sowohl der regelbasierten als auch der lernenden Verfahren ist die hohe Einrichtdauer. Für das maschinelle Lernen des Griff-in-die-Kiste ist eine hohe Anzahl an Lernzyklen erforderlich, welche in physischen Tests oder Simulationen generiert werden. Im Beispiel von Deng et al. [19] beträgt die Trainingsdauer für 20 verschiedene Objekte 12 Stunden, s. [19, S. 3669]. Darüber hinaus ist eine Annotation der Trainingsdaten im Fall des überwachten Lernens erforderlich, welche einen zusätzlichen Zeitaufwand darstellt, s. [14]. Regelbasierte Verfahren sind ebenfalls zeitintensiv in der Initialisierung der Objekte, da Erkennungsmerkmale sowie Greifpunkte manuell durch den Anwender mithilfe des 3D-Modells zu definieren sind. Der Hersteller Photoneo demonstriert anhand eines Videos, dass das Einrichten eines Objektes für eine erfahrene Person innerhalb 30 Minuten realisierbar ist, s. [10]. Für das Anwendungsbeispiel von Deng et al. [19] entspricht dies einer Einrichtdauer von 10 Stunden. Beide Verfahren überschreiten somit die Anforderung an die Einrichtdauer von max. 5 Stunden, s. Abschn. 3.1. Die Zuverlässigkeit der regelbasierten Verfahren ist geringfügig höher als die der lernenden Verfahren.

3.3 Methodische Lücke

Regelbasierte und lernende Verfahren weisen individuelle Stärken auf, s. Abbildung 2. Der grüne Linienzug kennzeichnet ein ideales Verfahren, welches alle Anforderungen vollständig erfüllt. Kein bis dato vorhandenes Verfahren wird den Anforderungen des industriellen Griff-in-die-Kiste vollumfänglich gerecht, was auf einen Zielkonflikt zwischen den Anfoderungskombinationen zurückzuführen ist. In Abbildung 3 ist der Zielkonflikt zwischen Kontextwissen und Universalität dargestellt.

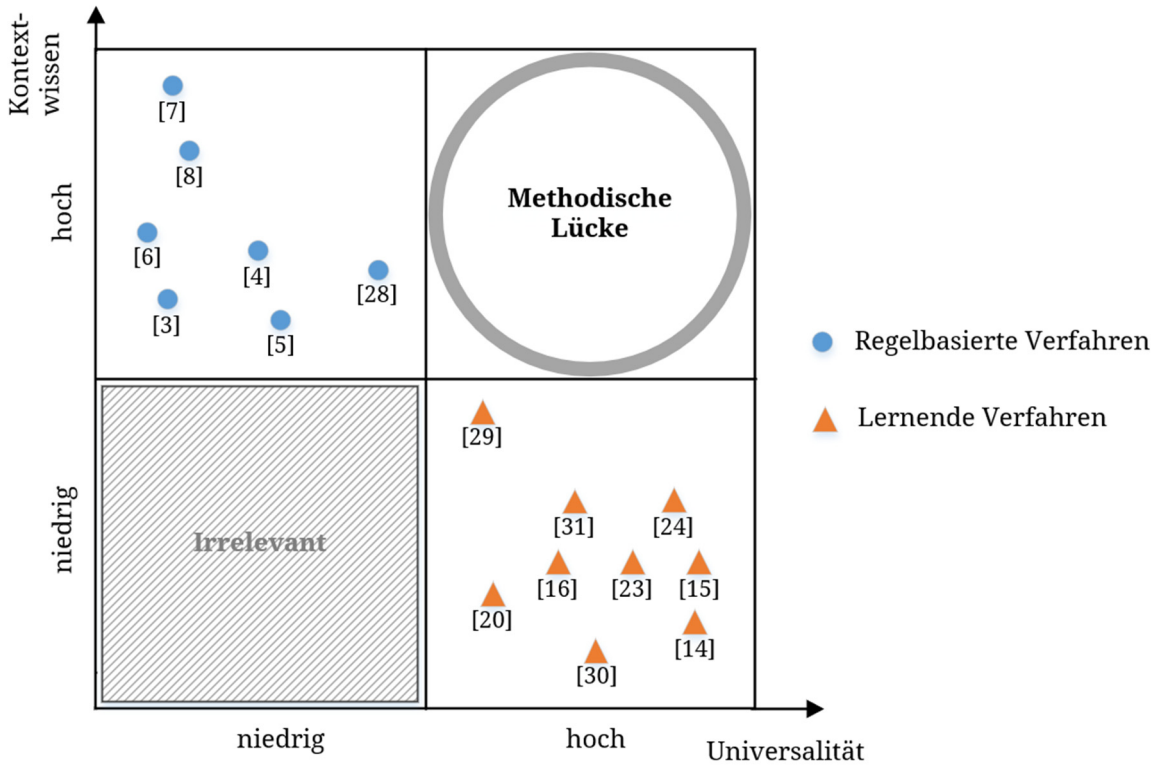


Abbildung 3: Zielkonflikt zwischen Kontextwissen und Universalität

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Regelbasierte Systeme verfügen zwar über Kontextwissen, sind jedoch durch eine geringe Universalität gekennzeichnet. Sie werden heutzutage in spezialisierten Anwendungsfällen, wie z.B. in der Automobilindustrie zur Handhabung großvolumiger Teile, eingesetzt.
Das Stärken-Verhältnis der lernenden Verfahren in Bezug auf Kontextwissen und Universalität ist gegenüber den regelbasierten Systemen invertiert. Dadurch finden sie überwiegend in der Forschung Anwendung, welche z.B. die Handhabung von diversen Alltagsgegenständen fokussiert. In Abbildung 3 sind beide Paradigmen hinsichtlich der Erfüllung von Kontextwissen und Universalität eingeordnet. Es zeichnet sich ein Zielkonflikt zwischen den gegensätzlichen Anforderungen ab, welcher zur Spaltung der regelbasierten und lernenden Verfahren führt. Die daraus resultierende methodische Lücke ist im oberen, rechten Quadranten der Abbildung 3 dargestellt. Zum heutigen Stand existiert keine Lösung, welche die Stärken beider Paradigmen kombiniert. Resümierend gilt es für den industriellen Einsatz des Griff-in-die-Kiste eine hybride Automatisierungslösung zu entwickeln, die folgende Anforderungen simultan erfüllt:

- hohe Zuverlässigkeit,
- hohe Robustheit,
- hohes Kontextwissen,
- niedrige Einrichtdauer.

4 Lösungsansatz

Aus dem Verfahrensvergleich (Kap. 3) geht hervor, dass das Deep Learning einen geeigneten Lösungsansatz für die flexible Objekterkennung darstellt. Im Weiteren wird die Untersuchung der Anwendbarkeit eines Faltungsnetzwerks zur Klassifikation und Lokalisierung von elektrotechnischen Komponenten im Rahmen einer Studie der Weidmüller Gruppe erläutert.
Ziel der Untersuchung ist es, eine Einschätzung über die die Zuverlässigkeit, die Robustheit sowie die Einrichtdauer eines Faltungsnetzwerks zur Erkennung von elektrotechnischen Komponenten zu erhalten. In der Versuchsdurchführung werden vier Reihenklemmen und ein Steckverbinder auf einer Tischebene angeordnet, ohne dass eine Überlappung der Teile auftritt. Zur Objekterkennung wird die „SSD Mobilenet V2“-Architektur mithilfe des Programmiergerüsts „TensorFlow“ von Google genutzt, s. [33]. Das Faltungsnetzwerk ist über die Plattform „GitHub“ [34] öffentlich zugänglich und stellt eine Weiterentwicklung des sog. „Single Shot Detector (SSD)“-Modells [35] dar, welches nach dem Funktionsprinzip der einstufigen Objekterkennung mittels exemplarweiser Segmentierung arbeitet. Die Architektur wurde bereits anhand des „COCO“-Datensatzes von GitHub-Nutzern trainiert. COCO ist ein Akronym für „Common Objects in Context“, s. [36]. Der Datensatz enthält 328.000 Bilder und bildet 1,5 Mio. Alltagsgegenstände im üblichen Kontext ab. Zur Ausführung des SSD Mobilenet V2 werden zwei verschiedene Systeme herangezogen: a) ein Laptop und b) ein PC. Diese unterschieden sich hauptsächlich durch die Grafikleistung voneinander. Der Laptop verfügt über keine separate Grafikeinheit, wohingegen der PC über eine „GeForce RTX 2080“ verfügt.
Die Versuchsdurchführung unterteilt sich in zwei Phasen: a) der Trainingsphase und b) der Testphase. Während der Trainingsphase gilt es das Netzwerk für die Klassifikation elektrotechnischer Komponenten anzupassen. Die Modifikation, auch Fine-Tuning genannt, erfolgt anhand eines annotierten Datensatzes, welcher 205 Bilder beinhaltet und im Unternehmen Weidmüller erstellt wurde. Die Bilder zeigen die Komponenten aus diversen Perspektiven, unterschiedlichen Distanzen sowie mit verschiedenen Hintergründen. Für die Erstellung der Testbilder sowie deren Annotation mit sog. „Labels“ und „Bounding Boxes“ werden in Summe zwei Stunden benötigt. Der anschließende Trainingsvorgang wird zum Vergleichszweck sowohl mit dem Laptop als auch mit dem PC durchgeführt. Die Lerndauer unter Verwendung des Laptops beträgt 1 Stunde und 30 Minuten, die Trainingsdauer unter Verwendung des PCs sieben Minuten.

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Nach Abschluss des Trainings erfolgt die Testphase, in welcher die Objekterkennung mithilfe eines zeitkontinuierlichen Bildsignals durchgeführt wird. Währenddessen werden die Position und Orientierung der Komponenten variiert, um die Robustheit und Zuverlässigkeit zu prüfen. Des Weiteren erfolgt eine Veränderung der Belichtungsintensität durch Steuerung des Lichteinfalls eines Fensters mithilfe einer Jalousie. Ebenfalls wird die Hintergrundfarbe durch Verschieben der Teile von einer hellen Tischoberfläche auf eine schwarze Tastatur verändert. Der Versuch zeigt, dass die Objekterkennung eine hohe Robustheit aufweist. Das Objekt wird trotz Translation und Rotation größtenteils korrekt klassifiziert und lokalisiert. Durch die Veränderung der Belichtungsintensität reduziert sich die Zuverlässigkeit von 98 % bei schwacher Belichtung lediglich auf 97 % bei starker Belichtung. Beim Wechsel des Hintergrunds von hell auf dunkel sinkt hingegen die Zuverlässigkeit der Objekterkennung von ca. 80 % auf ca. 70 %. Die Helligkeit des Hintergrunds nimmt somit einen größeren Einfluss auf die Robustheit als die Belichtungsintensität. Darüber hinaus zeigt der Test auch die Grenzen der Zuverlässigkeit auf. Wird die Reihenklemme z.B. hochkant auf die Tischebene gestellt, ist eine Erkennung nicht möglich. Des Weiteren ist die Erkennung einer beigen Reihenklemme, unter ansonsten ausschließlich grünen Reihenklemmen, nur mit geringer Zuverlässigkeit von etwa 60 % möglich.
Die Trainingsphase spiegelt den Einrichtbetrieb der Objekterkennung eines Griff-in-die-Kiste-Systems wider. Unter Verwendung des Laptops beträgt die Einrichtdauer 3 Stunden und 30 Minuten. Die Einrichtdauer unter Verwendung des PCs beträgt hingegen 2 Stunden und 7 Minuten. Die signifikante Zeitreduktion um ca. 40% ist der höheren Grafikleistung des PCs gegenüber dem Laptop zuzuschreiben. Beide Szenarien erfüllen die Anforderung an die Einrichtdauer von 4 Stunden, s. Abschn. 3.1.
Die Testphase zeigt, dass die Varianz des Trainingsdatensatzes einen hohen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und die Robustheit der Objekterkennung nimmt. Es ist von großer Bedeutung, dass der Datensatz Bildaufnahmen der Objekte aus verschiedenen Positionen, Entfernungen, Belichtungen und Hintergründen enthält. Für die Zukunft gilt es die Zuverlässigkeit der Objekterkennung zu optimieren. Dies kann zum einen durch die Vergrößerung der Eingangsschicht des Faltungsnetzwerks von 320 x 320 Bildpixel auf 640 x 640 Bildpixel erfolgen oder zum anderen durch eine Erweiterung des Trainingsdatensatzes um Detailaufnahmen der Komponenten.

5 Fazit und Ausblick

Die Analyse des Technikstands (Kap. 2) zeigt die historischen sowie die gegenwärtigen Ansätze des Griff-in-die-Kiste auf. Daraus leiten sich zwei grundlegende Automatisierungsparadigmen ab: a) die regelbasierten Verfahren und b) die lernenden Verfahren. Im Rahmen der Expertenbefragung (Kap. 3) wurden 10 Anforderungen an eine zukünftige Lösung des industriellen Griff-in-die-Kiste erarbeitet und gewichtet. Die Bewertung beider Paradigmen verdeutlicht, dass weder die regelbasierten Verfahren noch die lernenden Verfahren eine geeignete Lösung darstellen. Die methodische Lücke zeichnet sich anhand des Zielkonflikts der Anforderungskombinationen, wie z.B. der Universalität und des Kontextwissens, ab. Es besteht der Bedarf an einem hybriden Verfahren, welches die Stärken beider Paradigmen vereint und die methodische Lücke schließt. Der Fokus in der Entwicklung des Griff-in-die-Kiste-Systems ist gemäß Anforderungsgewichtung auf die Zuverlässigkeit, die Robustheit, das Kontextwissen und die Einrichtdauer zu legen. Einen Lösungsansatz stellt hierbei die Bildverarbeitung unter Verwendung des Deep Learnings dar. Die Versuchsdurchführung (Kap. 4) zur Klassifikation und Lokalisierung elektrotechnischer Komponenten zeigt, dass eine robuste und universelle Objekterkennung mithilfe eines Faltungsnetzwerks realisierbar ist. Hierbei ist es von großer Bedeutung, dass die Bilder des Trainingsdatensatzes eine hohe Varianz in Bezug auf Perspektive, Belichtung und Hintergrund aufweisen. In Bezug auf die Einrichtdauer ist die Grafikleistung des verwendeten Systems zum Training des neuronalen Netzes entscheidend.
Für den weiteren Entwicklungsverlauf gilt es die Zuverlässigkeit der Objekterkennung zu optimieren, um z.B. die Erkennung aufrechtstehender Teile zu gewährleisten. Zielführend ist die Vergrößerung

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

der Netzwerkeingabeschicht sowie die Erweiterung des Trainingsdatensatz um zusätzliche Detailaufnahmen der Produkte. Darüber hinaus gilt es die flexible Objekterkennung von chaotisch bereitgestellten Teilen zu untersuchen. Für diese Aufgabe ist ein erhöhter Schwierigkeitsgrad zu erwarten, da sich wiederkehrende Objektmerkmale verschiedener Komponenten überlappen. Einen potenziellen Lösungsansatz stellt in diesem Zusammenhang die Verwendung der Tiefeninformation des Sensors sowie die Mehrfachansicht des Behälterinhaltes dar. Hinsichtlich der Optimierung der Robustheit des Greifvorgangs ist die Nutzung eines geschlossenen Regelkreises für die Regelung der Trajektorie geplant.

6 Literatur

[1] J. Bischoff *et al., Fabriken im Wandel: Gestaltungsprinzipien der Veränderungsfähigkeit und ihre Vorteile für Produktionsunternehmen.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.agiplan.de/wp-content/uploads/2019/05/Fabriken_im_Wandel_2016.pdf (Zugriff am: 11. Dezember 2021).

[2] C. Ferrari und J. Canny, „Planning optimal grasps“ in *1992 International Conference on Robotics and Automation Nice, France - May 1992*.

[3] D. Dupuis, S. Leonard, M. Baumann, E. Croft und J. Little, „Two Fingered Grasp Planning for Randomized Bin Picking“ in *Proc. of Robotics, Science and Systems 2008 Manipluation Workshop*.

[4] D. Buchholz, M. Futterlieb, S. Winkelbach und F. Wahl, *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2013): Karlsruhe, Germany, 6 - 10 May 2013*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013.

[5] F. Spenrath und A. Pott, „Gripping Point Determination for Bin Picking Using Heuristic Search“, *Procedia CIRP*, Jg. 62, S. 606–611, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.06.015.

[6] C. Martinez, H. Chen und S. Nidamarthi, „Automated bin picking system for randomly located industrial parts“ in *2015 IEEE International Conference on Technologies for Practical robot Applications (TePRA)*, Woburn, MA, USA, 2015, S. 1–6, doi: 10.1109/TePRA.2015.7219656.

[7] L.-P. Ellekilde und H. Petersen, „Motion planning efficient trajectories for industrial bin-picking“, *The International Journal of Robotics Research*, Jg. 32, 9-10, S. 991–1004, 2013, doi: 10.1177/0278364913487237.

[8] D. Kraft, L.-P. Ellekilde und J. Jørgensen, „Automatic Grasp Generation and Improvement for Industrial Bin-Picking“ in *Springer Tracts in Advanced Robotics, Gearing Up and Accelerating Cross□fertilization between Academic and Industrial Robotics Research in Europe*, F. Röhrbein, G. Veiga und C. Natale, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 155–176, doi: 10.1007/978-3-319-03838-4_8.

[9] Keyence Deutschland GmbH, *3D Robot Vision CV-X480D*. Produktbroschüre. [Online]. Verfügbar unter: https://www.keyence.de/landing/vision/pr_3d_robot_vision.jsp (Zugriff am: 11. Dezember 2021).

[10] Photoneo s.r.o., *Bin Picking Studio: Die vielseitigste Roboter-Intelligenz-Software.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.photoneo.com/de/bin-picking-studio-alles-in-einem-toolbox-fuer-roboterintegratoren/ (Zugriff am: 11. Dezember 2021).

[11] Pick-it N.V., *Pickit 3D-Produkte - Pickit 3D: Pickit M-HD, Pickit L-HD, Pickit L.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.pickit3d.com/de/produkte (Zugriff am: 11. Dezember 2021).

[12] A. Sahbani, S. El-Khoury und P. Bidaud, „An overview of 3D object grasp synthesis algorithms“ (en), *Robotics and Autonomous Systems*, Jg. 60, Nr. 3, S. 326–336, 2012, doi: 10.1016/j.robot.2011.07.016.

[13] L. Pinto und A. Gupta, „Supersizing Self-supervision: Learning to Grasp from 50K Tries and 700 Robot Hours“ in *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2016, S. 3406–3413.

[14] J. Mahler, J. Liang, S. Niyaz, M. Laskey, R. Doan und X. Liu, „Dex-Net 2.0: Deep Learning to Plan Robust Grasps with Synthetic Point Clouds and Analytic Grasp Metrics“, 27. März 2017. [Online]. Verfügbar unter: http://arxiv.org/pdf/1703.09312v3.

[15] S. Levine, P. Pastor, A. Krizhevsky, J. Ibarz und D. Quillen, „Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection“, *The International Journal of Robotics Research*, Jg. 37, 4-5, S. 421–436, 2018, doi: 10.1177/0278364917710318.

[16] A. Mousavian, C. Eppner und D. Fox, „6-DOF GraspNet: Variational Grasp Generation for Object Manipulation“ in *2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Seoul, Korea (South), 2019, S. 2901–2910, doi: 10.1109/ICCV.2019.00299.

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

[17] Z. Dong *et al.*, „PPR-Net:Point-wise Pose Regression Network for Instance Segmentation and 6D Pose Estimation in Bin-picking Scenarios“ in *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Macau, China, 2019, S. 1773–1780, doi: 10.1109/IROS40897.2019.8967895.

[18] Y. Xiang, T. Schmidt, V. Narayanan und D. Fox, „PoseCNN: A Convolutional Neural Network for 6D Object Pose Estimation in Cluttered Scenes“, 1. Nov. 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://arxiv.org/pdf/1711.00199.

[19] X. Deng, Y. Xiang, A. Mousavian, C. Eppner, T. Bretl und D. Fox, „Self-supervised 6D Object Pose Estimation for Robot Manipulation“ in *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France, 52020, S. 3665–3671, doi: 10.1109/ICRA40945.2020.9196714.

[20] Q. Shao *et al.*, „Suction Grasp Region Prediction Using Self-supervised Learning for Object Picking in Dense Clutter“ in *2019 IEEE 5th International Conference on Mechatronics System and Robots (ICMSR)*, Singapore, 52019, S. 7–12, doi: 10.1109/ICMSR.2019.8835468.

[21] K. Bousmalis *et al.*, „Using Simulation and Domain Adaptation to Improve Efficiency of Deep Robotic Grasping: 21-25 May 2018“ in *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, QLD, 52018.

[22] M. Sundermeyer, A. Mousavian und D. F. R. Triebel, *Contact-GraspNet: Efficient 6-DoF Grasp Generation in Cluttered Scenes* (Zugriff am: 13. Dezember 2021).

[23] D. Morrison, P. Corke, J. Leitner, „Learning robust, real-time, reactive robotic grasping“ (en), *The International Journal of Robotics Research*, Jg. 39, 2-3, S. 183–201, 2020, doi: 10.1177/0278364919859066.

[24] M. Gualtieri und R. Platt, „Robotic Pick-and-Place With Uncertain Object Instance Segmentation and Shape Completion“ (eng), *IEEE robotics and automation letters*, Jg. 6, Nr. 2, S. 1753–1760, 2021, doi: 10.1109/lra.2021.3060669.

[25] L. Ragginger, *Konzeptentwicklung einer Roboterzelle zur Entnahme und Bereitstellung von Bauteilen aus chaotischer Lagerung: Bachelorarbeit*. Köln, 2021.

[26] *VDI 2860:1990-05: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*, 2860, Berlin, Mai. 1990. [Online]. Verfügbar unter: https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2860/847032?websource=vdin

[27] A. Wieland und C. Marcus Wallenburg, „Dealing with supply chain risks: Robustheit - Def.“, *Int Jnl Phys Dist & Log Manage*, Jg. 42, Nr. 10, S. 887–905, 2012, doi: 10.1108/09600031211281411.

[28] G. Leao, *Robotic Bin Picking of Entangled Tubes*. Dissertation. Porto, Portugal, 2020.

[29] K. Harada, N. Yamanobe, K. Nagata und T. Ueshiba, „Project on Development of a Robot System for Random Picking-Grasp/manipulation planner for a dual-arm manipulator“ in *2014 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2014): Tokyo, Japan, 13 - 15 December 2014*, 2014, doi: 10.1109/sii.2014.7028104.

[30] M. Gualtieri, A. Pas, K. Saenko und R. Platt, „High precision grasp pose detection in dense clutter“ in *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, South Korea, 2016, S. 598–605, doi: 10.1109/IROS.2016.7759114.

[31] S. Song, A. Zeng, J. Lee und T. Funkhouser, „Grasping in the Wild: Learning 6DoF Closed-Loop Grasping From Low-Cost Demonstrations“, *IEEE Robot. Autom. Lett.*, Jg. 5, Nr. 3, S. 4978–4985, 2020, doi: 10.1109/LRA.2020.3004787.

[32] S. Nördinger, *BMW macht's vor - So lohnt sich der ‚Griff in die Kiste'*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.produktion.de/technik/so-lohnt-sich-der-griff-in-die-kiste-111.html (Zugriff am: 11. Dezember 2021).

[33] TensorFlow, *TensorFlow*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tensorflow.org/ (Zugriff am: 10. Dezember 2021).

[34] GitHub, *TensorFlow 2 Detection Model Zoo.* [Online]. Verfügbar unter: https://github.com/tensorflow/models/blob/c1ff413ad1cdd456b6da7fc213d9dcebc3957c5a/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md (Zugriff am: 1. Oktober 2021).

[35] W. Liu, D. Anguelov, D. Erhan, C. Szegedy, S. Reed und A. B. C.-Y. Fu, „SSD: Single Shot MultiBox Detector“, Jg. 9905, S. 21–37, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-46448-0_2.

[36] T.-Y. Lin *et al.*, „Microsoft COCO: Common Objects in Context“, 1. Mai 2014. [Online]. Verfügbar unter: https://arxiv.org/pdf/1405.0312.

Open Access. © 2021 T. Stuke , T. Bartsch , T. Rauschenbach
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Bedarfsorientierte Rekonfiguration einer Co-Simulation für diskrete Fertigungsanlagen

C. Härle[1], M. Barth[2], A. Fay[3]

Zusammenfassung

Simulation nimmt eine wesentliche Rolle im Engineering und Betrieb von Maschinen und Anlagen ein. Der manuelle Aufwand, der mit der Modellierung, Simulation sowie der Wartung und Pflege der Modelle einhergeht, ist jedoch nach wie vor über alle Lebenszyklusphasen hinweg erheblich. So müssen Modelle aus unterschiedlichen Disziplinen, wie beispielsweise der Mechanik, der Thermodynamik oder der Elektrik, zu einem Gesamtmodell gekoppelt werden. Kommt es im weiteren Verlauf zu umbaubedingten Änderungen der Anlage, muss das Modell wiederum einem Update unterzogen werden, was erneuten Aufwand bedeutet. In diesem Beitrag erweitern die Autoren ihr bereits vorgestelltes Konzept eines Assistenzsystems zur automatischen Konfiguration und betriebsparallelen Adaption von Co-Simulationen. Ziel ist es, dass produktionsbedingte Umbaumaßnahmen an der realen Anlage automatisch festgestellt, in die Co-Simulation überführt und in einem bestehenden Beschreibungsmittel der Anlage dokumentiert werden. Das erweiterte Konzept wird anhand von zwei industriellen Anwendungsbeispielen aus unterschiedlichen Bereichen der Fertigungstechnik prototypisch validiert.

Stichwörter

Automatische Modellgenerierung, Co-Simulation, Assistenzsystem, Umbauhandling

1 Motivation und Problemstellung

Der Maschinen- und Anlagenbau setzt zunehmend auf modulare Systemlösungen [1]. Hierdurch wird gewährleistet, dass die Investitionsgüter trotz volatiler Kundenanforderungen, Produktportfolios und Produktionsrandbedingungen lang genug eingesetzt werden können, um rentabel zu sein [2]. Aus Sicht der Simulationstechnik stellt eine sich oftmals ändernde Systemkonfiguration jedoch neue Herausforderungen dar [3]. So müssen z. B. neue Modulsimulationsmodelle (MSM) integriert, bestehende ersetzt und Modellparameter angepasst werden. Der damit verbundene manuelle Aufwand für Aufbau und Pflege der Simulationen ist bislang zeit- und kostenintensiv sowie fehleranfällig [4]. Zudem beschränkt sich der Einsatz von Simulation nicht mehr ausschließlich auf das Engineering. Auch parallel zum Betrieb kann Simulation gewinnbringend eingesetzt werden [5, 6]. Der kontinuierliche Vergleich von Simulationsergebnissen und Anlagenmesswerten eröffnet neue Diagnosemöglichkeiten und kann zu einem robusten Anlagenbetrieb beitragen [5]. Für die Lebenszyklusphasen Engineering und Betrieb hat das Autorenteam bereits ein Assistenzsystem (AS) entworfen, dass das Bedienpersonal der Simulation bei der initialen Modellkomposition, -konfiguration sowie betriebsparallelen -adaption unterstützt [7 – 11]. Muss nach einem Anlagenumbau die Modellkomposition und -konfiguration erneut durchgeführt werden, ergeben sich jedoch neue Herausforderungen. Grund hierfür ist, dass Än-

1 M. Sc. C. Härle, Hochschule Pforzheim
2 Prof. Dr.-Ing. M. Barth, Hochschule Pforzheim
3 Prof. Dr.-Ing. A. Fay, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

en Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

derungen nur selten ausreichend dokumentiert werden. Bei kleinen, nicht sicherheitsrelevanten Änderungen ist die Dokumentation oft unvollständig. [12, 13] Ohne ein aktualisiertes Beschreibungsmittel der Anlage versagen jedoch die Mechanismen des AS, welches für die initiale Modellkomposition und -konfiguration [8, 9] entworfen wurde. Das Vorhandensein sowie der rechnerbasierte Zugriff auf ein vollständiges und aktuelles Topologiemodell (TM) der Anlage wurde hierfür vorausgesetzt. Somit müssen die Mechanismen, welche für die initiale Komposition und Konfiguration der Co-Simulation zur Inbetriebnahmephase zum Einsatz kommen, entsprechend ergänzt werden. Welche Informationsquellen zusätzlich zur Verfügung stehen und wie die Informationen zielführend kombiniert werden können, wird in diesem Beitrag dargestellt. Zunächst werden in Abschnitt 2 das Ziel sowie die Anforderungen und Randbedingungen definiert. Abschnitt 3 ordnet den Beitrag in den Kontext der vorherigen Arbeiten des Autorenteams ein. Zusätzlich wird der für diese Arbeit relevante Stand von Wissenschaft und Technik untersucht. In Abschnitt 4 wird das erarbeitete Lösungskonzept vorgestellt und in Abschnitt 5 anhand von zwei industriellen Fertigungsanlagen validiert.

2 Ziel, Anforderungen und Rahmenbedingungen

Wie in Abschnitt 1 beschrieben, bilden manuelle Modellierungstätigkeiten eine der wesentlichen Aufwände beim Einsatz von Simulation. Darüber hinaus werden umbaubedingte Änderungen der Anlage selten ausreichend dokumentiert. Ziel des in diesem Beitrag weiterentwickelten AS ist es daher, Modellierungs- und Dokumentationstätigkeiten durch automatische Abläufe zu ersetzen, bzw. die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bei deren Arbeit zu unterstützen. Hierzu muss das AS, neben den in [8 - 11] definierten Funktionen (z. B. Modulmodelle laden, Initialwerte setzen, Modulmodelle koppeln und messdatenbasierte Adaptionen durchführen), die folgenden Anforderungen umsetzen. Das AS muss in der Lage sein:

A1. feststellen zu können, ob sich die reale Systemkonfiguration geändert hat (z. B. Modul ausgetauscht, Modul entfernt, zusätzliches Modul hinzugefügt)

A2. die automatische Modellgenerierung erneut durchzuführen und Umbauänderungen einzubeziehen

A3. durchgeführte Änderungen an der Anlagentopologie automatisch zu dokumentieren.

Es wird, wie in den Vorveröffentlichungen des Autorenteams, davon ausgegangen, dass MSM für alle Module zur Verfügung stehen. Das umfasst auch MSM für Module, die nicht Teil der initialen Konfiguration waren und neu in die Anlagenkonfiguration eintreten. Des Weiteren müssen die MSM über standardisierte Schnittstellen verfügen. Hier findet unverändert das Functional Mock-Up Interface (FMI) [14] Einsatz. So kann der Vorgang der automatischen Komposition und Konfiguration realisiert werden. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass ein Beschreibungsmittel aus der Engineering-Phase der Produktionsanlage existiert. Als Beschreibungsmittel wurde bereits ein auf AutomationML (AML) [15] basierendes TM ausgewählt. Um eine Änderung der Systemkonfiguration feststellen zu können, muss die Anlage über eine entsprechende Sensorik (z. B. RFID-Tags) verfügen und eine Schnittstelle zum Informationsaustausch mit dem AS existieren. Alternativ muss das AS eine Bedienereingabe bereitstellen, in der die Änderungen manuell eingetragen werden können.

3 Einordnung der Arbeit

Zunächst soll in Abschnitt 3.1 aufgezeigt werden, wie dieser Beitrag in die Vorveröffentlichungen des Autorenteams einzuordnen ist. In Abschnitt 3.2 wird der Stand von Wissenschaft und Technik analysiert und der Beitrag dazu abgegrenzt. In Abschnitt 3.3 werden die existierenden Lösungskonzepte überprüft und deren Defizite hinsichtlich der definierten Anforderungen aufgezeigt.

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3.1 Einordnung bezogen auf Vorveröffentlichungen des Autorenteams

Das im Rahmen von Vorveröffentlichungen des Autorenteams vorgestellte AS reduziert den für Aufbau und Pflege einer Simulation notwendigen manuellen Aufwand durch automatische Modellgenerierung und -adaption. Das Konzept ist, analog zu den Lebenszyklusphasen Engineering, Betrieb und Umbau, in die drei Bausteine „Komposition und Konfiguration“, „Betriebsparallele Modelladaption“ und „Rekonfiguration“ untergliedert. Baustein 1, die automatische Modellkomposition und -konfiguration, wurde in [8, 9] vorgestellt. Die notwendige Erweiterung wurde mit Baustein 2, der automatischen Modelladaption, in [7, 10, 11] beschrieben. Das dem AS zugrundeliegende Konzept ist in Bild 1 dargestellt. Basierend auf einem TM der Anlage, welches in der Engineering-Phase erzeugt wird, ist das AS in der Lage, die Co-Simulation einer modularen Produktionsanlage aufzubauen, zu initialisieren und zu simulieren. In Bild 1 sind die hierzu notwendigen Trigger und Schritte, Beziehungen und Datenflüsse als schwarze Pfeile dargestellt. Des Weiteren kann das AS für die betriebsparallele Modelladaption, in Bild 1 blau gekennzeichnet, genutzt werden. Hierfür wurde ein mehrkriterielles Optimierungsproblem formuliert, welches mittels evolutionärer Algorithmen gelöst werden kann. Das Ergebnis dieses Optimierungsproblems ist eine Menge an pareto-optimalen Lösungen, wobei jede Lösung eine bestimme Kombination von Ausprägungen der Teilmodelle (Parameter und Detaillierungsgrade) ist. Jede Lösung besitzt unterschiedliche Güteeigenschaften hinsichtlich der Abweichung von Mess- und Simulationswerten bzw. der benötigten Rechenzeit. Das Bedienpersonal des AS kann anschließend entscheiden, welche Lösung(en) für den weiteren Simulationsbetrieb sinnvoll sind. Der Fall, dass anlagenbedingt, z. B. durch Verschleiß, eine Abweichung auftritt wurde, mit dem Verweis auf Lösungen aus dem Bereich der prädiktiven Wartung, nicht weiter betrachtet. Im nächsten Abschnitt werden bestehende Lösungen für die Detektion von Änderungen in der Anlagentopologie und deren Überführung in das TM aufgezeigt.

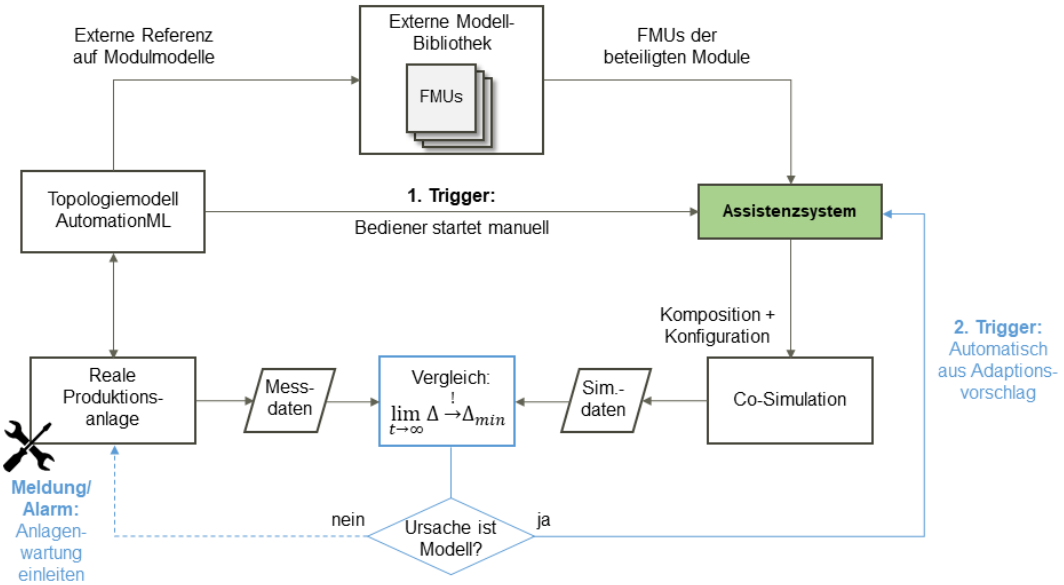


Bild 1: Bestehendes Konzept eines AS zur automatischen Komposition und Konfiguration sowie zur betriebsparallelen Adaption von Co-Simulationen [10].

3.2 Analyse und Abgrenzung zum Stand von Wissenschaft und Technik

Wie in Abschnitt 2 definiert, muss das AS für den neuen Konzeptbaustein drei Anforderungen erfüllen. Anforderung A1 sieht vor, dass das AS in der Lage ist, umbaubedingte Änderungen an der Anlage zu identifizieren. In [16] wird ein Anwendungsbeispiel aus der diskreten, lose verketteten Fließfertigung vorgestellt. Die Identifikation von neu eintretenden oder gewechselten Anlagenmodulen erfolgt über eine intelligente Nachbarschaftserkennung. Um benachbarte Module zu identifizieren „hat jedes

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Modul an den Stirnseiten RFID-Lesegeräte, -Tags sowie Näherungsschalter“ [16]. Weitere Informationsquellen, um die Anlagentopologie zu erfassen, sind u. a. über den Steuerungscode der Anlage [17], über das Kommunikationsnetzwerk [12] oder mittels bildbasierter Methoden wie 3D-Laserscans [18]. Werden diese Methoden wiederholt durchgeführt und die gesammelten Daten miteinander abgeglichen, ist es ebenfalls möglich, Änderungen in der Topologie zu identifizieren. Für Anforderung A2, die automatische Modellgenerierung, besitzt das AS bereits die notwendigen Mechanismen, wie Modelle „laden“, „koppeln“ und „konfigurieren“. Es muss lediglich dahingehend angepasst werden, dass eine oder mehrere alternative Informationsquellen anstelle des TM genutzt werden können. Bezüglich des Standes von Wissenschaft und Technik für diese Anforderung wird daher auf Vorveröffentlichungen des Autorenteams [8, 9] verwiesen. Im letzten Schritt müssen nach Anforderung A3 die identifizierten Änderungen dokumentiert werden. Entsprechend den in Abschnitt 2 definierten Anforderungen existiert ein AML-basiertes TM der Anlage aus der Engineering-Phase. Um redundante Informationsspeicher zu vermeiden, bietet es sich an, die identifizierten Änderungen in einer neuen Version des TM zu dokumentieren. Dem AS muss somit die Fähigkeit verliehen werden, das bestehende TM zu bearbeiten. Wichtig ist hierbei, dass für alle neu erstellten AML-Elemente, wie *InternalElements* und *ExternalInterfaces*, welche z. B. Module und Schnittstellen repräsentieren, eindeutige IDs vergeben werden. Die nötigen Konventionen können der IEC 62714 [15] entnommen werden. Für die Implementierung bietet sich die AutomationML Engine [19] an. Im nächsten Abschnitt werden die betrachteten Lösungsansätze hinsichtlich der in Abschnitt 2 definierten Anforderungen bewertet.

3.3 Defizite bestehender Ansätze hinsichtlich der definierten Anforderungen

Das Konzept aus [12] deckt sich bei den eingesetzten Standards wie FMI und AML. Der Fokus liegt jedoch vermehrt auf der betriebsparallelen Adaption, welche durch das bestehende Konzept (vgl. Bild 1, [10, 11]) bereits abgedeckt wurde. Zudem ist zu bemerken, dass die Änderungen nur auf Prozess-/Parameter-Ebene und nicht auf modularer Ebene angenommen werden. Konkret wird in [12] zur Konzeptvalidierung die Massenverteilung eines mechanischen Aufbaus variiert, jedoch keine Module hinzugefügt oder entfernt. In [13] wird nicht direkt der Modulgedanke bzw. der modulare Anlagenbau betrachtet, sondern es wird von einem Umbau im Allgemeinen ausgegangen. Entsprechend nehmen die Autoren nicht an, dass bereits MSM existieren, sondern generieren (Teil-)Modelle. Der Fokus liegt entsprechend auf datenbasierter Modellgenerierung. Die automatische Dokumentation von umbaubedingten Änderungen in Beschreibungsmitteln wird nicht explizit verfolgt. Entsprechend gibt es einen Bedarf bestehende Konzepte zur Detektion von umbaubedingten Änderungen zu erweitern.

4 Lösungskonzept

In diesem Abschnitt wird zunächst die Konzeptskizze aus Bild 1 um den Baustein 3 „Rekonfiguration“ erweitert. Die Abschnitte 4.2 bis 4.4 befassen sich im Detail mit der Detektion der umbaubedingten Änderungen der Anlagentopologie, der Rekonfiguration des Gesamtsystemmodells und im letzten Schritt mit der Dokumentation dieser Änderungen.

4.1 Erweiterte Konzeptskizze

Bild 2 erweitert das in Bild 1 dargestellte AS um die Lebenszyklusphase Umbau. Die relevanten Aspekte sind in Orange dargestellt. Nach dem Übergang von der Betriebs- in die Umbauphase erhält das AS zunächst einen externen Trigger. Dieser ist oben rechts in der Bild 2 dargestellt. Sofern die Produktionsanlage über die notwendige Sensorik verfügt, um neue Module zu erkennen, z. B. über RFIDs oder Kontaktschalter, kann der Trigger direkt von der Anlage kommen. Alternativ soll das AS über eine Bedienereingabe verfügen, über welche die Änderungen manuell eingetragen werden können. Unabhängig von der Trigger-Quelle ist es notwendig, dass dem AS Informationen über die Modul-IDs und

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

über die Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden. Im nächsten Schritt werden diese Informationen mit dem bestehenden TM abgeglichen und Unterschiede identifiziert. Diese werden in einer neuen Version des TMs dokumentiert. Auf diese Weise kann die Umbau-Historie nachvollzogen werden. Im Anschluss wird die Co-Simulation entsprechend dem neuen TM aufgebaut. Die notwendigen FMUs werden aus einer bestehenden Modellbibliothek geladen, gekoppelt und parametriert. Abschließend werden die Simulation ausgeführt und die Simulationsdaten visualisiert.

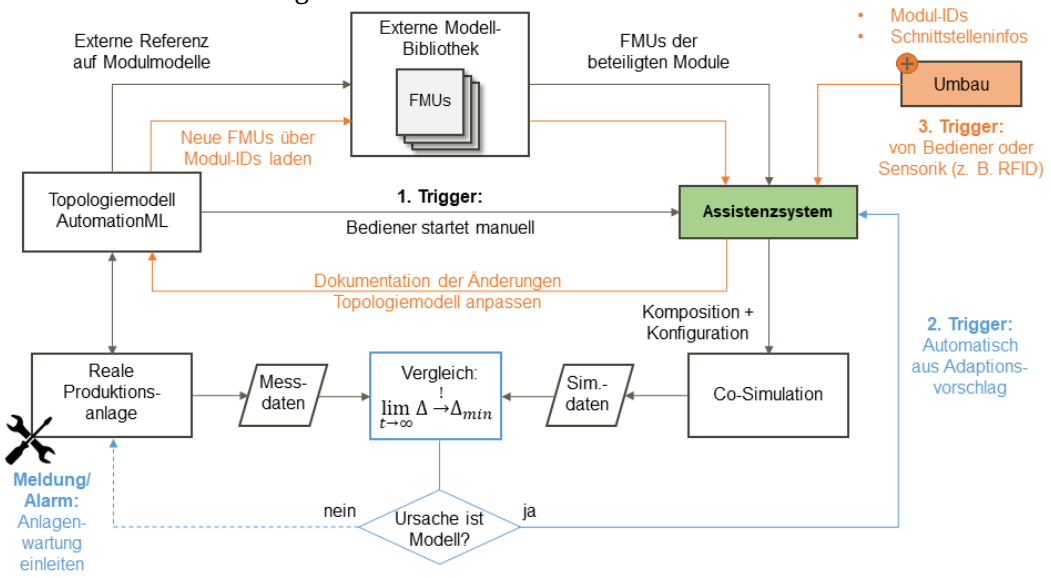


Bild 2: Gesamtkonzeptskizze des AS für die drei Lebenszyklusphasen Inbetriebnahme, Betrieb und Umbau.

4.2 Detektion von Änderungen der Anlagentopologie

Entsprechend dem in Abschnitt 3.2 vorgestellten Stand von Wissenschaft und Technik kann davon ausgegangen werden, dass umbaubedingte Änderungen der Anlage auf modularer Ebene detektiert werden können. Sollte dies, z. B. bei Bestandsanlagen, nicht der Fall sein, muss das Bedienpersonal des AS die Informationen manuell in das AS einpflegen. Unter der Annahme, dass die nötige Sensorik zur Verfügung steht, wird im ersten Schritt die initiale Topologie der Anlage zur Inbetriebnahmephase aus dem TM mit den Sensordaten verglichen. Zusätzlich zu den Sensordaten sind noch Mapping-Informationen nötig, die z. B. den RFIDs die entsprechenden MSM-Bezeichner und AML-IDs zuordnen. Da die Module und entsprechend die MSM von unterschiedlichen Herstellern stammen können, ist keine einheitliche Bezeichnung oder Namenskonvention zu erwarten. Verfügt das AS über die nötigen Mapping-Informationen, können die Informationen verglichen und Änderungen identifiziert werden.

4.3 Rekonfiguration des Gesamtsystemmodells

Die Rekonfiguration des Gesamtsystemmodells läuft identisch zu dem in [8, 9] beschriebenen Vorgehen bei der initialen Komposition und Konfiguration des Gesamtsystemmodells ab. Nachdem die korrekten MSM identifiziert wurden, werden die zugehörigen FMUs in eine Co-Simulation geladen und entsprechend gekoppelt. Für unveränderte Module können Modellparameter und der Detaillierungsgrad, welche im Rahmen der betriebsparallelen Adaption (vgl. [10, 11]) bestimmt wurden, übernommen werden. Für neu eintretende Module wird das MSM im niedrigsten Detaillierungsgrad initialisiert, und die in der *ModelDescription*-Datei der FMU hinterlegten Modellparameter werden verwendet. Für die neue Anlagenkonfiguration bietet es sich an, die betriebsparallele Adaption erneut durchzuführen, um Parameter und Detaillierungsgrade neu zu bestimmen. Zudem sollten Parameter und Detaillierungsgrade in einer Datenbank gespeichert werden, falls bestimmte Anlagenkonfigurationen öfter genutzt werden.

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4.4 Dokumentation der Änderungen

Um die vorgenommenen Änderungen zu dokumentieren wird, wie in Abschnitt 3.2 erwähnt, die AutomationML Engine verwendet. Diese ermöglicht es, das bestehende TM zu bearbeiten, z. B. Elemente umzubenennen und neue IDs zu vergeben. Der Aufbau eines TM ist identisch zu dem, welcher in [8, 9] für die Lebenszyklusphase Inbetriebnahme beschriebenen wurde. Im Falle von neuen Modulen, die bisher noch nicht Teil der Anlage waren, muss zunächst ein *InternalElement* (IE) erzeugt werden, welches das Modul repräsentiert. Diesem IE werden *ExternalInterfaces* (EI) entsprechend der real vorhandenen Schnittstellen des Moduls hinzugefügt. Ein zusätzliches EI wird genutzt, um auf das MSM zu verweisen. Dieser Verweis kann ein lokaler (relativer) Dateipfad oder beispielsweise die Referenz auf einen Server/eine Plattform, z. B. vom Modulhersteller, sein. Die Kopplungen der einzelnen Module wird durch *InternalLinks* (IL) der entsprechenden EI abgebildet. Für entfernte Module müssen die zugehörigen IE mit den damit verbundenen EI im bestehenden TM gelöscht werden. Zusätzlich werden alle IL von und zu diesen EI gelöscht. Im Fall von getauschten Modulen müssen die IE umbenannt und neue IDs vergeben werden. Zudem müssen die Referenzen auf die MSM angepasst werden. Das resultierende TM kann unter neuer Versionsnummer gespeichert werden. So kann die Umbauhistorie abgebildet werden (vgl. hierzu Bild 6).

5 Konzeptvalidierung

In diesem Abschnitt werden zwei unterschiedliche industrielle Anlagen vorgestellt, die zur Konzeptvalidierung herangezogen werden. Das erste System ist nach [20] der Hauptgruppe 3 der Fertigungsverfahren „*Trennen*“, konkret der Untergruppe 3.3.7 „*Gleitspanen*“ zuzuordnen. Hierbei handelt es sich um eine Gleitschleifanlage der Firma OTEC Präzisionsfinish GmbH (kurz OTEC). Diese und das damit verbundene Validierungsszenario wird in Abschnitt 5.1 vorgestellt. Das zweite System ist nach [20] der Hauptgruppe 5 der Fertigungsverfahren „*Beschichten*“, konkret der Untergruppe 5.9.1 „*Galvanisches Beschichten*“ zuzuordnen. Betrachtet wird eine Kleingalvanik der Firma Jentner Plating Technology GmbH (kurz Jentner). Anlage und Validierungsszenario werden in Abschnitt 5.2 vorgestellt.

5.1 Validierungsszenario 1: Werkstück- und prozessabhängiger Umbau bei Gleitschleifanlagen

Das Fertigungsverfahren Gleitspanen wird nach [21] „zum Entgraten und zur Verbesserung der Werkstückoberfläche eingesetzt“, wobei „zwischen Werkstücken (WS) und einer Vielzahl von losen Schleifkörpern bzw. einem Schleifmittel unregelmäßige Relativbewegungen stattfinden, die die Spanabnahme bewirken“. Gleitschleifen ist eine Form des Gleitspanens das „Schleifkörper [verwendet], deren Form, Größe und Zusammensetzung auf die zu bearbeitenden WS abgestimmt sind“ [21]. Das Gleitschleifen lässt sich nach [21], je nach Bauform und Wirkprinzip der Anlage, weiter in Trommel-, Vibrations-, Fliehkraft- und Tauch-Gleitschleifen unterteilen. Ausschlaggebend ist hierbei wie die Relativbewegung zwischen WS und Schleifmittel erzeugt wird. Die betrachtete Gleitschleifanlage der Firma OTEC ist dem Tauch-Gleitschleifen zuzuordnen. [21] definiert diese Form als „Gleitschleifen, bei dem die an einer Halterung befestigten WS in die sich bewegende Schleifkörperfüllung eines Behälters eingetaucht werden. Die Relativbewegung zwischen WS und Schleifkörpern kann auch durch eine Bewegung der WS hervorgerufen oder bei bewegten Schleifkörpern zusätzlich verbessert werden“. Der grundlegende Aufbau einer solchen Anlage ist in Bild 3 (links) schematisch dargestellt. Im rechten Bildteil ist ein Ausschnitt des 3D-CAD-Modells der OTEC-Anlage ergänzt. Die Komponenten „Arbeitsbehälter“ sowie „Schleifkörper und Zusatzmittel“ unterscheiden sich in den beiden Darstellungen nicht. Beim WS-Träger gibt es hingegen einen Unterschied: die reale Anlage verfügt über drei Arbeitsstationen (orange umrandet). Hierbei handelt es sich um Antriebe mit Spannmechanismen (blau umrandet), die einzelne WS (lila umrandet) halten und in den Arbeitsbehälter absenken können. Die

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Komponenten Spannmechanismus und WS sind rechts im Bild nochmals vergrößert dargestellt. Der Spannmechanismus besitzt zusätzlich einen Freiheitsgrad in Form eines Drehgelenks um das WS in die Strömung der Schleifkörper zu stellen.

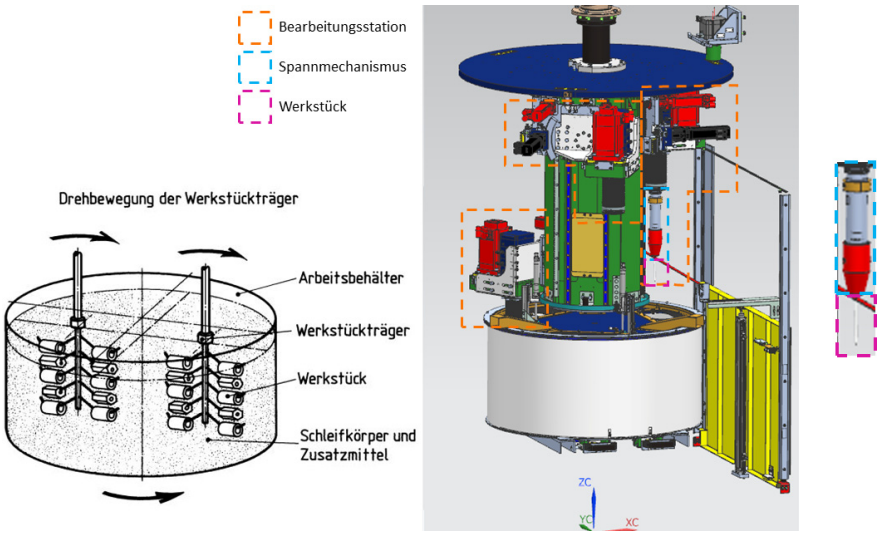


Bild 3: Aufbau und Wirkweise des Tauch-Gleitschleifens [21] (links) und CAD-Auszug der OTEC Anlage (rechts).

Anhand einer Expertenbefragung wurden für OTEC typische Umbauszenarien identifiziert. Im firmeninternen Versuchslabor werden u. a. Bearbeitungsprozesse für Kunden-WS entwickelt und Machbarkeitsstudien durchgeführt. Um neue Prozesse zu testen ist häufig ein Anlagenumbau notwendig. So werden beispielsweis abhängig von der WS-Geometrie unterschiedliche Spannmechanismen verwendet. Werden nun größere WS mit den gleichen Prozessparametern (z. B. Eintauchtiefe, Drehgeschwindigkeit des Behälters) bearbeitet, treten größere Kräfte auf. Die WS Antriebe können nur gewisse Arbeitsbereiche abdecken. Werden die Prozesskräfte zu groß, muss entweder der Prozess langsamer durchgeführt werden oder die Antriebe größer dimensioniert werden. Daher sind die Antriebseinheiten sowie WS-Halterungen modular ausgelegt. Zwei unterschiedliche Antriebseinheiten sind in Bild 4 dargestellt.
Neben Antrieben mit Pulsfunktion (schneller Wechsel der Drehrichtung, links) können auch Schrittmotoren (rechts) verwendet werden. Die Schrittmotoren ermöglichen es, das WS in einem bestimmten Winkel zum Schleifmittel zu halten und diesen über den Prozess zu ändern. So kann die Schleifmittelströmung das WS gezielt von verschiedenen Seiten angreifen. Ein solcher Antriebs-Modulwechsel soll vom AS detektiert, modelliert und dokumentiert werden.

Bild 4: Antriebswechsel als Umbauszenario – Umbau von Pulsantrieb (links) zu Schrittmotor (rechts).

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

5.2 Validierungsszenario 2: Mehrstufige Oberflächenbeschichtung in der Galvanotechnik

Das zweite Fertigungsverfahren ist der Untergruppe 5.9.1 „galvanisches Beschichten“ zuzuordnen. Beschichten wird in [20] allgemein als „Fertigen durch Aufbringen einer fest haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück“ definiert. Weiter „ist der unmittelbar vor dem Beschichten herrschende Zustand des Beschichtungsstoffes“ maßgebend [20]. Beim verwendeten Verfahren liegt der Beschichtungsstoff im ionisierten Zustand vor. Metallische Werkstoffe aus wässrigen Lösungen, lösemittelhaltigen Bädern oder Salzschmelzen werden zur Beschichtung eingesetzt [22]. Beschichtungen werden nach [23] eingesetzt, um Anforderungen an die Oberflächen von WS gerecht zu werden, wenn der Grundwerkstoff diese nicht erfüllen kann. Hierzu gehört u. a. der Schutz gegen äußere Einflüsse (z. B. Korrosionsschutz) oder die Erzielung spezieller physikalischer Effekte (wie Elektroisolation, Erhöhung der Leitfähigkeit) [23]. Die Kleingalvanik der Firma Jentner eignet sich für gängige galvanische Prozesse wie z. B. zum elektrolytischen Entfetten, Rhodinieren, Vergolden und Versilbern [24]. Hierfür verfügt die Anlage über insgesamt vier Spül- sowie vier Arbeitswannen. Die Anlage ist in Bild 5 von der Seite (a) und von oben (b) dargestellt. Links in Bild 5 (b) befinden sich Bedienfeld und Display, z. B. für die Einstellung von Prozessparametern, gekennzeichnet durch die Marker 1 bis 15. Im rechten Anlagenteil von Bild 5 (b) findet der Prozess statt. Die Wannen sind durch den Marker 16 gekennzeichnet, die zwei Anodenstangen durch 17 und die Kathodenstange durch 18. Die Kathodenstange dient als Warenstange auf der, mittels Warengestelle, die WS angebracht werden. Die Anlage ist dahingehend modular aufgebaut, dass die Elektrolyte in den vier Bearbeitungswannen unkompliziert ausgetauscht und so andere Beschichtungsprozesse durchgeführt werden können. Dies ermöglicht es, ohne großen Aufwand, andere WS zu bearbeiten. Die Flexibilität, die die Anlage bedingt durch das Wannensystem aufweist, kann ein monolithisches Simulationsmodell nicht abbilden. Im Rahmen der Lebenszyklusphase Umbau wird der Fall betrachtet, dass der Prozess, und damit die Reihenfolge und Zusammensetzung der Elektrolyte, sich ändert.

Bild 5: Kleingalvanik der Firma Jentner. Links in seitlicher Ansicht (a), rechts in Ansicht von oben (b). [24]

5.3 Resultierende Topologiemodelle

In Bild 6 werden die TM der beiden Anlagen nach dem Umbau und der entsprechenden Umbaudokumentierung visualisiert. Links ist das TM der OTEC-Anlage dargestellt. Die Topologie der Anlage hat sich nicht geändert. Die getauschte Antriebseinheit wird durch ein neues Physikmodell (orange hervorgehoben) repräsentiert. Entsprechend wird der Pfad zur referenzierten FMU angepasst. Das EI *ModelReference* besitzt hierfür eine refURI, deren Wert vom AS umgeschrieben wird. Die nötigen Informationen entnimmt das AS den Mapping-Informationen. Die Schnittstellen der Module, repräsentiert durch IL (blaue Verbindungslinien), bleiben bestehen. Der Umbau an der Jentner-Anlage ist aufwändiger. Hier wird der Galvanikprozess um einen weiteren Schritt, das Rhodinieren (Modul grün hervorgehoben), erweitert. Das AS lädt hierfür ein zusätzliches Galvanikbad-Modell. Die beiden Schnittstellen der Bäder werden nach dem gleichen Schema gekoppelt (WS-Transfer und Flüssigkeits-

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

verschleppung durch WS). Die Wannen für spezielle Elektrolyte können ebenfalls mit einem RFID-System ausgestattet werden. So können z. B. Parameter wie elektrochemische Zerfallsraten oder Konzentrationen dem AS übermittelt werden, um so das MSM (rechts unten in Bild 6) zu initialisieren. Die beiden resultierenden Co-Simulationen sind schematisch links unten in Bild 6 dargestellt.

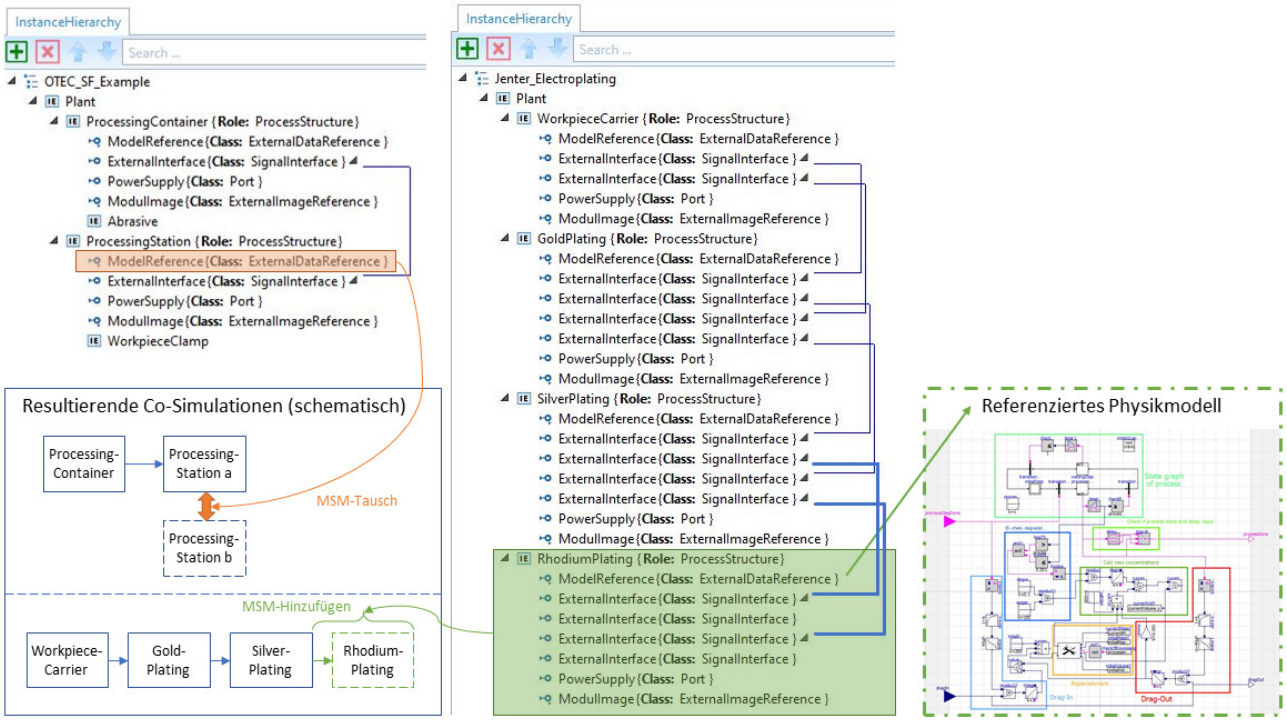


Bild 6: Resultierende TM und Co-Simulationen nach Umbau. Links: TM OTEC Anlage, mittig: TM Jentner Anlage.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein bestehendes Konzept für die automatische Modellgenerierung und -adaption im Bereich der diskreten Fertigung um Funktionen für die Lebenszyklusphase Umbau erweitert. Hierfür werden sensorbasierte Methoden für die Erkennung von umbaubedingten Änderungen angenommen. Die Sensordaten werden mittels Mapping-Informationen den MSM der entsprechenden Module zugeordnet. Im Anschluss können die Mechanismen des AS, welche bereits zur Inbetriebnahmephase Einsatz finden, für die automatische Modellgenerierung genutzt werden. Abschließend werden die identifizierten Änderungen in einer neuen Version des TM dokumentiert. Das Konzept wurde anhand von zwei Anlagen aus unterschiedlichen Bereichen der Fertigung validiert. Es konnte gezeigt werden, dass die manuellen Tätigkeiten, die nach bisherigem Stand der Technik mit Modellierung und Simulation einhergehen, für alle Lebenszyklusphasen einer Produktionsanlage gesenkt werden können. Eine offene Fragestellung bei der Rekonfiguration der Gesamtsystemmodelle ist zum aktuellen Zeitpunkt noch, wie Kopplungsinformationen erfasst werden können, die nicht mechanischer Art sind. Vorstellbar ist z. B. das ein Physikmodell zur Simulation die Umgebungstemperatur verwendet. Hierfür würde es keine mechanische Kopplung geben, die durch Sensorik erfasst und in die Co-Simulation überführt werden könnte. Darüber hinaus wäre es sinnvoll eine Standardisierung der Mapping-Information anzustreben, um zukünftig den Grad an Automatisierung zu erhöhen. Es entwickeln sich bereits unabhängige proprietäre Lösungen wie Marktplätze über welche Komponenten- und Modulmodelle zur Verfügung gestellt werden. Durch frühzeitige Gremienarbeit kann der Standardisierungsaufwand reduziert werden. Zu erwähnen sind an dieser Stelle z. B. die Arbeiten des SG AAS Teilmodelle Simulation der Plattform Industrie 4.0.

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

7 Literatur

[1] Dispan, J.: „Modulare Bauweise und neue Produktionskonzepte im Werkzeugmaschinenbau," Working Paper Forschungsförderung, No. 118, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf, 2019.

[2] Marks, P.; Hoang, X. L.; Weyrich, M.; Fay, A.: A systematic approach for supporting the adaptation process of discrete manufacturing machines," in Research in Engineering Design 29, 621–641, Springer-Verlag, 2018.

[3] Ladiges, J.: „Automatisierte Bestimmung von Eigenschaften industrieller Produktionssysteme unter Einfluss evolutionärer Änderungen," Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik, 2018.

[4] Rose O., März L.: „Simulation," in: März L., Krug W., Rose O., Weigert G. (eds) „Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik." VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

[5] Scaramellini, S. et al.: „Parallel Simulation Techniques for Real-Time Field Management: An Innovative Integrated Production Optimization Tool Application," in Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, 2017.

[6] Svensson, B.; Danielsson, F.; Lennartson, B.: „Time-synchronised hardware-in-the-loop simulation - Applied to sheet-metal press line optimisation," in Control Engineering Practice 20(8), 792-804, 2012.

[7] Härle, C.; Barth, M.; Fay, A.: „Hybride Modellierung und verteilte Multi-Agenten zur Co-Simulation auf Einplatinen-Computern," in 16. Fachkonferenz Autonome und intelligente Systeme in der Automatisierungstechnik (AALE 2019), S. 69-77, 2019.

[8] Härle, C.; Barth, M.; Fay, A.: „Simulationsmodellgenerierung im modularen Maschinen- und Anlagenbau - Assistenzsystem zur automatischen Komposition und Konfiguration von Co-Simulationen," in atp magazin 62(9), S. 72-79, 2020.

[9] Härle, C.; Barth, M.; Fay, A.: "Assistance system for the automated composition and configuration of a Co-Simulation", In: 34th European Simulation and Modelling Conference (ESM 2020), S. 155-162, 2020.

[10] Härle, C.; Barth, M.; Fay, A.: „Betriebsparallele Adaption einer Co-Simulation für diskrete Fertigungsanlagen," in VDI-Automationskongress, S. 517-534, 2021.

[11] Härle, C.; Barth, M.; Fay, A.: "Operation-parallel adaptation of a co-simulation for discrete manufacturing plants," in: 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2021), September 07-10, 2021, Västerås, Sweden.

[12] Zipper, H. et al.: „Keeping the Digital Twin up-to-date – Process Monitoring to Identify Changes in a Plant", In IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), S. 1592-1597, 2018.

[13] Braun, D.; Schloegl, W.; Weyrich, M.: „Automated data-driven creation of the Digital Twin of a brownfield plant," in 26th IEEE Intern. Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2021.

[14] Blochwitz, T. et al.: „The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models," in Proceedings of the 8th International Modelica Conference, 105-114, 2011.

[15] Drath R.: „AutomationML: A Practical Guide". Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg; 2021.

[16] Marseu, E. et al.: „Exemplarische Übertragung der RAMI 4.0-Verwaltungsschale auf die SmartFactoryKL - Systemarchitektur für Industrie 4.0-Produktionsanlagen," in Whitepaper SF-2.1: 04/2017.

[17] Ashtari, B. T. et al.: „Consistency check to synchronize the Digital Twin of manufacturing automation based on anchor points" In Procedia CIRP Volume 72, S. 159-164, 2018.

[18] Lindskog, E. et al.: „Layout Planning and Geometry Analysis Using 3D Laser Scanning in Production System Redesign", In Procedia CIRP Volume 44, S. 126-131, 2016.

[19] AutomationML e.V., AutomationML Engine, https://www.automationml.org/about-automationml/aml-tools/, [letzter Aufruf 07.12.2021].

[20] DIN 8580. Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, 2003.

[21] DIN 8589-17. Fertigungsverfahren Spanen - Teil 17: Gleitspanen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, 2003.

[22] Förster, R.; Förster, A.: „Einführung in die Fertigungstechnik", Springer Vieweg, 2018.

[23] Warnecke HJ. „Beschichten," in: Einführung in die Fertigungstechnik. Vieweg+Teubner Verlag, 1993.

[24] Jentner Plating Technology GmbH, Kleingalvanik DIGITAL II Version 2.0 – Bedienungs-anleitung, https://shop.jentner.de/media/a8/40/ca/1617282672/DIGITAL-II-Ver-2-0-de.pdf, [letzter Aufruf: 07.12.2021].

Open Access. © 2022 C. Härle, M. Barth, A. Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03-11.03.2023

Wie können heterogene Prozessdaten automatisch in einem Energiemanagementsystem zusammengeführt werden?

Maxim Runge[1], Leif-Thore Reiche[2], Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann[3], Prof. Dr. Alexander Fay[4]

Zusammenfassung

Mit der Anwendung der Norm ISO 50001 und der einhergehenden Einführung eines Energiemanagementsystems (kurz EnMS) kann eine sukzessive Erhöhung der Energieeffizienz erreicht werden. Zur Umsetzung von Energie-Monitoring- oder Standby-Management-Funktionalitäten müssen Energiedaten in der Feldebene bereitgestellt werden und auf Edge-Devices oder SPSen mittels eines Energiemanagement-Programms ggf. im Datenformat angepasst, skaliert und auf eine etablierte Kommunikationsschnittstelle (z.B. basierend auf OPC UA- oder MQTT) abgebildet werden. Die Erstellung dieser Energiemanagement-Programme geht mit einem hohen Engineering-Aufwand einher, denn die Feldgeräte aus der heterogenen Feldebene stellen die Energiedaten nicht in einer standardisierten Semantik bereit. Um diesem Engineering-Aufwand entgegenzuwirken, wird ein Konzept für ein universelles Energiedateninformationsmodell (kurz UEDIM) vorgestellt. Dieses Konzept sieht die Bereitstellung der Energiedaten an das EnMS in einer semantisch standardisierten Form vor. Zur weiteren Entwicklung des UEDIM wird im Beitrag näher untersucht, in welcher Form Energiedaten in der Feldebene bereitgestellt werden können und welche Anforderungen für das UEDIM aufzustellen sind.

Stichwörter

Energiemanagement, Informationsmodell, Anforderungsermittlung

1 Einleitung

Die Einführung eines Energiemanagementsystems (kurz EnMS) auf Basis der Norm ISO 50001 [1] in einem industriellen Produktionsbetrieb kann eine kontinuierliche Erhöhung der Energieeffizienz bewirken. Nach [2] werden die für den Betrieb eines EnMS erforderlichen Soft- und Hardwarekomponenten unter dem Begriff technisches Energiemanagement (kurz tEnMS) zusammengefasst. Die Komponenten eines tEnMS dienen zum Sammeln, Kommunizieren, Speichern, Bewerten und Anzeigen von Messdaten, die z.B. für Monitoring-Anwendung verwendet werden können. Des Weiteren zählen zum tEnMS auch Geräte, die mit Hilfe sogenannter Lastmanagementfunktionen in energiesparende Betriebszustände versetzt werden können. Zur Realisierung von Energie-Monitoring- und Lastma-

[1] M. Eng. Maxim Runge, Hochschule Hannover, Hannover
[2] M. Sc. Leif-Thore Reiche, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Hamburg
[3] Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Niemann, Hochschule Hannover, Hannover
[4] Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr, Hamburg

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

nagement-Funktionalitäten ist ein Datenaustausch zwischen den Feldgeräten und dem Energiemanagementsystem erforderlich. Diese Daten werden im Folgenden als Energiemanagement-Informationen (kurz EmI bezeichnet.
Im Rahmen des tEnMS können EmI durch verschiedene Feldgerätetypen bereitgestellt werden. Diese Feldgerätetypen sind einerseits, z.B. als OPC UA-fähiges Gerät aus dem Industrial Internet of Things (IIoT-Gerät), zur direkten Kommunikation mit einer Energiemanagement-Applikation geeignet. Andererseits stellen etablierte Gerätetypen die EmI über Feldbussysteme, Punkt-zu-Punkt-Verbindungen wie IO-Link oder andere Kommunikationssysteme bereit. Diese EmI werden aus der Feldebene an ein Edge-Device oder eine SPS übertragen und müssen mittels eines Energiemanagement-Programms ggf. im Datenformat angepasst, skaliert und auf eine geeignete Kommunikationsschnittstelle (z.B. eine OPC UA-Schnittstelle) abgebildet werden. Die Erstellung dieser Energiemanagement-Programme geht nach [3] mit einem hohen Engineering-Aufwand einher, denn die Feldgeräte aus der heterogenen Feldebene stellen die EmI nicht in einer standardisierten Form bereit. Bei der Erstellung des Energiemanagement-Programms muss die Semantik, in der die EmI in Rohdaten auf dem Edge-Device oder der SPS eintreffen, den individuellen Gerätehandbüchern entnommen werden. Auf Grundlage dieser Semantik muss ermittelt werden, welche Verarbeitungsschritte für die jeweiligen EmI anzuwenden sind, damit diese in die Energiemanagement-Applikation eingebunden werden können.
Um diesem Aufwand entgegenzuwirken, wird in den Beiträgen [4] und [5] ein Konzept für ein universelles Energiedateninformationsmodell (kurz UEDIM) vorgestellt. Dieses Konzept sieht die Feldgerätetyp-unabhängige Bereitstellung der EmI an die Energiemanagement-Applikation in einer semantisch standardisierten Form vor.
In Kapitel 2.1 wird für die Anforderungsermittlung eines UEDIM relevante Literatur vorgestellt. Nachfolgend wird in Kapitel 3 das Konzept eines UEDIM und dessen Platzierung in der Kommunikationshierarchie beschrieben. Ergänzend wird das Vorgehen bei der Ableitung von Anforderungen auf Grundlage der durchgeführten Recherche dargestellt. Der Beitrag wird mit einer Zusammenfassung der präsentierten Inhalte und einem Ausblick der nächsten Arbeitsschritte im zugehörigen Forschungsprojekt *„Entwicklung von Energiemanagementschnittstellen für IoT-Technologien“* abgeschlossen.

2 Stand der Technik

Um Anforderungen für ein UEDIM aufstellen zu können, wird in diesem Kapitel erfasst, welche Feldgeräte zur Bereitstellung von EmI geeignet sind. Nachfolgend wird näher untersucht, wie EmI heutzutage an eine Energiemanagement-Applikation übertragen werden können. Abschließend wird ein Ausblick gegeben, welche Möglichkeiten für die Bereitstellung von EmI es in Zukunft gibt.

2.1 Bestandsaufnahme geeigneter Geräte für die Übernahme von Energiemanagement-Aufgaben

Nach [5] können in der Feldebene verschiedene Ethernet-basierte und nicht-Ethernet-basierte Gerätetypen zur Übernahme von Energiemanagement-Aufgaben eingesetzt werden. Bild 1 zeigt beispielhaft, dass die Feldebene heterogen charakterisiert sein kann und verschiedene Feldgerätetypen mit unterschiedlichen Kommunikationsschnittstellen zur Bereitstellung von EmI eingesetzt werden können. Nicht-Ethernet-basierte Gerätetypen können z.B. IO-Link-Geräte wie Stromüberwachungsrelais oder PROFIBUS-basierte Frequenzumrichter sein, die für das Monitoring relevante EmI (beispielsweise Strom, Leistungsfaktor oder Energiezählwerte) bereitstellen können. Ethernet-basierte Gerätetypen verfügen über Kommunikationsschnittstellen wie beispielsweise Modbus TCP oder PROFINET. Einige Ethernet-basierte Gerätetypen unterstützen so genannte Energieprofile. Diese sind jeweils auf

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

ein spezifisches Kommunikationsprotokoll ausgerichtet. Solche Energieprofile sind PROFIenergy [6] für PROFINET, sercos Energy [7] für sercos III oder CIP Energy [8] für DeviceNet und EtherNet/IP. Die Energieprofile unterstützen tEnMS-Funktionalitäten aus den Bereichen Messdatenerfassung (z. B. Energiezählwerte) und Lastmanagement (z.B. Standby-Management). Mit Hilfe der Energieprofile können ausgehend vom Feldgerät die EmI im Rahmen der jeweiligen Energieprofilspezifikation in standardisierter Form einem Edge-Device oder einer SPS bereitgestellt werden, sodass die tEnMS-Funktionalitäten für überlagerte Systeme verfügbar gemacht werden. Die EmI der genannten Ethernet-basierten und nicht-Ethernet-basierten Gerätetypen liegen in unterschiedlicher Semantik auf dem Edge-Device oder der SPS vor und stehen zur Weiterverarbeitung durch ein Energiemanagement-Programm und für die Bereitstellung der EmI zur Energiemanagement-Applikation zur Verfügung. Ethernet-basierte IIoT-Geräte weisen i. d. R. eine geeignete Kommunikationsschnittstelle (z.B. OPC UA) auf, die eine direkte Kommunikation mit der Energiemanagement-Applikation ermöglicht. Die Aufbereitung und Bereitstellung der EmI gegenüber der Energiemanagement-Applikation wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

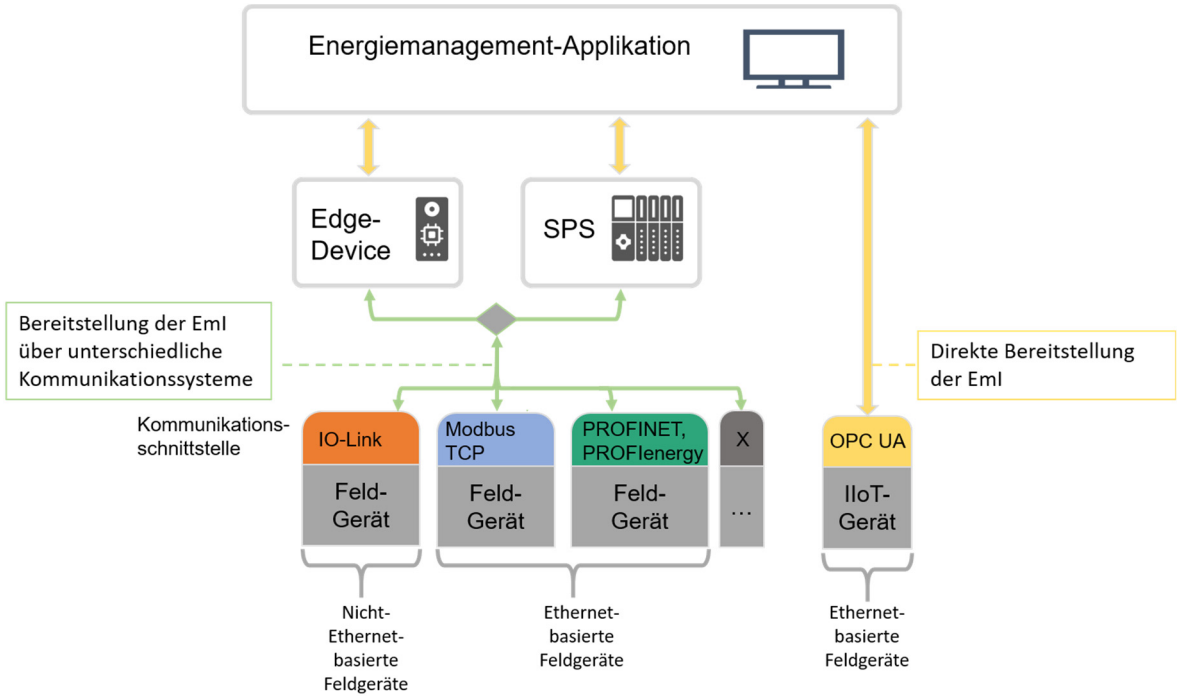


Bild 1: Überblick über die heterogene Feldebene

2.2 Austausch der EmI mit der Energiemanagement-Applikation

Bild 2 zeigt, dass die EmI der unterschiedlichen Gerätetypen aus der Feldebene im Rohdatenformat auf den Geräten 1, 2 und 3 vorliegen, die zur Kommunikation mit der Energiemanagement-Applikation geeignet sind. Die EmI müssen mittels eines Energiemanagement-Programms ggf. im Datenformat angepasst und skaliert werden. Im Rahmen eines erforderlichen Daten-Mappings können die EmI auf Variablenstrukturen übertragen werden, die auf eine geeignete Kommunikationsschnittstelle, wie eine OPC UA- oder MQTT-Schnittstelle, abgebildet werden. Bei der Programmerstellung können unterschiedliche Konzepte bezüglich der semantischen Aufbereitung der EmI verfolgt werden. In Konzept (A) werden manuell OPC UA Variablen angelegt, die zur Bereitstellung der EmI genutzt werden. Die

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

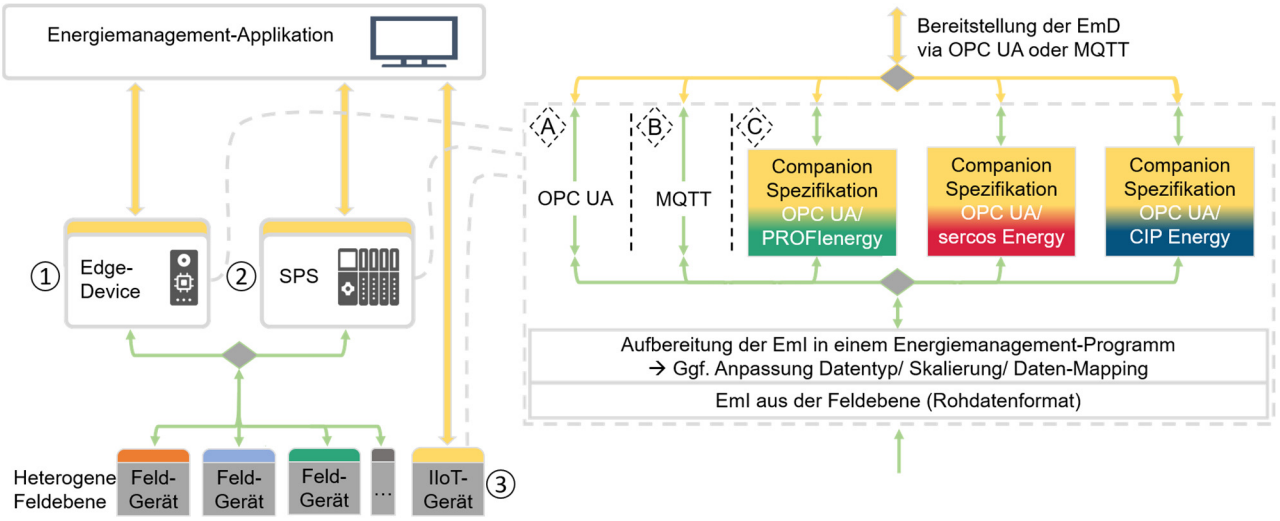


Bild 2: Bereitstellung der EmI an die Energiemanagement-Applikation

Variablenbezeichnungen sowie zugeordneten Datentypen können beispielsweise einem Firmen-internen Standard oder den individuellen Vorgaben der programmerstellenden Person folgen. Angelehnt an Konzept (A) erfolgt bei Konzept (B) ebenso eine individuelle Deklaration von Variablen, die für die Bereitstellung der EmI über eine MQTT-Schnittstelle durchgeführt werden muss. In den Konzepten (A) und (B) werden die EmI individuell von der programmerstellenden Person aufbereitet, sodass eine nicht standardisierte Semantik vorliegt. Konzept (C) sieht die Nutzung einer OPC UA Companion Spezifikation vor. Mittels Import eines sogenannten OPC UA Node-Schemas wie [9] werden zum Anlegen von OPC UA-Variablen Klassenstrukturen bereitgestellt. Mit der Instanziierung dieser Klassenstrukturen werden automatisch OPC-UA-Variablen angelegt, die z.B. Bezeichnungen und Datentypen der Variablen für die Darstellung eines Energiemesspunkts festlegen. Das Konzept (C) umfasst die Gewährleistung einer standardisierten Semantik mit der Anwendung einer OPC UA Companion Spezifikation. In OPC UA Companion Spezifikationen werden entsprechende Informationsmodelle, die z.B. auf Basis eines Energieprofils erstellt wurden, mit standardisierten OPC UA-Elementen im Format des OPC UA-Adressraummodells [10] dargestellt. Die im Rahmen der Bereitstellung der EmI relevanten OPC UA Companion Spezifikationen sind dabei auf Energieprofile wie PROFIenergy, sercos Energy oder CIP Energy ausgerichtet. Für PROFIenergy wurde bereits eine OPC Companion Spezifikation [11] veröffentlicht. Im Fall des Energieprofils sercos Energy wurde eine allgemeine OPC UA Companion Spezifikation [12] veröffentlicht, die auf das Bussystem sercos III ausgerichtet ist. Für das Kommunikationssystem CIP ist die Entwicklung einer allgemeinen OPC UA-Companion Spezifikation angekündigt [13]. für die genannten Energieprofile entwickelt. Die Semantik der EmI orientiert sich dabei an dem jeweils zugeordneten Energieprofil, sodass kein allgemeingültiger Standard besteht.

2.3 Möglichkeiten der Bereitstellung von EmI in der Zukunft

Neben den bisherigen Möglichkeiten, EmI bereitzustellen, werden aktuell und zukünftig neue Lösungen ausgearbeitet und bestehende Lösungen erweitert, da die bisherige Übertragung von EmI erhöhte Engineering-Aufwände in der Erstellung von Energiemanagement-Programmen mit sich zieht. [2]
Nachfolgend werden Möglichkeiten beschrieben, wie die zukünftige Bereitstellung von EmI erfolgen kann.
Nach [14] kann die Einführung oder der Ausbau eines tEnMS nach einem parallelen oder nach einem integrierten Ansatz erfolgen. Beim parallelen Ansatz werden z.B. neue Messgeräte in den vorhandenen Automatisierungsaufbau eingebracht, die EmI wie Energiezählwerte für Monitoring-Anwendun-

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

gen liefern können. Der integrierte Ansatz sieht vor, dass bereits zur Anlagenautomatisierung erforderliche Geräte wie z.B. Frequenzumrichter genutzt werden, um EmI wie Energiezählwerte für Monitoring-Anwendungen liefern zu können. Somit fallen bei diesem Ansatz keine Anschaffungskosten für Neugeräte an. Die Umsetzung des integrierten Ansatzes erfordert die Erstellung von neuen Programmteilen auf Edge-Devices oder der SPSen. Diese Programmteile sind erforderlich, um EmI wie z.B. Energiezählwerte aus Feldgeräten abzurufen oder um Lastmanagement-Befehle an Feldgeräte weiterleiten zu können. Liegen die EmI in einem Energieprofil-basierten Datenformat auf der Steuerungsebene vor, können aufgrund der standardisierten Semantik Codegenerator-Anwendungen genutzt werden, um dem Engineering-Aufwand bei der Erstellung von entsprechenden Energiemanagement-Programmen entgegenzuwirken. Das Konzept des Beitrags [14] sieht außerdem vor, dass eine automatische Generierung des OPC UA-Adressraums realisiert wird und EmI aufwandsarm der Energiemanagement-Applikation bereitgestellt werden können.
In Beitrag [15] wird angeführt, dass in der heutigen heterogenen Feldebene viele verschiedene Feldbusse und Kommunikationssysteme eingesetzt werden und diese jeweils auf einem eigenem Informationsmodell basieren. Im genannten Beitrag wird diesbezüglich das Konzept vorgestellt, auch Feldgeräte in das OPC UA-Kommunikationssystem zu integrieren. Der Vorteil der standardisierten Semantik der OPC UA-Kommunikation ist im Hinblick auf eine skalierbare Interoperabilität für Industrie 4.0-Anwendungen maßgeblich. [15]
Neben OPC UA ist MQTT ein alternatives IIoT-Protokoll, das zur Bereitstellung von EmI eingesetzt werden kann [16]. Der Einsatz eines MQTT-Kommunikationssystems ist im direkten Vergleich mit OPC UA nicht auf eine standardisierte Semantik ausgerichtet. Der Schwerpunkt bei MQTT liegt auf der effizienten Übertragung von Daten („*lightweight protocol*“). Die Vorteile des Protokolls liegen in der sicheren Datenübertragung bei geringer Netzwerkqualität mit Verbindungsabbrüchen, geringer Netzwerkbandbreite oder einer hohen Latenz. [17]
In der NE 176 [18] beschreibt der Verein Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie e.V. (kurz NAMUR) ein Informationsmodell, das bei Anwendungen aus dem Bereich „*Monitoring und Optimierung*“ eingesetzt werden kann. Diese NAMUR-Empfehlung umfasst die Definition eines standardisierten Informationsmodells, welches eine einheitliche Semantik für Produktions- und Anlagendaten bereitstellt. Die einheitliche Semantik wird über eine standardisierte OPC UA-Schnittstelle realisiert. Den bereitzustellenden EmI werden jeweils eindeutige semantische Kennungszahlen (kurz „*ID*“) zugeordnet. Für die Kennungszahlen sind in der Standardisierung Attribute wie „*Name, Datentyp, Maßeinheit, zulässiger Wertebereich und weitere Attribute (Metadaten)*“ definiert. [18]

3 Lösungsansatz zur Vereinheitlichung der heterogen vorliegenden EmI

In diesem Kapitel wird ein Konzept für ein UEDIM vorgestellt, welches eine semantische Standardisierung der EmI gewährleisten soll. Nachfolgend werden auf Basis von Kapitel 2.1 Anforderungen an ein UEDIM abgeleitet.

3.1 Konzept für ein UEDIM

Die Untersuchung der Gerätetypen hinsichtlich der Semantik der EmI in Kapitel 2.1 hat ergeben, dass die Feldebene heterogen aufgebaut ist. Um eine Bereitstellung der EmI gegenüber Energiemanagement-Applikationen in standardisierter Semantik zu erreichen, wird ein UEDIM konzipiert, das die EmI der heterogenen Feldebene strukturieren kann.

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

Bild 3 zeigt die Platzierung des UEDIM in der Kommunikationshierarchie. In den Fällen (A-D) werden die EmI von Ethernet-basierten und nicht-Ethernet-basierten (1) Feldgeräten über das jeweilige Kommunikationssystem (2) den spezifischen Kommunikationsschnittstellen (3) des Edge-Devices oder der SPS bereitgestellt. Auf der Steuerungsebene können die EmI auf das UEDIM abgebildet werden, indem die SPS oder das Edge-Device über ein entsprechendes Programm eine Umrechnung der proprietär eintreffenden Daten auf das UEDIM vornimmt (4). EmI, die auf dem Datenformat eines standardisierten Energieprofils beruhen, können mit Hilfe der spezifisch auf das jeweilige Energieprofil ausgerichteten OPC UA Companion Spezifikation im UEDIM abgebildet werden.

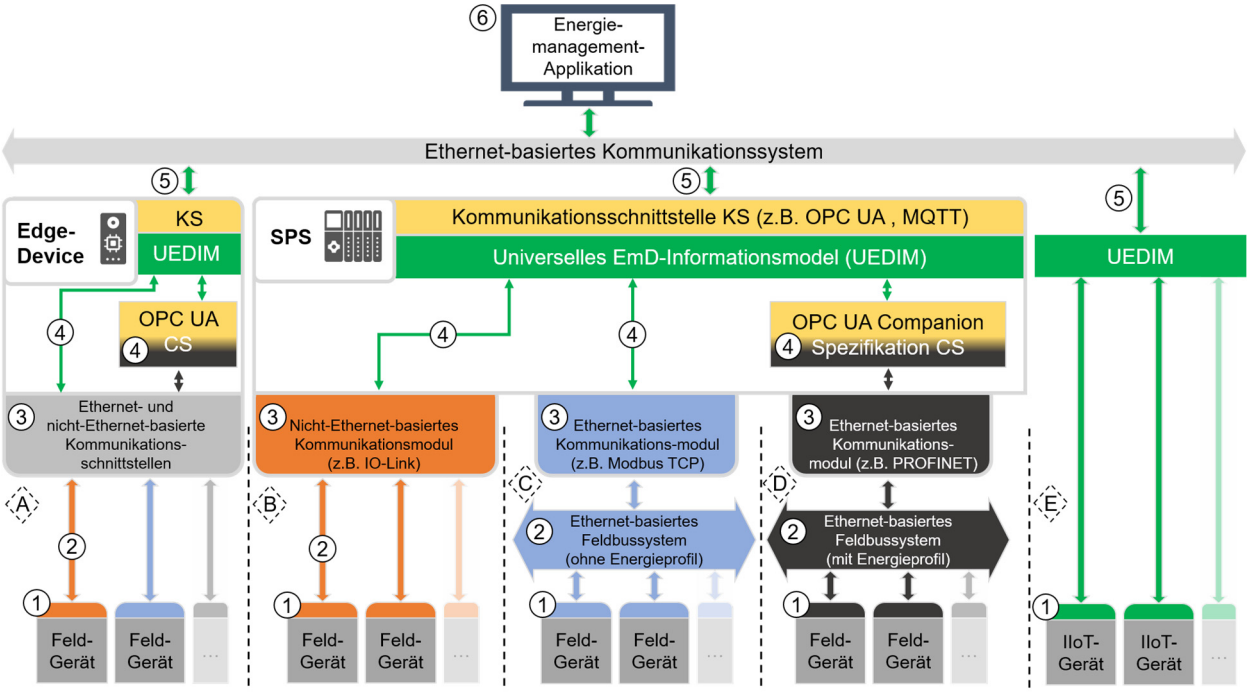


Bild 3: Platzierung des UEDIM in der Kommunikationshierarchie, basierend auf [5]

In der standardisierten Semantik des UEDIM können die EmI über geeignete Kommunikationsschnittstellen (5), die auf OPC UA oder MQTT basieren können, der Energiemanagement-Applikation (6) bereitgestellt werden. In Fall (E) können IIoT-Devices eine direkte Bereitstellung der EmI in der standardisierten Semantik des UEDIM, z.B. über OPC UA- oder MQTT-Kommunikationsschnittstellen realisieren.

3.2 Anforderungen an ein UEDIM

Bei der Ableitung von Anforderungen an ein UEDIM auf Basis des Standes der Technik werden sogenannte Persona-Profile [19] entworfen, um die Bedürfnisse der Stakeholder tabellarisch zu erfassen. Die entworfenen Personas haben aufgrund der spezifischen Aufgaben, z.B. bei der Edge-Device-Programmentwicklung, direkte Schnittpunkte mit dem UEDIM oder den standardisiert bereitgestellten EmI.
In Tabelle 1 wird eines der entworfenen Persona-Profile beispielhaft abgebildet.

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

Tabelle 1: Persona-Profil Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen

Arbeitsrolle	– **Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen**
Kenntnisse	– Erfahrung im Umgang mit den eingesetzten Entwicklungsumgebungen – Kenntnisse bei der Implementierung von Kommunikationsbausteinen zur Geräteanbindung (z.B. mittels Anwendung von Energieprofilen) – Edge-Device-/ SPS-Programmentwicklung – Hardwarekonfiguration – EmI-Mapping auf dem Edge-Device/ auf der SPS
Ziele	– Edge-Device- oder SPS-Programm soll die Anforderungen erfüllen, die im Lastenheftes des Auftraggebers festgehalten sind – Effiziente Programmerstellung
Arbeitsprozesse	– Erstellung von Edge-Device- oder SPS-Programmen – Änderung von Edge-Device- oder SPS-Programmen – Inbetriebnahme – Fehlersuche und Diagnose
Wünsche	– Reduzierung des zu erbringenden Engineering-Aufwandes – Zugriff auf möglichst wenige Geräte-Dokumentationen und -Handbücher zur Planung/ Umsetzung

Tabelle 2: Gruppierung der Personas

Persona-Gruppe	**Persona Nr.**	**Persona-Bezeichnung**	**Priorität**
Geräteentwicklung	1 2	– Gerätehersteller*in für Feldgeräte – Gerätehersteller*in für Edge-Devices und SPSen	– Hoch – Hoch
Anlagenerrichtung und Inbetriebnahme	3 4 5	– Entwicklungsingenieur*in für Produktionsanlagen – Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen – Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES	– Hoch – Hoch – Hoch
Prozessleitebene	6	– Personal in der Leitwarte	– Mittel
Betrieb	7 8 9	– Betriebsleiter*in – Anlagenbediener*in – Energiemanager*in	– Mittel – Gering – Hoch
Einkauf	10 11	– Einkäufer*in für Energie – Einkäufer*in (Maschinen und Einzelkomponenten)	– Mittel – Mittel
Instandhaltung und Optimierung	12	– Instandhalter*in	– Mittel
Management	13	– Geschäftsführung	– Mittel
Dienstleister Energiemanagement-Sektor (betriebsextern)	14 15 16	– Programm-Entwickler*in für Edge-Devices und SPSen (extern) – Systemkonfigurator*in für Prozessleitebene und MES (extern) – Instandhalter*in (extern)	– Hoch – Hoch – Mittel

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

In Form von Persona-Profilen werden weitere Personengruppen erfasst, die von dem Einsatz des UEDIM profitieren können. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die entworfenen Personas und die Einteilung in Persona-Gruppen. Hinzukommend wird den Personas eine Priorität zugeordnet, die eine Einschätzung der Autoren darüber angibt, welche Personas im Rahmen ihrer Tätigkeit direkte Berührungspunkte mit einem UEDIM aufweisen.
Auf der Grundlage der entworfenen Personas werden, basierend auf [5] und anhand der Inhalte von Kapitel 2.1, Anforderungen an ein UEDIM abgeleitet und in Tabelle 3 aufgeführt. Die Anforderungen werden den entworfenen Personas zugeordnet.

Tabelle 3: Anforderungen an ein UEDIM, basierend auf [5]

Anforderungsgruppe	**Zugeordnete Personas**	**Funktionale (f) und nicht-funktionale (nf) Anforderungen**
Interne Strukturierung der EmI im UEDIM	1, 2, 3, 4, 5, 14, 15	Standardisierte Semantik der EmI (f): Die EmI sollen im UEDIM in standardisierter Semantik dargestellt werden, um einen einheitlichen Zugriff auf diese EmI zu ermöglichen. Im Rahmen der Modellierung des UEDIM sollen Ontologien einbezogen werden, um EmI in Form von einheitlichen Terminologien darzustellen [20]. Das UEDIM muss die eindeutige Definition eines Messpunkttyps (Zuordnung von Bezeichnung, Datentyp, Maßeinheit, zulässigem Wertebereich z.B. anhand einer ID wie in [18] dargestellt) enthalten.
	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16	Unterstützung von etablierten tEnMS-Funktionalitäten (f): Die etablierten tEnMS-Funktionalitäten der bestehenden Energieprofile [21] [22] [8] sollten unterstützt werden.
	1, 2, 3, 4, 14	Verwendung der vorhandenen OPC UA Companion Spezifikationen (f): Bei der Verwendung des UEDIM muss sichergestellt werden, dass die etablierten OPC UA Companion Spezifikationen [11] [12] [13] unterstützt werden, sofern die Quelle der EmI ein Energieprofil unterstützendes Gerät ist.
	1	Integration von IIoT-Technologien (nf): Das UEDIM sollte auf IIoT-Geräten ausführbar sein, damit diese EmI an die Energiemanagement-Applikation liefern können, wie in [23] gefordert.
Schnittstellen zu EmI von der Feldebene und zur Energiemanagement-Applikation	1, 2, 3, 4, 14	Austausch von EmI mit der Feldebene (f): Die EmI von nicht-Ethernet-basierten (z. B. IO-Link) und Ethernet-basierten Feldgeräten (z. B. Modbus TCP oder PROFINET) sollten im UEDIM darstellbar sein (siehe Unterkapitel 2.2).
	1, 2, 4, 5, 14, 15	Kompatibilität mit etablierten Kommunikationsschnittstellen (nf): Die im UEDIM dargestellten EmI sollten über die etablierten OPC-UA- oder MQTT-Kommunikationsschnittstellen bereitgestellt werden, um die jeweiligen Vorteile der Kommunikationssysteme zu nutzen, wie in Unterkapitel 2.2 beschrieben.

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

Anforderungsgruppe	Zugeordnete Personas	Funktionale (f) und nicht-funktionale (nf) Anforderungen
Allgemein	1, 3, 4, 5, 7, 13, 14, 15	Reduktion des Engineering-Aufwands (nf): Die Erstellung von Edge-Device oder SPS-Programmen, die primär die Bereitstellung der EmI realisieren, ist mit einem hohen Engineering-Aufwand verbunden [3]. Die Gestaltung des UEDIM soll darauf abzielen, diesen Engineering-Aufwand zu reduzieren. Die standardisierte Semantik soll die Anwendung von Codegeneratoren zur automatischen Generierung von Edge-Device- oder SPS-Programmen, die zur Bereitstellung von EmI dienen, begünstigen (vgl. [14]).
	2, 4, 5, 14, 15	Verarbeitungszeit auf SPSen oder Edge-Devices (nf): Wenn EmI zwischen der Feldebene und übergeordneten Ebenen des Automatisierungssystems übertragen werden, muss sich die Zykluszeit bei Verwendung des UEDIM an branchenüblichen Zykluszeiten orientieren, die mit vergleichbaren Programmen (unter Verwendung der OPC UA Companion Spezifikation [11]) erreicht werden.
	1, 2, 3, 4, 5, 14, 15	Modularität des UEDIM (nf): Die Energiemanagementfunktionalitäten sollen einzeln aus dem tEnMS aktiviert oder deaktiviert werden können [24]. Im UEDIM müssen daher die Funktionalitätsmodule (Messwerterfassung oder Stand-by-Management-Funktionen aus den festgelegten Energieprofilen) getrennt voneinander konzipiert werden, damit sie unabhängig voneinander sind.

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Anforderungsermittlung für ein UEDIM vorgestellt, welches die Standardisierung der Semantik von EmI zum Ziel hat. Als Grundlage für die Anforderungsermittlung wurde relevante Literatur zusammengefasst und näher untersucht, von welchen Feldgerätetypen EmI wie z.B. Energiezählwerte bereitgestellt werden können. Hinzukommend wurde vorgestellt, über welche Kommunikationstechnologien die EmI bis zur Energiemanagement-Applikation weitergeleitet werden können und welche Vor- und Nachteile die jeweiligen Kommunikationstechnologien aufweisen. Um Ansätze für eine standardisierte Semantik von EmI aufzugreifen, werden außerdem aktuelle Ansätze wie Energieprofil-spezifische OPC UA-Companion Spezifikationen betrachtet. Im Rahmen der Anforderungsermittlung wurde mit einer Persona-Analyse beschrieben, welche Stakeholder von der Einführung eines UEDIM profitieren würden und welche Interessengruppen identifiziert werden können. Auf der Basis der Literaturrecherche und der Persona-Analyse wurden Anforderungen an ein UEDIM aufgestellt.
In den nächsten Schritten des Forschungsprojekts werden die Energieprofil-spezifischen Datenmodelle gegenübergestellt und die Funktionsumfänge im Detail verglichen. Auf diesem Weg werden die Energiemanagement-Funktionalitäten etablierter Kommunikationstechnologien erfasst und können in die Konzeption des UEDIM eingebracht werden. Auf dieser Grundlage und auf Basis der durchgeführten Anforderungsermittlung wird in einem iterativen Vorgehen ein UEDIM modelliert.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des IGF-Projekts 21329 N, das vom Bundesministerium für Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) auf der Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert wird.

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

Literatur

[1] 2018. *ISO 50001:2018-08 - Energy management systems - Requirements with guidance for use*

[2] Würger, A., Niemann, K.-H. u. Fay, A.: Concept for an Energy Data Aggregation Layer for Production Sites. A combination of AutomationML and OPC UA. IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies And Factory Automation (ETFA). 2018, S. 1051–1055

[3] Würger, A.: Automatisierte Generierung von Energiemanagementfunktionen auf der Basis des PROFINET-Energieprofils. Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg 2020

[4] L.-T. Reiche, M. Runge, A. Fay u. K.-H. Niemann: Communication of energy data in automation systems. 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). 2021

[5] M. Runge, L.-T. Reiche, K.-H. Niemann, A. Fay u. A. Würger: Requirements for an energy data information model for a communication-independent device description. 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2021

[6] Common Application Profile PROFIenergy, PROFIBUS Nutzerorganisation e. V., 2021

[7] SERCOS International e.V.: sercos Energy – Spezifikation des Energieprofils für sercos III verfügbar. https://www.sercos.de/news-events/newsdetail/sercos-energy-spezifikation-des-energieprofils-fuer-sercos-iii-verfuegbar/, abgerufen am: 25.11.2021

[8] ODVA: CIP Energy. https://www.odva.org/technology-standards/distinct-cip-services/cip-energy/, abgerufen am: 01.06.2021

[9] OPC Foundation: Namespace and identifiers for OPC UA for PROFIenergy Information Model. https://reference.opcfoundation.org/v104/PNEM/v100/docs/A.1/, abgerufen am: 06.12.2021

[10] IEC 62541-3:2015. *IEC 62541-3:2020 - OPC Unified Architecture - Part 3: Address Space Model*

[11] Profibus Nutzerorganisation e. V.: OPC UA for Energy Management, 2020. https://de.profibus.com/downloads/opc-ua-for-energy-management-companion-specification, abgerufen am: 01.06.2021

[12] OPC Foundation: OPC Unified Architecture for Sercos Devices, 2017. https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-opc-ua-information-models/opc-unified-architecture-for-sercos-devices/, abgerufen am: 02.12.2021

[13] ODVA: OPC UA Companion Specification to Be Developed for CIP. https://www.odva.org/news/opc-ua-companion-specification-to-be-developed-for-cip/, abgerufen am: 02.12.2021

[14] Würger, A., Niemann, K.-H., Fay, A., Gienke, M. u. Paulick, M.: Integriertes Anlagenengineering zur Erhöhung der Energieeffizienz. atp Edition

[15] A. Veichtlbauer, M. Ortmayer u. T. Heistracher: OPC UA integration for field devices. In: IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)

[16] MQTT, OPC UA und PROFINET für IIoT, Leßmann, G. u. Schriegel, S., 2021

[17] Profanter, S., Tekat, A., Dorofeev, K., Rickert, M. u. Knoll, A.: OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance Evaluation of Industry 4.0 Protocols. 20th 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE 2019 - 2019, S. 955–962

[18] NAMUR Open Architecture - NOA Informationsmodell, NE 176, Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie, 2021

[19] Nielsen, L.: Personas - User Focused Design. 2013

[20] Linnenberg, T., Mueller, A. W., Christiansen, L. J., Seitz, C. W. u. Fay, A.: Ontoenergy - A lightweight ontology for supporting energy-efficiency tasks: Enabling generic evaluation of energy efficiency in the engineering phase of automated manufacturing plants. 5th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development (KEOD). 2013, S. 337–344

[21] Common Application Profile PROFIenergy, PROFIBUS Nutzerorganisation e. V., 2019

[22] SERCOS International e.V.: Energy Profile, 2011. https://www.sercos.de/news-events/newsdetail/sercos-energy-spezifikation-des-energieprofils-fuer-sercos-iii-verfuegbar/, abgerufen am: 16.06.2021

[23] Al-Gumaei, K., Schuba, K., Friesen, A., Heymann, S., Pieper, C., Pethig, F. u. Schriegel, S.: A Survey of Internet of Things and Big Data Integrated Solutions for Industrie 4.0. IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies And Factory Automation (ETFA). 2018, S. 1417–1424

[24] Javied, T., Huprich, S. u. Franke, J.: Cloud based Energy Management System Compatible with the Industry 4.0 Requirements. IFAC-PapersOnLine 52 (2019) 10, S. 171–175

Open Access. © 2022 Maxim Runge, Leif-Thore Reiche, Prof. Dr. Karl-Heinz Niemann, Prof. Dr. Alexander Fay
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + CC BY-SA

Geschlossener Informationsfluss über den gesamten Produktlebenszyklus als Wegbereiter zur effizienten Refabrikation - Stand der Technik und Ausblick

Lars Schaupeter[1], Matthias Vette-Steinkamp[1]

Zusammenfassung

Die Refabrikation wird eine entscheidende Rolle zur Erreichung einer Kreislaufwirtschaft einnehmen, denn durch diesen Prozess können bereits ausgediente Produkte wieder in einen neuwertigen Zustand gebracht und dem Markt erneut hinzugefügt werden. Dennoch steht die Refabrikation vor Hindernissen, welche überwunden werden müssen. Dieser Beitrag soll einen Überblick über die Herausforderungen geben und den Stand der Technik erörtern, wie ein durchgängiger und geschlossener Informationsfluss über den gesamten Produktlebenszyklus einen wichtigen Beitrag zur Lösung dieser Hindernisse liefern kann.

Stichwörter

Refabrikation, Industrie 4.0

1 Einleitung

Da bis 2030 ein weltweiter Anstieg der Konsumenten um drei Milliarden erwartet wird und dies mit einem ansteigenden Bedarf an endlichen Ressourcen einhergeht, muss in Frage gestellt werden, ob das bisher überwiegend angewendete Wirtschaftssystem nach dem linearen Prinzip des „Nehmen-Herstellen-Verbrauchen-Entsorgen“ weiterhin möglich ist [1, 2]. Aus diesem Grund hat in den letzten Jahren das Konzept der Kreislaufwirtschaft immer mehr an Bedeutung gewonnen [2].
Ein Kreislaufwirtschaftsmodell zielt darauf ab, Produkte und Materialien so zu gestalten, dass diese möglichst vollständig und nachhaltig genutzt werden. Durch die Einführung dieses Wirtschaftsmodells soll die globale wirtschaftliche Entwicklung vom Verbrauch endlicher Ressourcen entkoppelt werden. Zudem können durch den Einsatz einer Kreislaufwirtschaft neue nachhaltige Geschäftsmodelle generiert, Arbeitsplätze geschaffen und gleichzeitig negative Umweltauswirkungen reduziert werden [1].

Ein Ansatz, um Produkte möglichst lange nutzen zu können, sind die vier sogenannten „Re-X“ Strategien. Hier stehen für technische Produkte verschiedene „End-of-Life“ (EOL)-Strategien zur Verfügung, angefangen mit einer Reparatur (Repair) und Weiterverwendung (Reuse), über die Refabrikation (Remanufacturing), bis hin zum Recycling [1–3]. (siehe Bild 1)

[1] Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld, Birkenfeld

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

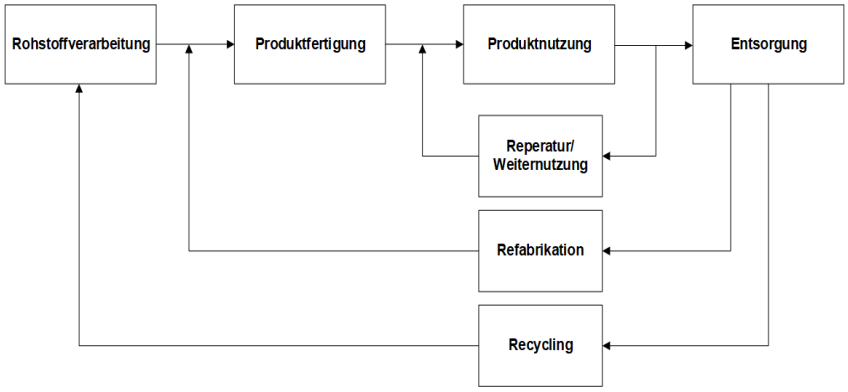


Bild 1 Strategien der Kreislaufwirtschaft nach [1, 3]

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Refabrikation und einer Übersicht, welche Vorteile ein durchgängiger und geschlossener Informationsfluss über den Produktlebenszyklus für die Refabrikation durch den Einsatz von Industrie 4.0 Technologien bringen kann.

2 Die Refabrikation und ihre Hindernisse

Der große Vorteil der Refabrikation liegt auf der längeren Nutzungsdauer der Bauteile und der darin enthaltenen Materialien, denn durch eine Refabrikation werden gebrauchte Produkte so wiederhergestellt, dass diese mindestens das Qualitätsniveau eines Neuprodukts erreichen, wenn nicht sogar übersteigen. Der Refabrikationsprozess kann in folgende Schritte unterteilt werden (siehe Bild 2):

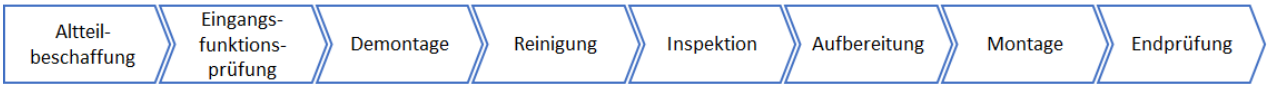


Bild 2 Technische Prozesskette der Refabrikation nach [3]

Der Refabrikationsprozess beginnt mit der Beschaffung von Altteilen. Dieser Schritt dient der Sicherung einer kontinuierlichen und konstanten Bereitstellung von Altteilen der Produkte in entsprechender Quantität und Qualität.
Anschließend erfolgt vor allem für mechatronische oder elektrische Produkte eine Eingangsfunktionsprüfung, um den aktuellen Zustand festzustellen und Fehler zu detektieren. Im nächsten Schritt, der Demontage, werden die Bauteile in ihre Einzelteile zerlegt und sortiert. Hierbei werden nicht wiederverwendbare oder refabrizierbare Komponenten entfernt. Dieser Schritt erfolgt meist manuell, da aufgrund der unterschiedlichen Verschmutzungs- und Abnutzungserscheinungen eine Einschätzung des Aufbereitungspotentials nur durch geschultes Personal einzuschätzen ist. Nach der Demontage erfolgt die Reinigung der Komponenten, indem diese von Fett, Öl, Rost, Lack und anderen Verschmutzungen befreit werden. Darauffolgend werden die Komponenten ein weiteres Mal inspiziert, um festzustellen, ob die Komponenten direkt in der Montage verwendet werden können, ob diese zunächst aufbereitet oder sogar entsorgt werden müssen. Müssen die Komponenten eine Aufbereitung durchlaufen, werden diese mit auf das jeweilige Produkt entsprechend angepasste Methoden in einen neuwertigen Zustand überführt. Im nächsten Schritt erfolgt dann eine Montage des gesamten Produkts, welches abschließend einer Endprüfung unterzogen wird, um sicherzustellen, dass mindestens das Niveau eines Neuprodukts erreicht wurde. [2]

Open Access. © 2022 Lars Schaupeter, Matthias Vette-Steinkamp1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Durch den Refabrikationsprozess kann so der Energieverbrauch und Emissionsausstoß im Vergleich zu einer Neuherstellung erheblicher verringert werden [4]. Die Refabrikation wird „daher als Kreislaufführungsoption mit einem der höchsten Ressourceneffizienzpotenziale bewertet und besitzt beispielsweise auch im Vergleich zum Recycling eine geringere Umweltbelastung.“ [2] Trotz dieser Vorteile ist die Refabrikation ein noch wenig genutzter Prozess in der Industrie [4].

Es hat sich gezeigt, dass die Chancen für eine erfolgreiche und lohnenswerte Refabrikation von Produkten in den Bereichen am größten sind, in denen die Produkte langlebig und mit hochwertigen Materialen hergestellt werden, sodass eine Aufbereitung möglich ist. Andererseits muss es aber auch einen Markt für refabrizierte Produkte geben. Auch die Verfügbarkeit von Altteilen muss sichergestellt sein, denn meist landen Produkte nach ihrer Benutzung auf Deponien oder in Verbrennungsanlagen zur energetischen Verwertung. [2, 5, 6] Hier besteht die Herausforderung darin, geeignete Produkte abzufangen, um diese der Refabrikation zuzuführen.
Hinzu kommen Herausforderungen zur Erreichung einer wirtschaftlichen Umsetzung des Refabrikationsprozesses. So müssen Teilprozesse, wie die Demontage, meist manuell durchgeführt werden, da aufgrund der unterschiedlichen Korrosions- und Verschmutzungsgrade die Komponenten nur von geschultem Personal für eine Aufarbeitung oder Verwertung eingeschätzt werden können [2]. Ein weiterer wichtiger Faktor für einen effizienten Refabrikationsprozess ist das Produktdesign. Denn neben der Materialauswahl gehören die gewählten Verbindungsmethoden und die Zugänglichkeit der Komponenten zu den größten Hinderungsgründe und legen somit auf der technischen Ebene fest, in welchem Umfang die Produkte aufgearbeitet werden können [7, 8]. Allerdings steht in der Entwicklung von neuen Produkten eine kreislaufgerechte Produktgestaltung meist einer Gestaltung zur Erreichung einer möglichst günstigen Produktion gegenüber.
Im Allgemeinen kann man in der Branche zwischen drei refabrizierenden Akteuren unterscheiden. Diese sind zum einen die Originalgerätehersteller (Original Equipment Manufacturer - OEM), die vertragsgebundenen (Contracted Remanufacturer – CR) und die unabhängigen Refabrizierer (Independent Remanufacturer - IR) [2].
Während die Originalgerätehersteller über sämtliche Informationen bezüglich des Produkts und Herstellungsprozesses verfügen und diese auch den vertragsgebundenen Refabrizierern zur Verfügung stellen, haben die unabhängigen Unternehmen nur sehr beschränkten Zugang zu diesen Informationen und müssen selbstständig über zeitaufwendige Verfahren erneut das notwendige Prozesswissen für eine erfolgreiche Refabrikation generieren [9, 10]. Dennoch besteht zurzeit die Mehrheit in Europa aus unabhängigen Refabrizierern [2].
Da ein refabrikationsfreundliches Design allen Akteuren ökonomisch nützt, die Kosten aber allein den Hersteller treffen und dieser die eigenen Produkte nicht selbst refabriziert, besteht von Seiten der OEMs kein Interesse, die Aufarbeitbarkeit ihrer eigenen Produkte zu erhöhen oder die unabhängigen Refabrizierer zu unterstützen [6, 11].
Daher ist ein Bedarf an neuen nachhaltigen Geschäftsmodellen vorhanden, durch welche Unternehmen einen Mehrwert aus der Umsetzung einer Refabrikation ihrer Produkte erhalten.
Ein vielversprechender Ansatz zur Lösung dieser Herausforderungen könnten Industrie 4.0 Technologien, wie das Internet of Things, digitale Zwillinge oder cloudbasierte Systeme sein. Diese werden derzeit jedoch häufig nur im Kontext der Produktion behandelt.

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3 Literaturrecherche

Das Ziel von Industrie 4.0 ist die Digitalisierung und Vernetzung der Produktion und der Wertschöpfungsketten. Damit sollen die Daten aus unterschiedlichen Phasen des Produktlebenszyklus unternehmensübergreifend verfügbar gemacht werden.
Hierzu muss eine vollständige virtuelle Beschreibung von Produkten oder Dienstleistungen vorhanden sein [12]. Ein wichtiger Bestandteil zur Erreichung dieses Ziels sind sogenannte „intelligente Produkte“. Denn intelligente Produkte können heutzutage nicht nur ihre Identität mitteilen, sondern sind in der Lage, Eigenschaften, Zustände und Informationen über ihren Lebenszyklus zu übermitteln [13]. Zudem sind sie in der Lage, die Daten selber zu verarbeiten und ohne menschliches Eingreifen mit ihrer Umgebung zu kommunizieren. Dies ist möglich, da die Produkte intelligenter bzw. cyberphysisch werden und durch die immer weiter voranschreitende Sensortechnologie die Menge der gesammelten Daten stetig ansteigt. So werden im Vergleich zur Vergangenheit statt selektiver Messungen kontinuierlich die Daten erfasst. [14]
Wie zuvor erwähnt, stellen die unabhängigen Unternehmen einen Großteil der refabrizierenden Unternehmen dar, welche oftmals vor dem Problem stehen, dass nur eine unzureichende Informationsgrundlage vorhanden ist und diese erst wieder selbst generiert werden muss [9, 10].
Dies könnte durch Industrie 4.0 schon bald der Vergangenheit angehören, da hierdurch die Möglichkeit entstehen soll, die verschiedensten Produktinformationen von der Produktentwicklung bis hin zur EoL-Phase zu erzeugen, erfassen und auch diese mit allen Interessensvertretern, welche am Produktlebenszyklus beteiligt sind, auszutauschen [10].
So könnten den Refabrizierern über eine Datenverwaltungsplattform Informationen über beispielsweise Komponenten, Stücklisten aber auch Konstruktionsdaten in Form von CAD vorliegen. Daten, die durch die im Produkt integrierten Sensoren während der Produktnutzung erfasst wurden, können Aufschluss über den allgemeinen Zustand des Produkts geben, aber auch konkret auf defekte Teilkomponenten hinweisen. Hierdurch können Entscheidungen, welche den Refabrikationsprozess betreffen, vereinfacht und die Vorgänge effizienter gestaltet werden [15].

Im folgenden Kapitel werden Beispiele aus der Literatur beschrieben, welche sich mit der Beschaffung und der Sortierung von Altteilen sowie dem Einsatz in der Demontage und der Aufbereitung der Komponenten mit den Vorteilen eines durchgängigen Informationsflusses befasst haben.

3.1 Integration von durchgängigen Produktinformationen zur Beschaffung von Altteilen

Lee und Chan [16] entwickelten ein RFID-basiertes Rücknahmesystem zur Minimierung des Wertverlusts der Produkte aufgrund langer Aufbewahrungszeiträume in den Rückgabestellen.
Hierzu wurden die Menge und die Ankunftszeiten der zurückgegebenen Produkte mit Hilfe von RFID-Etiketten an den Sammelstellen verfolgt, um anhand dieser Daten einen wirtschaftlichen Transport von den Sammelstellen zu den Sammelzentren zu bestimmen.
Bo et al. [17] schlagen ein System zur Beschaffung von Altteilen vor, in welchem refabrizierende Unternehmen ihre Anforderungen an die benötigten Produkte an einen externen Logistikdienstleister weiterleiten und dieser online nach geeigneten EoL-Produktinformationen sucht.
Die Informationen werden durch den Eigentümer von EoL-Produkten bereitgestellt. Sie können in dem System nach Erreichung des Produktlebensende durch scannen des elektronischen Produktcodes online veröffentlicht werden.
Sobald der Dienstleister die passenden Informationen zu der gestellten Anfrage gefunden hat, leitet er diese an den Refabrizierer zur genaueren Überprüfung des Produkts weiter. Entsprechen die Informationen den Anforderungen des Refabrizierers, wird der Dienstleister beauftragt, die Abholung des Produkts beim Endnutzer zu organisieren.

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Im Bereich der Elektro- und Elektronik-Altgeräte entwickelten Sun et al. [18] ein System, welches durch die Verwendung einer cloudbasierten Lösung und dem Einsatz von RFID-Technologie die Verfolgung des Standortes der Altteile ermöglicht. Dieser Dienst ist in der Lage, den Status über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu verfolgen, zu verarbeiten und zu melden.
Auch Wang et al. [19, 20] schlagen ein cloudbasiertes Refabrikationssystem für Elektro- und Elektronik-Altgeräte vor, in dem der Endnutzer die Möglichkeit hat, sein Gerät nach Erreichen des Lebensendes durch das Scannen eines QR-Codes als Altteil zu definieren. Anschließend kann das Refabrikationssystem auf der Grundlage der in dem QR-Code gespeicherten Daten detaillierte Produktdaten und die dazugehörige Geräte-Historie aufrufen und diese mit dem Produkt verknüpfen.
Aufbauend auf diesen Informationen können dem Endnutzer geeignete Wiederaufbereitungsdienste angeboten werden.
In einer weiteren Arbeit von Wang und Wang [21] wird ein System zur Beschaffung von Elektro- und Elektronik-Altgeräte vorgestellt, welches auf einem digitalen Zwilling in einer Cloud-Umgebung basiert. Hierbei kann der Nutzer des Endgeräts den Status über die gesamte Lebensdauer aktualisieren. So können Änderungen wie Reparaturen, Wartungen, Aufrüstungen, aber auch die Eigentümer oder der Standort mitgeteilt werden. Sobald das Gerät seinen Dienst einstellt, kann dieser Status übermittelt und vom System ein passender Sammler oder eine Entsorgungsstelle vorgeschlagen werden.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass durch geeignete Systeme die Rückführung der Produkte nach Erreichung des Lebensendes optimiert werden kann. Dadurch ist es möglich, einen möglichen Wertverlust durch hohe Aufbewahrungszeiten oder fehlerhafte Entsorgungen zu verhindern.

3.2 Integration von durchgängigen Produktinformationen zur Bestimmung der EoL-Strategie

Klausner et al. [22] schlugen ein Informationssystem zur Produktrückgewinnung vor. Basierend auf einem im Produkt integrierten Sensor, dem sogenannten Electronic Data Log (EDL) werden die Daten, welche stark mit der Abnutzung der Komponenten korrelieren, erfasst und gespeichert. Diese Daten können nach der Rückgabe des Produkts durch das Informationssystem ausgewertet und zur Bestimmung des Wiederwendungspotenzials der Komponenten genutzt werden.
Jun et al. [23] entwickelten ein Framework im Produktlebenszyklusmanagement. Durch die Nutzung von im Produkt eingebetteten Informationsgeräten (PEID), welche die RFID-Technologie verwenden, wurden die Informationen über die gesamten Produktlebenszyklusphasen erfasst und für jede Lebensphase verschiedene Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt.
Ondemir und Gupta [24] schlagen ein Produktrücknahmesystem vor, welches die Lebenszyklusdatengewinnung durch das „Internet of Things“ realisiert. Hierbei werden mittels RFID Transponder mit eingebetteten Sensoren die Lebenszyklusinformationen erfasst. Mit Hilfe dieser Informationen kann die Restnutzungsdauer der Produkte bestimmt werden, welche als Qualitätsmaß für die EoL-Entscheidungsfindung genutzt wird.
Auch Mashhadi und Behdad [25] nutzen die Produktlebenszyklusdaten zur Bestimmung optimaler Sortierstrategien und EoL-Entscheidungen. Hierzu wird zunächst für jede Produkteinheit ein Wiederverwendungsindex abgeleitet, welcher auf der Wiederverwendbarkeit der einzelnen Komponenten, den Produktmerkmalen und den Informationen aus der Produktnutzungsphase basiert. Dieser Index wird anschließend als Qualitätsmaß zur Entscheidungsfindung genutzt. Zusätzlich wurden Clustering-Algorithmen eingesetzt, um ähnliche Produkte zu identifizieren, die den gleichen Wiederherstellungsprozess durchlaufen können.
Wang und Wang [21] beschreiben in ihrem auf einem digitalen Zwilling basierenden System auch die Verwertung der gesammelten Produktinformationen zur Entscheidungsfindung der geeigneten EoL-Strategie. Hierbei werden nach dem Transport zur Sammelstelle eine Bewertung und eine Prüfung

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

der entsorgten Elektrogeräte durchgeführt und die Ergebnisse zur Aktualisierung des digitalen Zwillings genutzt. Auf Grundlage dieser Daten können Refabrizierer die benötigten Vorgänge ohne weitere Prüfungen in die Wege leiten.

Da der unbekannte Zustand der zurückgegebenen Produkte den Refabrikationsprozess erheblich beeinflusst, ist es von entscheidender Bedeutung, die Unsicherheit in Bezug auf die Qualität der Produkte im Vorfeld zu beseitigen.
Die aufgeführten Beispiele haben gezeigt, dass durch die Nutzung der gesammelten Produktinformationen über den Produktlebenszyklus eine Einschätzung des Produktzustandes ohne eine vorherige Demontage und Begutachtung der einzelnen Komponenten durchgeführt werden kann. Dadurch kann im Vorfeld die geeignete EoL-Strategie festgelegt und die hierfür benötigten Prozessschritte geplant werden.

3.3 Integration von Produktdaten in der Demontage und der Aufbereitung

Xie et al. [26] schlagen einen cloudbasierten dienstleistungsorientierten Ansatz zur Demontageplanung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten vor, in der verschiedene Akteure über das Internet Zugang zu den Diensten der cloudbasierten Plattform erhalten. Diese können entweder einen Dienst anbieten oder anfordern. So kann der Refabrizierer Informationsdienste anfordern, um Informationen zum Produkt zu erhalten. Wenn diese Dienste gefunden wurden, stellt der entsprechende Anbieter, zum Beispiel der OEM, diese zur Verfügung. Sollte der Refabrizierer das Wissen zur Demontage eines Produktes noch nicht vorliegen haben, so kann auch eine Modellierung der Demontage oder eine Optimierung der Demontageplanung als Dienst angefordert werden.
Auch Jungbluth [27] nutzt in seinem Ansatz die Vorteile eines durchgängigen Informationsflusses bis hin zum Refabrizierer. Denn zur Bestimmung der optimalen Demontagereihenfolge wird auf die vom OEM bereitgestellten CAD-Informationen zurückgegriffen. Mit Hilfe dieser Daten wird ein Produktmodell erstellt, in welchem die Eigenschaften der Bauteile und die Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilen definiert werden. Die Beschreibung der Abhängigkeiten der Teile und Verbindungen kann anschließend als Wissensbasis genutzt werden, um nach einer optimalen Demontagereihenfolge zu suchen.
Wang und Wang [21] haben in ihrem System basierend auf einem digitalen Zwilling die Möglichkeit, eine Lebenszyklusanalyse durchzuführen. Hierbei kann das Design des Produkts auf seine Eignung für einen Recycling-, Demontage- und Wiederaufbereitungsprozess geprüft werden. Diese Ergebnisse, aber auch die Demontageschritte werden im Produktarchiv für zukünftige Wiederaufbereitungsvorgänge gespeichert und können so nach Erreichen des Lebensdauerendes aufgerufen werden.
Yang et al. [15] beschreiben eine intelligente Wiederaufbereitungszelle, welche aufbauend auf dem aktuellen Produktzustand zugeschnittene Reparaturvorgänge durchführt. Hierbei wird eine gemeinsame Datenbank verwendet, in der die Produktinformationen wie die CAD-Daten, Teilelisten oder auch Zusammenbaupläne des OEM hinterlegt sind. Ausgehend von dem Produktzustand wird anschließend für jedes Produkt ein geeigneter Reparaturvorgang auf Grundlage der OEM-Reparaturprotokolle oder anderer zugelassener Verfahren geplant.

Durch geeignete Systeme könnten die Informationslücken zwischen dem OEM und den refabrizierenden Unternehmen geschlossen werden. Dies hätte, wie die beschriebenen Arbeiten zeigen, einen enormen Vorteil für die effiziente Gestaltung der kostenintensiven Refabrikationsschritte. Allerdings ist auffällig, dass in den beschriebenen Arbeiten zur Demontage nur die Produktinformationen verwendet wurden, die während der Herstellung des Produkts erfasst wurden. Die Informationen über den aktuellen Produktzustand, wie Beschädigungen oder Verschleißerscheinungen wurden nicht berücksichtigt.

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Literaturrecherche hat gezeigt, wie der Einsatz eines durchgängigen Informationsflusses über den gesamten Produktlebenszyklus durch neuen Technologien wie dem Internet of Things, digitalen Zwillingen, die Nutzung von Cloudsystemen und den Einsatz von intelligenten Produkten zur Überwindung der Hindernisse in der Refabrikation genutzt werden kann. Damit allerdings eine Umsetzung der genannten Möglichkeiten gelingt, bedarf es eines Ansatzes, welcher alle Interessenvertreter umfasst. Daher muss es das Ziel sein, neue kreislauffähige Geschäftsmodelle zu etablieren.
Zur Erreichung dieser nachhaltigen Transformation ist es wichtig, die Wertschöpfungskette und den Lebenszyklus des Produkts ganzheitlich zu betrachten. Angefangen bei der Materialauswahl über die Produktgestaltung bis hin zu Lebenszyklusdesigns, sowie die Rückführung von Material oder Teilen in den Kreislauf. Die Digitalisierung kann hier ein Befähiger sein, um den kompletten Lebenszyklus des Produkts zu begleiten und zu optimieren.

5 Literatur

[1] World Economic Forum, „Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up across Global Supply Chains“, 2014.

[2] VDI Zentrum Ressourceneffizienz, „VDI ZRE Kurzanalyse 18: Ressourceneffizienz durch Remanufacturing – Industrielle Aufarbeitung von Altteilen“, 2017.

[3] The Ellen MacArthur Foundation, *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition.* [Online]. Verfügbar unter: https://emf.thirdlight.com/link/ip2fh05h21it-6nvypm/@/preview/1?o.

[4] David Parker, Kate Riley, Seigo Robinson, Harry Symington, Jane Tewson, Kim Jansson, Shyaam Ramkumar, David Peck, „Remanufacturing Market Study“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: http://www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/remanufacturing-market-study.pdf

[5] APSRG & APMG, „TripleWin—The Social, Economic and Environmental Case for Remanufacturing“, 2014.

[6] G. D. Hatcher, W. L. Ijomah und J. Windmill, „Design for remanufacture: a literature review and future research needs“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 19, 17-18, S. 2004–2014, 2011, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.06.019.

[7] VDI Zentrum Ressourceneffizienz, „Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands: Remanufacturing von Produkten“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/VDI-ZRE_Studie_Remanufacturing_Web_bf.pdf

[8] W. L. Ijomah, C. A. McMahon, G. P. Hammond und S. T. Newman, „Development of robust design-for-remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development“, *International Journal of Production Research*, Jg. 45, 18-19, S. 4513–4536, 2007, doi: 10.1080/00207540701450138.

[9] M. U. R. Siddiqi *et al.*, „Low cost three-dimensional virtual model construction for remanufacturing industry“, *Jnl Remanufactur*, Jg. 9, Nr. 2, S. 129–139, 2019, doi: 10.1007/s13243-018-0059-5.

[10] J. Kurilova-Palisaitiene, L. Lindkvist und E. Sundin, „Towards Facilitating Circular Product Life-Cycle Information Flow via Remanufacturing“, *Procedia CIRP*, Jg. 29, S. 780–785, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2015.02.162.

[11] S. Bernard, „Remanufacturing“, *Journal of Environmental Economics and Management*, Jg. 62, Nr. 3, S. 337–351, 2011, doi: 10.1016/j.jeem.2011.05.005.

[12] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V., „Industrie 4.0 Auf dem Weg zur smarten Fabrik - die Elektroindustrie geht voran“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zvei.org/filead-

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

min/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/november/Industrie_4.0__Auf_dem_Weg_zur_smarten_Fabrik_-_die_Elektroindustrie_geht_voran/Industrie-40-Auf-dem-Weg-zur-smarten-Fabrik-aktuell.pdf

[13] R. Schmidt, M. Möhring, R.-C. Härting, C. Reichstein, P. Neumaier und P. Jozinović, „Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results“ in *International Conference on Business Information Systems*, 2015, S. 16–27, doi: 10.1007/978-3-319-19027-3_2.

[14] M. L. Nunes, A. C. Pereira und A. C. Alves, „Smart products development approaches for Industry 4.0“, *Procedia Manufacturing*, Jg. 13, S. 1215–1222, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.035.

[15] S. Yang, A. M. R., J. Kaminski und H. Pepin, „Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing“, *Applied Sciences*, Jg. 8, Nr. 7, S. 1177, 2018, doi: 10.3390/app8071177.

[16] C. Lee und T. M. Chan, „Development of RFID-based Reverse Logistics System“, *Expert Systems with Applications*, Jg. 36, Nr. 5, S. 9299–9307, 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.12.002.

[17] Bo Xing, Wen-Jing Gao, Kimberly Battle, Fulufhelo Vincent Nelwamondo, and Tshilidzi Marwala, „e-Reverse Logistics for Remanufacture-to-Order: An Online Auction-based and Multi-Agent System Supported Solution“ in *ADVCOMP 2011, the fifth international conference on advanced engineering computing and applications in sciences*.

[18] J. Sun, Y. Li und K.-M. Chao, „A RFID-based tracking service of Waste Electrical and Electronic Equipment“ in *2013 IEEE 17th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Whistler, BC, Canada, 2013, S. 658–661, doi: 10.1109/CSCWD.2013.6581038.

[19] L. Wang, X. V. Wang, L. Gao und J. Váncza, „A cloud-based approach for WEEE remanufacturing“, *CIRP Annals*, Jg. 63, Nr. 1, S. 409–412, 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.114.

[20] X. Vincent Wang, B. N. Lopez N, W. Ijomah, L. Wang und J. Li, „A Smart Cloud-Based System for the WEEE Recovery/Recycling“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Jg. 137, Nr. 6, 2015, Art. no. 061010, doi: 10.1115/1.4030304.

[21] X. V. Wang und L. Wang, „Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0“, *International Journal of Production Research*, Jg. 57, Nr. 12, S. 3892–3902, 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1497819.

[22] M. Klausner, W. M. Grimm, C. Hendrickson und A. Horvath, „Sensor-based data recording of use conditions for product takeback“ in *1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, ISEE - 1998 (Cat. No.98CH36145)*, Oak Brook, IL, USA, 1998, S. 138–143, doi: 10.1109/ISEE.1998.675046.

[23] H.-B. Jun, J.-H. Shin, Y.-S. Kim, D. Kiritsis und P. Xirouchakis, „A framework for RFID applications in product lifecycle management“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 22, Nr. 7, S. 595–615, 2009, doi: 10.1080/09511920701501753.

[24] O. Ondemir und S. M. Gupta, „Quality management in product recovery using the Internet of Things: An optimization approach“, *Computers in Industry*, Jg. 65, Nr. 3, S. 491–504, 2014, doi: 10.1016/j.compind.2013.11.006.

[25] A. Raihanian Mashhadi und S. Behdad, „Optimal sorting policies in remanufacturing systems: Application of product life-cycle data in quality grading and end-of-use recovery“, *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 43, S. 15–24, 2017, doi: 10.1016/j.jmsy.2017.02.006.

[26] K. Xia, L. Gao, K.-M. Chao und L. Wang, „A Cloud-Based Disassembly Planning Approach towards Sustainable Management of WEEE“ in *2015 IEEE 12th International Conference on e-Business Engineering (ICEBE)*, Beijing, China, 2015, S. 203–208, doi: 10.1109/ICEBE.2015.42.

[27] J. Jungbluth, „Entwicklung eines intelligenten, robotergestützten Assistenzsystems für die Demontage industrieller Produkte“. Dissertation, Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation, Universität Luxemburg, Luxemburg, 2019.

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Virtualisierungsarchitektur für heterogene CAx-Tools im Engineering modularer Produktionssysteme

G. Hildebrandt[1], P. Habiger[2], R. Drath[3], M. Barth[4]

Zusammenfassung

Modularisierung und virtuelles Engineering sind vielversprechende Lösungsansätze zur Bewältigung aktueller Herausforderungen in der industriellen Produktion. Vor dem Hintergrund der Produktindividualisierung werden monolithische Produktionssysteme zunehmend durch flexibel konfigurierbare Anlagen ersetzt. Diese bestehen aus wiederverwendbaren und für unterschiedliche Anwendungsszenarien kombinierbaren Modulen. Als Resultat dieser Entwicklung werden die entsprechenden Module zu evolvierenden Engineering-Lösungen, deren Versionen verwaltet werden müssen. Weiterhin sollen im Modulengineering entwickelte (Simulations-)Modelle möglichst flexibel wiederverwendet werden, was sich aufgrund der großen Zahl an proprietären Entwicklungswerkzeugen (CAx-Tools) als schwierig erweist. Im Rahmen dieser Arbeit stellen die Autoren eine Architektur vor, die ein effizientes, virtuelles und modulares Engineering ermöglicht. Mit Hilfe von Virtualisierungsmethoden wird die Wiederverwendung beliebiger, heterogener Modelle und Simulationen durch die Weitergabe der zugehörigen CAx-Tools möglich. Das vorgestellte Konzept ist prototypisch umgesetzt und zeigt damit dessen Machbarkeit auf. Abschließend werden Kritikpunkte der Architektur sowie mögliche Lösungsansätze erörtert und bestehende Forschungsfragen aufgezeigt.

Stichwörter

Virtuelles Engineering, Modularisierung, Verwaltungsschale, Virtualisierung

1 Motivation und Problemstellung

Die industrielle Produktion befindet sich, bedingt durch die Nachfrageverschiebungen, inmitten eines Wandels, weg von günstigen Massenartikeln hin zu individuell zugeschnittenen Produkten. Zeitgleich verkürzen sich Produktlebenszyklen, was für immer kürzere Produktentwicklungszeiträume sorgt [1]. Beide Aspekte wirken sich auch auf die produzierenden Gewerbe und verwendeten Produktionsanlagen aus. Moderne Produktionssysteme müssen flexibel sein und sich schnell an ändernde Produkt- und Produktionsanforderungen anpassen – etwa Aufträge der Losgröße 1 [2]. Als Reaktion, auf die sich ändernden Anforderungen werden aktuell mehrere Ansätze diskutiert. Zwei vielversprechende Lösungen sind die Modularisierung und das virtuelle Engineering von Produktionsanlagen.
Unter Modularisierung wird im Anlagen- und Maschinenbau die Auftrennung komplexer Produktionsprozesse in grundlegende Funktionseinheiten verstanden. Die resultierenden Module können grundlegende Prozesse ausführen und auf Basis standardisierter Schnittstellen zu Gesamtanlagen

[1] Gary Hildebrandt, Hochschule Pforzheim, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
[2] Pascal Habiger, Hochschule Pforzheim, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
[3] Prof. Dr.-Ing. Rainer Drath, Hochschule Pforzheim, Prof. Mechatronische Systementwicklung
[4] Prof. Dr.-Ing. Mike Barth, Hochschule Pforzheim, Prof. Engineering mechatronischer Komponenten

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

kombiniert werden. Wesentliche Vorteile von Modularisierung sind somit die Wiederverwendung von Modulen in unterschiedlichen Produktionsszenarien, die Austauschbarkeit der Module und die bessere Skalierbarkeit modularer Anlagen [3]. Der zweite Ansatz, das virtuelle Engineering, beschreibt den Einsatz von simulativen/modellbasierten Methoden über den gesamten Engineeriungzyklus [4]. Dies wird durch die möglichst vollständige Digitalisierung von Engineering-Artefakten (EA), wie Simulationsmodellen, Datenblättern, Bedienungsanleitungen, Steuerungscode, Bauteilzeichnungen, 3D-Geometriemodellen und vielem mehr, ermöglicht und erleichtert [5].
Die Kombination der beiden Ansätze hat zur Folge, dass die Methoden des virtuellen Engineerings auch auf die Module angewandt werden. Durch die Wiederverwendung und Vermeidung von Neuentwicklungen werden Module zu evolvierenden Engineering-Lösungen, welche – ähnlich zu Software – in Versionen veröffentlicht und verkauft werden. Die erste verkaufsbereite Variante eines Moduls würde somit Version 1 entsprechen, die Weiterentwicklung Version 2 etc. Fehlerbehebungen, Firmware-Updates o.ä. können durch Subversionen (v1.3 oder v2.6) abgebildet werden. Auch Modulspezialisierungen könnten durch den Versionsmechanismus gehandhabt werden. Für ein Transportmodul sind Versionen wie 1.5-Schwerlast oder 1.5-Schnelltransport denkbar. Der beschriebene Mechanismus geht mit einer beachtlichen Menge an zugehörigen Daten einher, welche ebenfalls versioniert und archiviert werden müssen.

Die Umsetzung des modularen virtuellen Engineerings ist ein Teilziel des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes METHODS (**M**odular **E**ngineering **T**echniques for **H**eter**O**genous **D**iscrete **S**ystems) [6]. In Bild 1 sind die Teilziele des Projektes zur Umsetzung des Plug&Produce-Prinzips in einer heterogenen, gemischt real-virtuellen Umgebung dargestellt. Insgesamt werden innerhalb des Projektes zwei Arbeitsziele verfolgt. Arbeitsziel 1 beschäftigt sich mit der Umsetzung des modularen, heterogenen Plug&Produce für Fertigungsanlagen. Als Ausgangspunkt dienen hierfür klassische monolithische und herstellergebundene Fertigungsanlagen, welche im ersten Schritt in modulare, herstellergebundene Anlagen überführt werden sollen. Anschließend sollen die Konzepte auch auf Module anderer Hersteller übertragen werden, um ein Engineering für herstellerunabhängige, modulare Anlagen zu ermöglichen. Arbeitsziel 2 umfasst die Erarbeitung von Konzepten für ein gemischt real-virtuelles Engineering modularer Produktionsanlagen. Hierfür soll im ersten Schritt ein Konzept entwickelt werden, welches ein modulares, virtuelles Engineering ermöglicht. Basierend hierauf sollen Möglichkeiten untersucht werden, reale und virtuelle Module zu mischen. Die Kombination der beiden Arbeitsziele führt zu dem Gesamtziel eines modularen, heterogenen und gemischt real-virtuellem Engineering. Die in dieser Arbeit vorgestellte Architektur bezieht sich auf den mit einem roten Stern markierten Aspekt von AZ 2 – der Umsetzung eines modularen, virtuellen Engineerings.

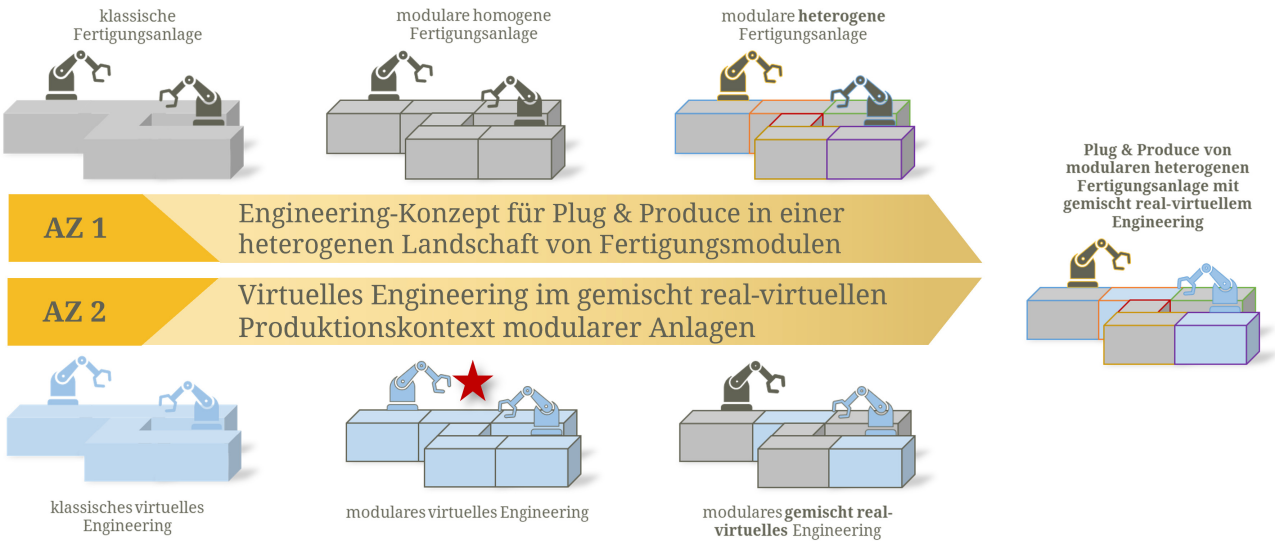


Bild 1 Gesamtzielstellung und Teilziele des METHODS-Projektes

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Wie bereits erwähnt, bedient sich das virtuelle Engineering vorwiegend simulationsbasierter Methoden, um potenzielle Engineering-Lösungen virtuell entwickeln, frühzeitig testen und validieren zu können. Im Engineering selbst sind verschiedene Domänen wie mechanisches, elektrisches und automatisierungstechnisches, sowie IT-Engineering enthalten und kombiniert. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die Domänen, unterscheiden sich auch deren Engineering-Werkzeuge (CAx-Tools), was im Laufe der Zeit zu einer Vielzahl von domänenspezifischen CAx-Tools geführt hat. Hieraus resultiert, dass verschiedene Modulhersteller eine für sich funktionierende Tool-Landschaft festgelegt haben, welche jedoch nicht zwangsläufig mit der Tool-Landschaft anderer Hersteller bzw. Kunden kompatibel ist. Während des Modulengineerings erzeugte EA, sollten bestenfalls auch im Anlagenengineering wiederverwendet werden. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Tool-Landschaften von Modulherstellern und Systemintegrator bzw. Anlagenbetreiber oft nicht möglich.

Mit Hilfe der in diesem Beitrag vorgestellten Architektur sollen daher die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

1. Wie kann ein modellbasierter Engineeringprozess für modulare Anlagen unter Berücksichtigung des evolvierenden Charakter von Engineering-Lösungen aussehen?
2. Wie kann es Systemintegratoren und Anlagenbetreibern ermöglicht werde, auf die Engineering-Artefakte von Modulherstellern zuzugreifen, ohne hierfür die CAx-Tools eines jeden Modulherstellers zu erwerben?

Zur Beantwortung dieser Fragen ist der Beitrag wie folgt aufgebaut. Kapitel 2 liefert die Grundlagen der Technologien und Konzepte, welche in der vorzustellenden Architektur verwendet werden. Kapitel 3 analysiert verwandte, relevante Arbeiten aus Wissenschaft und Industrie. In Kapitel 4 wird eine mögliche Architektur-Lösung vorgestellt und ein passendes Anwendungsbeispiel beschrieben. Eine Beschreibung der prototypischen Implementierung des Konzeptes mit den hierfür verwendeten Technologien erfolgt in Kapitel 5. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der vorgestellten Architektur, der Offenlegung noch zu klärender Fragestellungen und einem Ausblick auf folgende Arbeiten.

2 Grundlagen

Die in diesem Beitrag vorgestellte Lösung basiert auf unterschiedlichen Technologien und Konzepten, wie z. B. Virtualisierung, Informationsmodellierung und der I4.0-Verwaltungsschale, deren Grundlagen im Folgenden erläutert werden.

2.1 Virtualisierung

Die Virtualisierung beschreibt ein Konzept, bei dem zwischen zwei Schichten eines Systems eine Abstraktionsebene eingefügt wird, um eine Schicht des Systems (Hard- oder Software) nachzubilden und so der anderen Schicht notwendige Umstände vorzutäuschen [7]. Die Art der Virtualisierung ist dabei vielseitig. Für die vorliegende Arbeit sind zwei Varianten maßgeblich.

2.1.1 Hardware-Virtualisierung

Als Hardware-Virtualisierung wird ein Konzept bezeichnet, bei dem mehreren Komponenten (hier: Betriebssysteme) mit Hilfe einer Abstraktionsebene (hier: Hypervisor) vorgetäuscht wird, sie würden direkt auf benötigte Hardware zugreifen. Tatsächlich wird der Zugriff durch den Hypervisor nur vorgetäuscht und die real zur Verfügung stehenden Ressourcen je nach Bedarf auf die Komponenten aufgeteilt. Dies ermöglicht es beispielsweise mehrere Betriebssysteme auf einer Hardware zu betreiben.

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Hauptgründe für diese Art von Virtualisierung sind eine effizientere Auslastung der zugrundeliegenden Hardware und die daraus resultierende Einsparung von Ressourcen. Der Hypervisor verringert durch die Isolation verschiedener Betriebssysteme die Sicherheitsrisiken, wie etwa die Auswirkungen eines Virusbefalls. Wie in Bild 2 dargestellt, können Hypervisoren in Typ-1 und Typ-2 unterschieden werden. Bei Typ-1 Hypervisoren befindet sich die grau dargestellte Abstraktionsschicht zwischen der Hardware und dem Betriebssystem – jedes Betriebssystem befindet sich in diesem Fall auf der gleichen Hierarchieebene. Typ-2 Hypervisoren hingegen werden als Software in einem Wirt-Betriebssystem installiert und dienen als Basis für weitere zu installierende Gast-Betriebssysteme. Jedes Betriebssystem auf einem Hypervisor mit den darin enthaltenen Anwendungen und Dateien, wird als eine virtuelle Maschine (VM) bezeichnet. Die Hardware-Virtualisierung ermöglicht es, virtuelle Maschinen wie ein Datenpaket zwischen verschiedener Hardware auszutauschen und zu betreiben. [7]

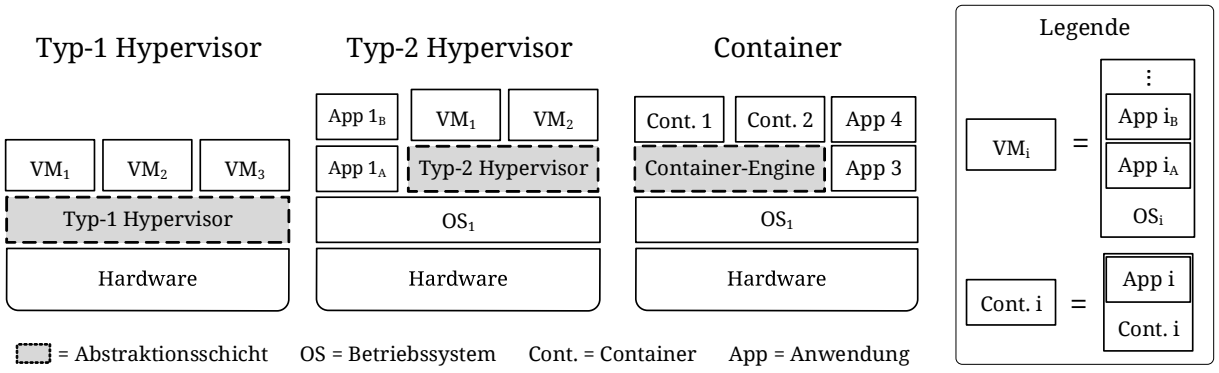


Bild 2 - Unterschiedliche Varianten der Virtualisierung

2.1.2 Betriebssystem-Virtualisierung

Im Vergleich zur Hardware-Virtualisierung findet die Betriebssystem-Virtualisierung auf einer „höheren“ Ebene im Sinne der Computerarchitektur statt. Wie in Bild 2 dargestellt abstrahiert die Betriebssystem-Virtualisierung das Betriebssystem und bildet eine Abstraktionsschicht (hier: Container-Engine) zwischen den Anwendungen und dem Betriebssystem selbst. Ein Container stellt alle notwendigen Abhängigkeiten und Bibliotheken zur Ausführung der Anwendungen bereit, benötigt so keine zusätzliche Installation im Betriebssystem und isoliert die verschiedenen Anwendungen voneinander. Damit wird die Bereitstellung von Anwendungen erleichtert. Gegenüber der Hardware-Virtualisierung bietet diese Variante den Vorteil, dass sie weniger Speicherplatz benötigt. Während eine VM meist mehrere Gigabyte an Speicher einnimmt, genügen bei einem Container teilweise schon wenige Megabyte. Zudem sind Container schneller portier- und verwendbar. Das Erstellen und Hochfahren einer VM kann mehrere Minuten in Anspruch nehmen, während es bei Containern wenige Sekunden sind. Auch eine Kombination von Hardware- und Betriebssystem-Virtualisierung ist möglich.

2.2 Konzept der Verwaltungsschale und des Assets

Einer der wesentlichen Aspekte von Industrie 4.0 ist es, sämtliche Entitäten bzw. Assets innerhalb der Produktion mit einer standardisierten digitalen Beschreibung – der Verwaltungsschale (VWS) – auszustatten. Die VWS beinhaltet oder referenziert auf die digitalen EA des repräsentierten Assets. Die EA werden in Teilmodellen geclustert, welche im Kontext der industriellen Produktion verschiedene Sichten auf die Informationen über das repräsentierte Assets darstellen. Die VWS selbst ist im Netz auffindbar und kann, mit entsprechenden Berechtigungen, nach den gewünschten Inhalten durchsucht werden. Das Konzept der VWS unterscheidet grundlegend zwischen Typen und Instanzen von Assets.

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Der Typ kann dabei als Blaupause eines Assets verstanden werden und enthält alle Eigenschaften, welche auch von allen Instanzen des Assets geteilt werden. Eine Instanz beschreibt eine konkrete und eindeutig identifizierbare Einheit eines bestimmten Typs. Entsprechend hierzu existieren somit Typ-Verwaltungsschalen und Instanz-Verwaltungsschalen [8]. Beispielsweise enthält der Typ eines Moduls bereits Informationen über die Abmaße des Moduls, erst in der Instanz können jedoch Eigenschaften wie die Seriennummer des Moduls oder die IP-Adresse der Steuerung angegeben werden. Neben den statischen Informationen können auch dynamische Daten in der VWS enthalten sein. Diese können zur Laufzeit vom Asset oder einer anderen Komponente geschrieben und/oder gelesen werden [9].

3 Relevante Arbeiten

Die Verwendung von Virtualisierungsmethoden innerhalb der industriellen Automatisierung wird bereits in verschiedenen Arbeiten aufgegriffen. So beschreiben BREIVOLD ET AL. [10] vor welchen Herausforderungen die industrielle Automatisierung aktuell und in Zukunft steht, und ob bzw. wie diese mit Hilfe der Virtualisierung gemeistert werden können. Hierbei werden Aspekte der steigenden Konnektivität und damit einhergehende Sicherheitsrisiken, voranschreitende Dezentralisierung der Automatisierungskomponenten und steigende Zahl von zu verarbeitenden Daten und Informationen genannt. Der Fokus von BREIVOLD ET AL. liegt auf der Identifikation potenzieller Anwendungsbereiche der Virtualisierung, nennt aber keine konkreten Konzepte, wie diese in den einzelnen Bereichen umgesetzt werden können. Weiterhin beziehen sich die identifizierten Herausforderungen auf die Betriebsphase der Automatisierungssysteme, jedoch nicht auf deren Engineering.
AZARMIPOUR ET AL. [11] beschreiben konkretere Konzepte zur Anwendung der Virtualisierung in der Betriebsphase und zeigen auf, dass sich mit Hilfe von Hardware-Virtualisierung viele Aspekte eines Automatisierungssystems wie die Prozessführung, das Human-Machine-Interface und die Assetverwaltung auf derselben Hardware ausführen lassen. Durch die Isolation der verschiedenen Partitionen, ist es möglich, relevante Sicherheitsaspekte zu realisieren. Hauptvorteil des dort vorgestellten Konzeptes betrifft die dynamische Allokation von Ressourcen und die Möglichkeit, kontinuierliche Updates durchzuführen, ohne den Betrieb der Automatisierungslösung zu unterbrechen [12].
Anwendungspotenziale von Virtualisierung in der Engineering-Phase werden von BREIVOLD ET AL. in [13] beschrieben. So kann mit Hilfe virtualisierter Testumgebungen eine leichtere Skalierbarkeit, erhöhte Flexibilität und einfachere Nachbildung von Fehlersituationen in Automatisierungssystemen realisiert werden. Es wird beschrieben, welche Bereiche des Engineerings durch Virtualisierung verbessert werden können, jedoch fehlt ein Konzept zur Integration derartiger Methoden in den Engineeringprozess.
Die relevanten Arbeiten fokussieren die Virtualisierung in der Betriebsphase von Systemen und zeigen Verbesserungspotenziale im Engineering auf. Es fehlen jedoch – wie in dieser Arbeit vorgestellt – Konzepte, mithilfe derer die Virtualisierung bereits im Engineering effizient eingesetzt werden kann. Daher überführt die in Abschnitt 4 vorgestellte Architektur die Konzepte der Virtualisierung aus der Betriebsphase von Automatisierungslösungen in deren Engineering und leistet so einen Beitrag dazu, dass die Virtualisierung im gesamten Systemlebenszyklus zum Einsatz kommt.

4 Virtualisierungsarchitektur

Der Kern der Arbeit ist das in Abschnitt 4.1 vorgestellte Konzept für die Umsetzung eines Engineerings mit unterschiedlichen CAx-Tools und heterogenen EA. Im darauffolgenden Abschnitt wird beispielhaft beschrieben, wie mit Hilfe der Architektur ein versionsbasiertes Modulengineering stattfinden und der Austausch von Engineering-Informationen zwischen Modulhersteller und Systemintegrator bzw. Anlagenbetreiber vereinfacht werden kann.

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4.1 Aufbau der Architektur

Die in Bild 3 schematisch dargestellte Virtualisierungsarchitektur umfasst ein Netzwerk an Modellen, Werkzeugen und lauffähigen Lösungen. Den Ausgangspunkt bildet eine Engineering-Lösung (A), welche einem Fertigungsmodul entspricht und im Kontext von Industrie 4.0 als ein Asset aufgefasst wird. Das Modul besitzt eine VWS (B), welche auf einem Server (C) lauffähig ausgeführt wird. Die VWS beinhaltet ein Informationsmodell des Moduls, welches neben allgemeinen Informationen über das Modul auch Informationen über dessen EA (E) und Referenzen zu deren Speicherorten besitzt. Jede Engineering-Lösung besitzt eine virtuelle Repräsentation (F), welche aus der Summe der EA besteht. Einige der EA, wie etwa der SPS-Steuerungscode, finden auch in der realen Engineering-Lösung Anwendung. Die EA selbst sind ebenfalls auf einem Server (G) abgelegt und sind je nach Rechteverwaltung vom Inter-/Intranet aus zugreifbar. Obwohl C und G separat abgebildet sind, kann es sich dabei um einen Server handeln. Es ist jedoch zu beachten, dass die in der VWS repräsentierten Informationen anderen Sicherheitskriterien unterliegen können, wie die EA. Beispielsweise sollte die Artikelnummer eines Moduls ohne Einschränkungen, der Schaltplan oder SPS-Steuerungscode jedoch nur mit passenden Zugriffsrechten zugänglich sein. Die EA eines Moduls werden durch eine Vielzahl proprietärer Datenformate repräsentiert, die eine ebenso große Zahl proprietärer CAx-Tools (H) benötigen, um gelesen und verarbeitet zu werden. Alle notwendigen CAx-Tools für die EA eines Moduls werden innerhalb einer VM (I) gekapselt. Diese kann entweder auf einem lokalen Rechnersystem oder innerhalb einer Cloud-Infrastruktur (J) betrieben werden. Auf diese Weise werden die proprietären EA mit einer Instanz der VM und den notwendigen Berechtigungen zugänglich. Die VM selbst erhält ähnlich wie die Engineering-Lösung ein Informationsmodell (K), auf welches von der VWS der Engineering-Lösung aus zugegriffen werden kann. Um die Engineering-Lösung und die VM bzw. die EA und CAx-Tools miteinander in Verbindung zu setzen, referenzieren sich die entsprechenden Informationsmodelle gegenseitig.

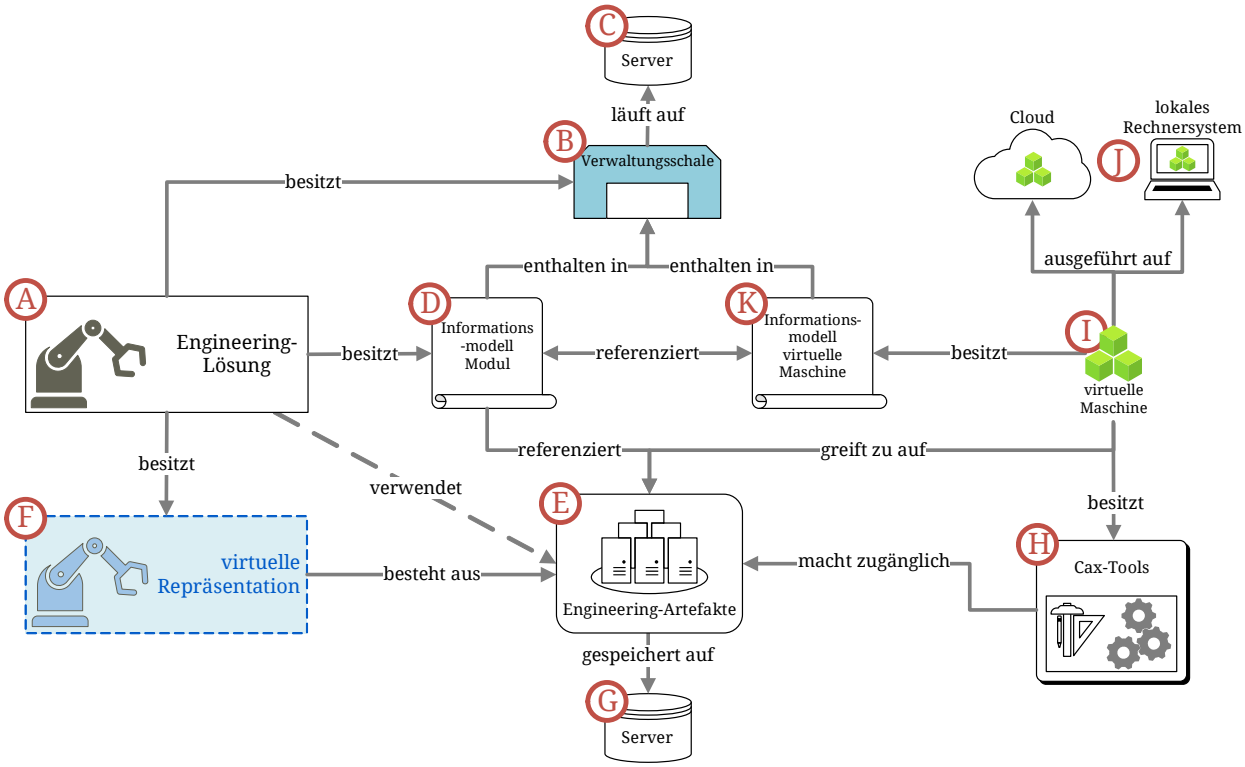


Bild 3 - Darstellung der Virtualisierungsarchitektur

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4.2 Anwendungsbeispiel der Architektur

Bei der Anwendung des Konzeptes wird zwischen dem Modul- und Anlagenengineering unterschieden. Während sich das Modulengineering auf die Entwicklung von Modulen fokussiert, also neue EA generiert oder diese weiterentwickelt, werden im Anlagenengineering Module aus einem Pool möglicher Varianten ausgewählt und für den jeweiligen Anwendungsfall konfiguriert. Das betrachtete Szenario ist in Bild 4 schematisch dargestellt.
Im Modulengineerings dient der Server (G aus Bild 3) als Engineering-Artefakt Repository für sämtliche EA des Moduls. Hier sind stets die aktuellen Versionen der verschiedenen EA abgelegt und aus dem Netzwerk zugreifbar. Die EA werden während des Modulengineerings von den Entwicklern des Modulherstellers generiert, weiterentwickelt und mit dem Server (G) synchronisiert (blaue Pfeile in Bild 4). Optimalerweise wird ein echtzeitfähiges paralleles Engineering an den EA ermöglicht und ein lokales Arbeiten vermieden. Beispiel hierfür ist die 3D-CAD-Plattform *OnShape* der Firma PTC[5]. Sollten derartige Mechanismen nicht zur Verfügung stehen, kann auch auf Ein-/Auscheckmechanismen zurückgegriffen werden. Sobald eine Modulversion bereit ist an Kunden/Betreiber vertrieben zu werden, wird eine VM erstellt, welche neben einer Kopie des aktuellen EA-Standes auch alle notwendigen CAx-Tools (in der aktuell verwendeten Version) für die Interaktion mit den EA beinhaltet. Für die Modulversion wird zusätzlich eine Typ-Verwaltungsschale erzeugt.

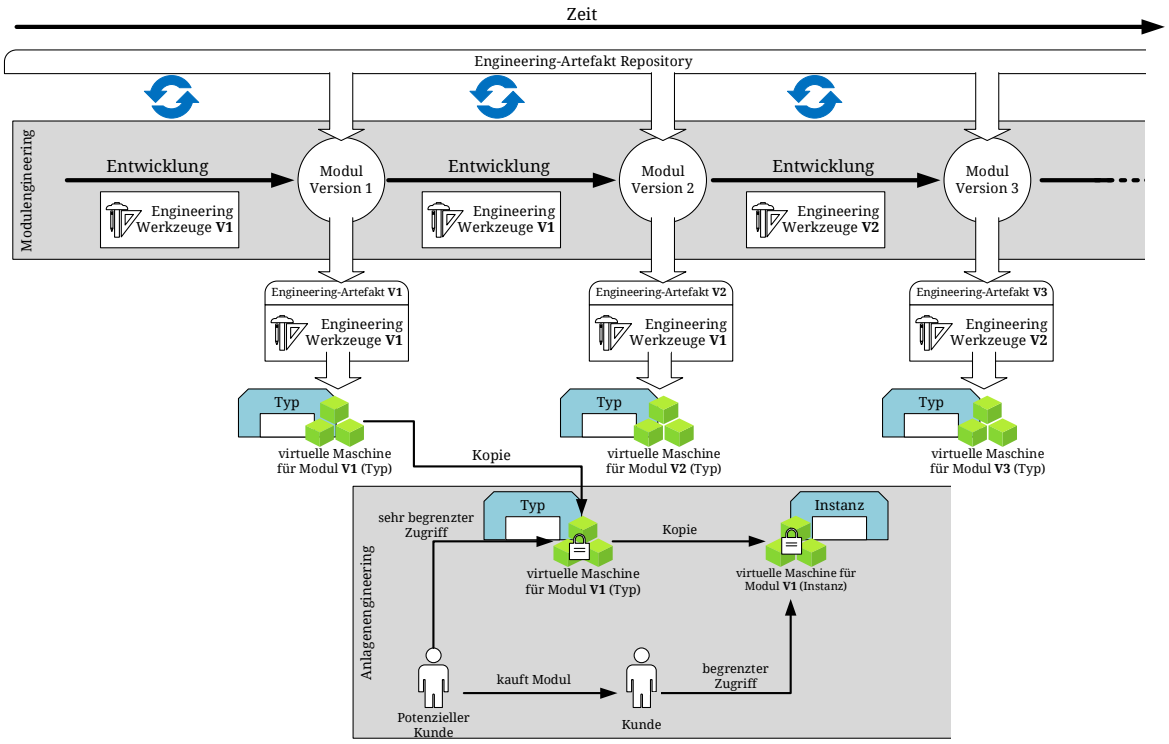


Bild 4 - Schematische Darstellung der Architekturanwendung im Modul-/ Anlagenengineering

Die VM dient als Basis für alle weiteren für diese Modulversion erzeugten Instanzen. Über die entsprechenden Informationsmodelle innerhalb der Verwaltungsschale kann ein potenzieller Kunde eines Moduls generelle Informationen über das Modul und Zugriffsmöglichkeiten auf eine VM des Modultyps erhalten. Durch eine entsprechende Verwaltung der Zugriffsrechte kann der potenzielle Kunde mit Hilfe der Tools den Modultyp in einem ersten Anlauf für seinen Anwendungsfall verifizieren und

[5] https://onshape.inneo.com/de/ueberblick.html

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

so die beste Lösung finden. Sobald sich der Kunde für den Kauf des Moduls entscheidet, kann diesem eine Kopie der VM mit erhöhten Zugriffsrechten zur Verfügung gestellt werden. So kann der Kunde bereits wenige Minuten nach dem Kauf mit der virtuellen Inbetriebnahme des Moduls beginnen. Aspekte wie Lizenzierungsmechanismen, Knowhow-Schutz und Toolhandhabung werden in Kapitel 6 diskutiert. Parallel zum Vertrieb der Modulversion 1, kann die Entwicklung des Moduls beim Modulhersteller fortgeführt werden. Auf diese Weise entsteht für jede Modulversion eine VM mit zugehörigen EA-/ und CAx-Tool-Versionen. Die Basisversion der VM kann archiviert und bei Bedarf für bspw. Servicedienstleistungen o.ä. als Grundlage für Untersuchungen verwendet werden. Alternativ kann ein Kunde dem Servicemitarbeiter des Modulherstellers Zugang auf die eigene VM gewähren.

5 Prototypische Implementierung

Im Rahmen des METHODS-Projektes entwickeln und erproben die Autoren die vorgestellte Architektur anhand einer prototypischen Implementierung. Als Engineering-Lösung wird dabei ein Grundmodul der CP-Factory (A – bezogen auf Bild 3) von der Firma Festo Didactic SE verwendet. Als Engineering-Artefakt (E) dient ein RobotStudio-Modell des Moduls. Das Modul selbst verfügt über eine VWS (B), die auf der Implementierung der Industrial Digital Twin Association e.V.[6] basiert und als Docker-Container auf einem lokalen NAS (C) ausgeführt wird. Über eine REST-API kann nun auf ein prototypisches Informationsmodell des Moduls (D) zugegriffen werden. Hierin abgelegt ist der Speicherpfad des RobotStudio-Modells und einer virtuellen Maschine (I) mit einer lauffähigen RobotStudio-Installation (H). Beide sind auf dem NAS abgelegt. Ein separates Informationsmodell für die virtuelle Maschine (K) ist im aktuellen Prototyp noch nicht implementiert.

Mit Hilfe des Prototyps können zwei Szenarien der Architektur verifiziert werden.

1. Ein für das RobotStudio-Modell verantwortlicher Modulentwickler findet mit Hilfe des Informationsmodells in der VWS einen Zugriffspunkt für eine VM mit der installierten RobotStudio-Instanz. Sobald sich der Entwickler an der VM anmeldet, wird ein Skript innerhalb der VM gestartet, welches automatisch das RobotStudio-Modell herunterlädt und in einem passenden Verzeichnis abspeichert. Das RobotStudio-Modell entspricht somit der aktuellen Version im Engineering-Artefakt Repository aus Bild 4. Alternativ kann bei Start der VM auch ein automatischer Log-In in eine cloudbasierte CAx-Umgebung stattfinden, welche ein Arbeiten ohne Herunterladen der EA ermöglicht und direkt auf das EA im Repository zugreift. Der Entwickler kann nun seine Arbeit innerhalb der VM fortsetzen. Je nach Variante wird bei Herunterfahren der VM die geänderte Version des RobotStudio Modells in das Engineering-Repository hochgeladen, oder der Entwickler aus der Cloud-Anwendung ausgeloggt.
2. Ein Kunde kann über die VWS generelle Informationen über das Modul erhalten und für eine genauere Untersuchung eine VM-Instanz des Modul-Typs herunterladen. Zugangsdaten für eine Rolle mit beschränkten Rechten sind ebenfalls in dem Informationsmodell zu finden. Alternativ kann statt einem Speicherpfad auch ein Zugriffspunkt im Informationsmodell hinterlegt sein. Auf diese Weise kann sich ein Kunde auf eine vom Modulhersteller bereitgestellte VM einwählen und die EA untersuchen.

[6] https://industrialdigitaltwin.org/

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

6 Diskussion und Ausblick

Mit Hilfe der vorgestellten Architektur ist es möglich, die Entwicklung von Modulen der Fertigungsindustrie an den Versionscharakter von Modulen anzugleichen. Weiterhin werden Interessengruppen, unabhängig ihrer verwendeten CAx-Toollandschaft, in die Lage versetzt, EA aus dem Modulengineering wiederzuverwenden.
Da es sich bei CAx-Tools meist um komplexe Software handelt, ist seitens der Kunden viel Erfahrung für den sicheren Umgang notwendig. Daher kann es für die o.g. Kunden herausfordernd sein, die unbekannten CAx-Tools zu bedienen. Obwohl mit Hilfe der vorgestellten Architektur zwar nicht mehr alle möglichen CAx-Tools bereitzuhalten sind, ist es dennoch notwendig, geschultes Personal für den Umgang mit den entsprechenden Tools einzusetzen. Allerdings muss generell zwischen dem Entwickeln und dem Konfigurieren/Bewerten einer Engineering-Lösung unterschieden werden. Innerhalb einer Domäne existieren grundlegende Ähnlichkeiten zwischen den verschiedenen CAx-Tools. So sollte es einem Domänenspezialisten möglich sein, grundlegende Aussagen über eine Engineering-Lösung auch in einem fremden CAx-Tool treffen zu können. Neben der Komplexität spielt auch die Lizenzierung der CAx-Tools eine entscheidende Rolle. Durch die Versions- und Kopiermechanismen der Architektur entsteht eine große Zahl von VM mit darauf installierten CAx-Tools, die in vielen Fällen eine kostenpflichtige Lizenzierung benötigen. Besonders statische Lizenzen können hier zu einem wirtschaftlichen Nachteil führen. Daher bietet es sich an, die CAx-Tools mit einem Pay-per-Use Lizenzmodell auszustatten. Während der Modulentwicklungs- und Angebotsphase werden die Lizenzkosten vom Modulhersteller getragen. Sobald ein Modul durch einen Kunden erworben wurde und dieser eine Kopie der entsprechenden VM erhält, gehen auch die Lizenzkosten auf den Kunden über. Die Übergabe von VM mit allen relevanten EA an Kunden kann das Knowhow des Modulherstellers offenlegen. Daher sollen zukünftig entweder umfassende Zugriffsverwaltungen der VM zum Einsatz kommen, oder die EA werden derart verschlüsselt, dass ein Reverse-Engineering nicht möglich ist.
Damit die vorgestellte Architektur Anwendung findet, werden zukünftige Informationsmodelle für Engineering-Lösungen und VM definiert und mit anderen Entwicklungen innerhalb der Plattform Industrie 4.0 abgeglichen, sodass inkompatible Insellösungen vermieden werden. Weiterhin besteht Forschungsbedarf in der Interaktion verschiedener VM, um die Simulation modularer virtueller Anlagen zu ermöglichen. In diesem Zuge müssen auch Mechanismen entwickelt werden, welche die Simulation von Produkten, die auf den Modulen gefertigt werden, in und zwischen den virtuellen Maschinen erlauben. Entsprechend den vorgestellten Projektzielen soll das virtuelle, modulare Engineering anschließend um Mixed-Reality Technologien ergänzt werden, um ein gemischt real-virtuelles Engineering, wie in [14] beschrieben, zu ermöglichen.

Danksagung

Die Arbeiten innerhalb des METHODS-Projektes werden vom Deutschen Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen (13FH511KX9) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Arbeit liegt bei den Autoren.

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Literatur

[1] H. P. Wiendahl et al., „Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals*, Jg. 56, Nr. 2, S. 783–809, 2007, doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.

[2] T. Holm, „Aufwandsbewertung im Engineering modularer Prozessanlagen“. Dissertation, InInstitut für Automatisierungstechnik, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://opus.ub.hsu-hh.de/volltexte/2016/3143/

[3] L. Urbas, S. Bleuel, T. Jäger, S. Schmitz, L. Evertz und T. Nekolla, „Automatisierung von Prozessmodulen: Von Package-Unit-Integration zu modularen Anlagen“, *atp edition*, Jg. 54, 01-02, S. 44–53, 2012, doi: 10.17560/atp.v54i01-02.203.

[4] J. Ovtcharova, „Virtual engineering: principles, methods and applications“ in *Design 2010: 11th International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia, 2010, S. 1267–1274.

[5] S. I. Shafiq, C. Sanin, E. Szczerbicki und C. Toro, „Virtual Engineering Object / Virtual Engineering Process: A specialized form of Cyber Physical System for Industrie 4.0“, *Procedia Computer Science*, Jg. 60, S. 1146–1155, 2015, doi: 10.1016/j.procs.2015.08.166.

[6] Hochschule Pforzheim, *Aktuelle Projekte am Institut für Smart Systems and Services (IOS3)*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/institut_fuer_smart_systems_und_services_ios3/aktuelle_projekte (Zugriff am: 3. Dezember 2021).

[7] P. Mandl, *Grundkurs Betriebssysteme: Architekturen, Betriebsmittelverwaltung, Synchronisation, Prozesskommunikation, Virtualisierung*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. [Online]. Verfügbar unter: http://swbplus.bsz-bw.de/bsz41643441xcov.htm

[8] Plattform Industrie 4.0, „Details Of the Administration Shell: Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0“, Plattform Industrie 4.0, Berlin, Nov. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.html. Zugriff am: 4. Oktober 2021.

[9] Plattform Industrie 4.0, „Details of the Asset Administration Shell: Part 2 - Interoperability at Runtime – Exchanging Information via Application Programming Interfaces“, Plattform Industrie 4.0, Berlin, Nov. 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part_2_V1.html. Zugriff am: 25. November 2021.

[10] H. P. Breivold, A. Jansen, K. Sandstrom und I. Crnkovic, „Virtualize for Architecture Sustainability in Industrial Automation“ in *2013 IEEE Computational Science and Engineering (CSE)*, Sydney, Australia, 2013, S. 409–415, doi: 10.1109/CSE.2013.69.

[11] M. Azarmipour, J. Grothoff, H. Elfahaam, U. Epple und C. Gries, „Hypervisor-basierte Virtualisierung in der industriellen Automation“ in *Automation 2018*, Baden-Baden, 2018, S. 467–480, doi: 10.51202/9783181023303-467.

[12] M. Azarmipour, H. Elfaham, J. Grothoff, C. von Trotha, C. Gries und U. Epple, „Dynamic Resource Management for Virtualization in *Industrial Automation“ in 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, D.C., DC, USA, 2018, S. 2878–2883, doi: 10.1109/IECON.2018.8591622.

[13] H. P. Breivold und K. Sandstrom, „Virtualize for test environment in industrial automation“ in *2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, Barcelona, Spain, 2014, S. 1–8, doi: 10.1109/ETFA.2014.7005089.

[14] G. Hildebrandt, P. Habiger und R. Drath, „Virtual-In-The-Loop-Engineering: A categorisation and terminology for modular plants and interfaces“ in *2021 IEEE 26th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, Vasteras, Sweden, 2021, S. 1–4, doi:10.1109/etfa45728.2021.9613589.

Open Access. © 2022 G. Hildebrandt, P. Habiger, R. Drath, M. Barth
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03-11.03.2022

Entwicklung und Einsatz von Codegenerierungssoftware zur Effizienzsteigerung bei der Prozessanlagenautomatisierung

Johannes Silas Detje[1], Jan-Eric Meißner[2], Alexander Stolpmann[3]

Zusammenfassung

Die Programmierung von SPS-Systemen erfolgt hauptsächlich händisch, obwohl große Teile des Programmcodes sehr ähnlich sind und sich häufig nur durch die eingesetzten Variablen unterscheiden. Der Beitrag befasst sich mit der Entwicklung und Testung einer Codegenerierungssoftware für das TIA Portal, um den Zeitaufwand der Programmierung zu reduzieren und Flüchtigkeitsfehler zu vermeiden.

Stichwörter

SPS, Codegenerierung, TIA Portal, Anlagenautomatisierung, Softwareentwicklung

1 Einleitung

Fertigungs- und Prozessanlagen sind in der heutigen Zeit größtenteils vollständig automatisiert. Jedoch ist der Weg zur Automatisierung erfahrungsgemäß bisher nicht oder kaum automatisiert. Die Programmierung der Steuerungen erfolgt fast ausschließlich von Hand, obwohl sich viele Programmteile oft mit nur kleinen Variationen wiederholen. Im Rahmen einer Masterarbeit wird eine Codegenerierungssoftware zur Verwendung mit dem TIA Portal entwickelt und getestet. Das von Siemens entwickelte TIA Portal unterstützt grafisches Programmieren mit Bausteinen [1] und erlaubt einen Zugriff auf die Objekte durch die TIA Openness Schnittstelle [2]. Realisiert wird die Codegenerierungssoftware bei Integrated Lab Solutions GmbH, einem Unternehmen, welches sich auf den Bau und die Testung von verfahrenstechnischen Anlagen im Labormaßstab spezialisiert hat [3]. Die Anlagen müssen individuell programmiert werden (STEP 7/ KOP). Jedoch werden meist Programmteile aus schon vorhandenen Projekten oder standardisierte Bausteine, für sich wiederholende Komponenten, verwendet. Ein großer Teil der Programmierarbeit besteht aus dem Kopieren von Datenbereichen und Bausteinnetzwerken und anschließendem Ersetzen der Variablenbezeichnungen. Dieses Vorgehen ist zeitintensiv und birgt Fehlerpotenzial durch falsche Eingaben. Die Anlagen besitzen eine Sicherheitslogik, welche Alarmmatrix genannt wird. Diese wird durch Strategien definiert, welche Ursachen (Auslöser) besitzen und Effekte (Interlock eines Gerätes) verursachen. Diese Strategien müssen ebenfalls zeitintensiv von Hand programmiert werden, wodurch auch hier die Gefahr einer Fehleingabe besteht. Da sie strukturiert aufgebaut sind, ist auch dort eine Automatisierung möglich und dementsprechend hilfreich. Die Codegenerierungssoftware trägt den Namen TiaHaxxor. Eine Zusammensetzung aus TIA Portal und Haxxor einem Internet-Slang für Hacker.

1 Technische Hochschule Wildau, Deutschland; Integrated Labs Solutions GmbH, Berlin
2 Integrated Labs Solutions GmbH, Berlin
3 Technische Hochschule Wildau, Deutschland

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2 Stand des Wissens

Der Ansatz einer automatisierten modularen Programmierung ist nicht neu und wurde in unterschiedlichem Umfang schon mehrfach beschrieben und/oder umgesetzt. In der Veröffentlichung von Armentia, Estevez, Orive und Marcos [4] wird eine Anlage in mechatronische Komponenten unterteilt. Eine Komponente wird in Hardware und der zugehörigen Software zerlegt. Die Modularisierung wird mithilfe von beschreibenden XML-Dateien realisiert. Dabei wird AutomationML (AML) eingesetzt, welches ein immer populärer werdender Standard ist und auch schon von Siemens und anderen Firmen verwendet und unterstützt wird. Die beschriebene Software nutzt die TIA Openness Schnittstelle. Das Hauptaugenmerk liegt jedoch in der Automatisierung der Hardware-Konfiguration. Die Veröffentlichung von Estévez, Marcos und Orive [5] beschäftigt sich mit der automatischen Generierung von Programm-Code nach dem IEC 61131-3 Software Standard. Die Arbeit von Gillert [6] beschreibt die Entwicklung eines SCL-Codegenerators für das TIA Portal. Dafür werden Vorlagen mit Platzhaltern verwendet und diese automatisch durch Werte aus einer Excel Tabelle ersetzt. Die Firmen HS Automation Software [7] und Grollmus [8] bieten kommerzielle Software an, welche die TIA Openness Schnittstelle nutzen und nach eigenen Aussagen große Teile des Engineerings automatisieren. Außerdem gibt es verschiedene Firmen, die ein eigenes Programm zur unterstützten Automatisierung nutzen, wie es bei Roske und Zanoni [9] der Fall ist. In einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2020, die verschiedene veröffentlichte Ansätze zur Codegenerierung vergleicht, wird festgestellt, dass bisher hinreichende Beweise für Vorteile wie bessere Codequalität oder Zeitersparnis fehlen. Allerdings wurden die Methoden meist nur an einem exemplarischen Beispiel von geringem Umfang getestet [10].

3 Prozessautomation mit TIA Portal

Das Totally Integrated Automation (TIA) Portal ist ein Programm von Siemens, welches verschiedene Funktionen zur Automatisierung miteinander kombiniert. Es werden die grafisch orientierten Sprachen wie Kontaktplan (KOP) und Funktionsplan (FUP), aber auch textbasierte Sprachen wie Anweisungsliste (AWL) und Structured Control Language (SCL) unterstützt. Programmcode wird durch Bausteine repräsentiert, welche jeweils ein Unterprogramm darstellen. Bausteine können immer wieder an unterschiedlichen Stellen des Programms, auch verschachtelt, eingesetzt werden [1, S. 35-37]. Bild 1 zeigt, wie das Hauptprogramm nacheinander Unterprogramme (Bausteine) aufruft und abarbeitet. Organisationsbausteine (OB) werden vom Betriebssystem aufgerufen und bestimmen den Ablauf des Programms. Funktionen (FC) sind Bausteine ohne eigenen Speicher. Bei Aufruf werden Parameter von dem aufrufenden Baustein übergeben und anschließend in Form von Rückgabewerten zurückgegeben. Innerhalb von FCs kann auf globale Datenbausteine zugegriffen werden. Funktionsbausteine (FB) sind wie Funktionen, nur dass sie einen zugehörigen Instanz-DB besitzen und daher Daten zwischen

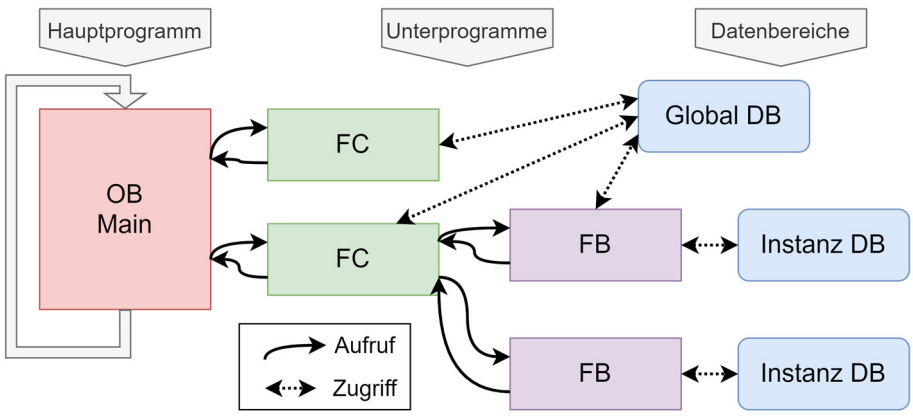


Bild 1: TIA Portal Bausteinaufrufe und Datenbereichszugriffe [Eigene Darstellung]

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Aufrufen speichern können. Globale Datenbausteine (DB) sind Bausteine, die nur Variablen speichern. Auf die gespeicherten Daten kann von jedem anderen Baustein durch eine absolute oder eine symbolische Adresse zugegriffen werden [1, S. 39-42].
Zusätzlich gibt es sogenannte Technologieobjekte, wie PID-Regler, Motorsteuerungen oder Zählerfunktionen. Diese werden separat konfiguriert, aber wie normale Bausteine eingefügt. Der Speicherbereich des Technologieobjektes entspricht prinzipiell einem Instanz-DB [11].

3.1 TIA Portal Openness (API)

TIA Portal Openness ist im Lieferumfang von STEP 7 im TIA Portal enthalten [2, S. 4]. Openness ist eine API-Schnittstelle, über die auf das TIA Portal zugegriffen werden kann und eine Möglichkeit bietet das Engineering zu automatisieren. Die Openness API ermöglicht den Zugriff auf Portaldaten, Projektdaten, PLC-Daten und HMI-Daten. Die Openness API steht über zwei DLLs zur Verfügung. Diese basieren auf dem .NET Framework 4.6.1 [2, S. 7]. Da die API auf dem .NET Framework basiert, kann eine eigene Applikation mit einer beliebigen .NET Sprache, wie C# oder Visual Basic .NET, programmiert werden. Über die Schnittstelle kann nicht direkt in einer der Programmiersprachen (AWL, KOP, FUP, SCL) programmiert werden. Jedoch können fast alle Objekte im XML-Format exportiert und importiert werden. Für den Export eines Bausteins, muss er konsistent übersetzt sein. Für den Import ist eine Konsistenz nicht nötig. Existiert ein Baustein mit demselben Namen, wird er entweder nicht importiert oder beim Import überschrieben [12].
Das XML-Format der Bausteine entspricht einem proprietären Format von Siemens. Für eine Bearbeitung muss es entsprechend interpretiert werden.

3.2 Projektbearbeitung bei ILS

Automatisierungsprojekte werden bei Integrated Lab Solutions (ILS) in verschiedenen Phasen bearbeitet. Die wichtigste Phase ist das Pre-Programming. In diesem wird das SPS-Programm geschrieben und die Bedienoberfläche gestaltet. Zuvor wird eine IO-Liste erstellt.
Die IO-Liste ist bei ILS das wichtigste Mittel zur Planung und zur Kommunikation mit dem E-Zulieferer, welcher den Schaltschrank baut. Die Liste ist eine Excel-Tabelle in der alle Geräte/Komponenten der Anlage gelistet sind. Jeder Eintrag besteht aus Tagbezeichnung, Beschreibung und weiteren Angaben. Zusätzlich zur IO-Liste gibt es die Alarmmatrix, die Sicherheitslogik kommuniziert. Die bei ILS verwendete Alarmmatrix besteht aus Tabellen (Strategien), welche Ursachen und Wirkungen verknüpfen. Sie muss, wie vorgegeben, einprogrammiert werden. Jede Strategie besitzt ein Alarmlevel. Es gibt vier Alarmlevel mit unterschiedlicher Wichtigkeit. Eine Ursache wäre beispielsweise eine zu hohe Temperatur an einem Messelement. Die entsprechende Wirkung der Strategie könnte ein Abschalten des Heizelements sein.

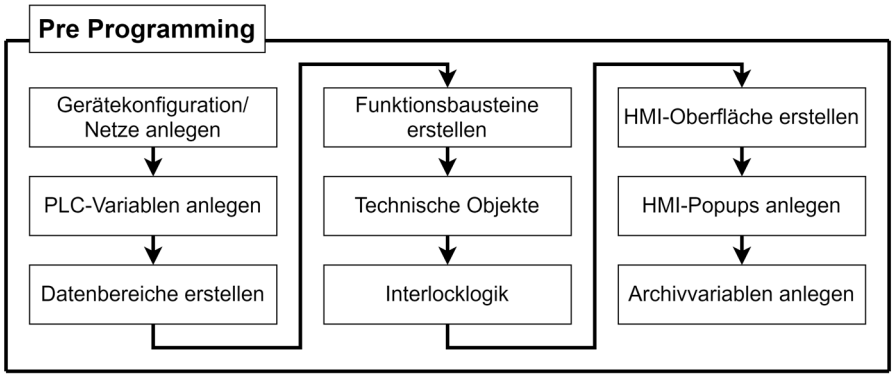


Bild 2: Bestandteile des Pre-Programming [Eigene Darstellung]

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

In Bild 2 sind die Bestandteile des Pre-Programmings gezeigt. Beim Beginn der Programmierung wird zunächst die Gerätekonfiguration erstellt. Dazu gehört der Aufbau der Geräte und ihrer Baugruppen. Bei ILS wird dazu das TIA Selection Tool verwendet. Der davon generierte Export wird in das TIA Portal geladen. Es werden weitere Einstellungen vorgenommen und ggf. Profibus- oder Profinet-Geräte hinzugefügt. Anschließend werden die PLC-Variablen angelegt. Danach werden die Datenbereiche der verschiedenen Module und die Netzwerke der Module in OBs oder FBs erstellt. In diesen Netzwerken werden die Daten verarbeitet, bereitgestellt und die Steuerung des Moduls programmiert. Dafür werden meist erprobte eigene Bausteine verwendet. Sofern benötigt, werden technische Objekte erstellt und konfiguriert. Es ist bei ILS etabliert die Programmiersprache KOP zu verwenden. In Ausnahmefällen werden SCL-Netzwerke eingesetzt. Anschließend wird die HMI-Oberfläche programmiert. Der TiaHaxxor zielt darauf ab, die Schritte PLC-Variablen anlegen (und adressieren), Datenbereiche, Funktionsbausteine und Technische Objekte erstellen, zu teilautomatisieren.

4 Softwareentwicklung

Nachfolgend wird der Aufbau und die allgemeine Funktionsweise des Programms erklärt. Die tatsächliche Implementierung muss daraus abgeleitet werden.

4.1 Programmaufbau

Der TiaHaxxor besitzt eine Hauptklasse, welche den Ablauf und die Funktionen koordiniert. Die Bedienoberfläche kommuniziert mit dieser Hauptklasse. Die Kommunikation mit der TIA Openness Schnittstelle wird durch die Klasse TIAProvider realisiert. Der Bediener legt Vorlagen an, die in der Vorlagenbibliothek gespeichert werden. In den Projektinformationen wird das Projekt konfiguriert und gespeichert. Dazu gehören Variablentabellen, die jeweils mit einer Modulvorlage aus der Vorlagenbibliothek verbunden sind, und die Interlocklogik, welche eine übergeordnete Logik zwischen Modulen implementiert. Die Klassen sind in Bild 3 zu sehen.

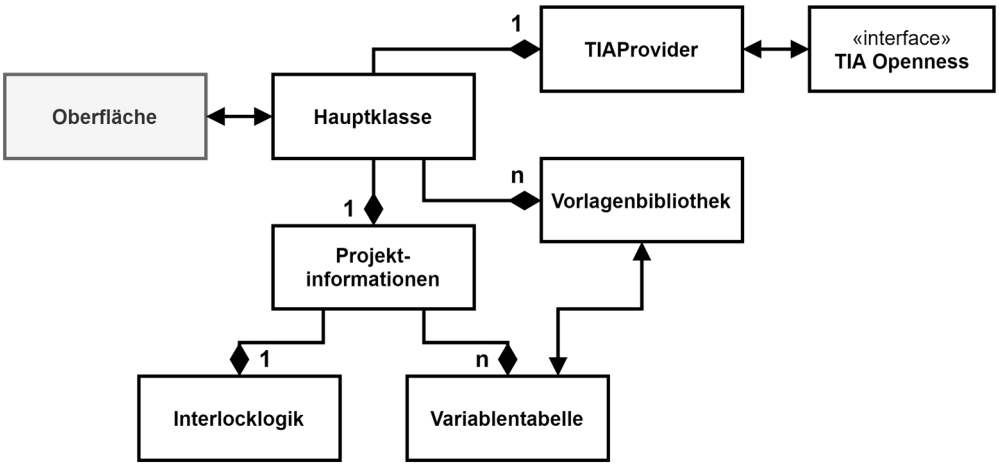


Bild 3: Allgemeiner Aufbau des Programmes [Eigene Darstellung]

4.2 Vorlagenbibliothek

Die Vorlagenbibliothek wird durch eine bestimmte Datenstruktur definiert (Bild 4). Das oberste Element ist die Vorlagenbibliothek. Diese besteht aus einer Liste aller Modulvorlagen und einer Liste aller

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

möglichen Platzhalter. Eine Modulvorlage besteht wiederum aus einer Sammlung von Bausteinvorlagen. Jede Bausteinvorlage entspricht einem aus dem TIA Portal exportierten Baustein (mit wenigen Ausnahmen). Die Vorlage enthält einen Namen, den Name des Zielbausteins, den Dateipfad des exportierten Bausteins, den Typ der Vorlage und eine Liste alle Platzhalter, die in der Vorlage gefunden wurden.
Zur Erstellung einer Modulvorlage legt der Nutzer im TIA Portal Bausteine mit dem gewünschten Code an. An den Stellen, die dynamisch geändert werden sollen, trägt er Platzhaltervariablen ein. Dies vollzieht er für alle Bausteine, die zu einem Modul gehören (DB, FB, etc.). Anschließend legt er in der Vorlagenbibliothek eine neue Modulvorlage an und wählt mithilfe eines Dialoges die vorbereiteten Bausteine aus. Diese werden nachfolgend exportiert und in der Vorlagenbibliothek gespeichert. In manchen Fällen gibt der Nutzer noch zusätzliche Information für die Bausteinvorlage an, wie z.B. den Namen des Bausteins, der später generiert wird.

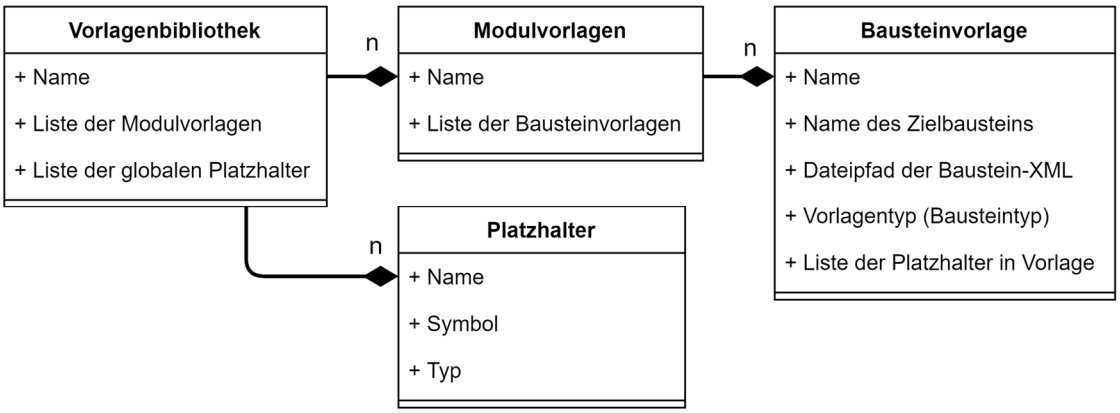


Bild 4: Struktur der Vorlagenbibliothek [Eigene Darstellung]

4.3 Platzhalter-Typen

Im Kompilierungsprozess werden Platzhalter durch die entsprechenden Werte ersetzt. Es gibt verschiedene Typen von Platzhaltern. In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Typen gelistet. Grundsätzlich würde der TiaHaxxor keine Platzhalter-Typen benötigen. Die Typen dienen der besseren Bedienung, weil sie die Eingaben des Benutzers limitieren und so das Fehlerrisiko minimieren. Der Typ *Main* ist für das Haupttag. Es muss einen Platzhalter des Typen Main geben. Der Typ *InnerRef* ist für Platzhalter, die durch eine Referenz auf ein Haupttag ersetzt werden müssen. In diesem Fall ein Haupttag derselben Modulvorlage. Der Typ *CrossRef* ist ähnlich mit dem Unterschied, dass die Referenz auf ein Haupttag einer anderen Modulvorlage erfolgt.

Tabelle 1: Platzhalter

Platzhalter Typen	**Beschreibung**
Default	Ohne Einschränkungen. Wenn es gefunden wird, dann wird es durch Wert ersetzt.
Main	Typ für Haupttag; nur ein Haupttag gleichzeitig erlaubt
InnerRef	Referenz auf ein Haupttag derselben Modulvorlage
CrossRef	Referenz auf ein Haupttag einer anderen Modulvorlage
Boolean	Wert darf nur *True* oder *False* sein
Comment	Für Kommentare; darf nur in Beschreibungen, Titel und Kommentaren vorkommen.

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4.4 Interlocklogik

Auf Grundlage der Alarmmatrix wird die Interlocklogik vom TiaHaxxor in das Steuerungsprogramm implementiert. Dabei wird die übliche Struktur der Programmierung beibehalten und nur automatisch die entscheidenden Elemente eingefügt. Dafür muss die Interlocklogik im TiaHaxxor definiert werden. Der Bediener gibt die Strategien in einer Maske ein oder er nutzt eine Erweiterung, die eine XML-Datei aus der Alarmmatrix-Excel-Tabelle erstellt. Die automatische Interlocklogik kann nur für einen Interlock verwendet werden, der mithilfe eines Bits gesetzt wird. Komplizierte Wirkungen müssen nachträglich von Hand programmiert werden. In der Vorlage wird an einer Position eine Markierung, in Form eines Kontaktes, mit der Beschriftung „[InterlockTag]“ eingefügt. An dieser Stelle werden vom Programm automatisch auslösenden Strategien eingefügt, die dann das Interlockbit des Moduls setzen. Der Unterschied zu einem Platzhalter besteht darin, dass die Variable nicht geändert wird, sondern an der Stelle weitere Elemente eingefügt werden. Ob eine Strategie ausgelöst wird, wird in einem Alarmlevelbaustein definiert. Dort werden alle Ursachen verknüpft und steuern, ob die Strategie aktiv ist. Die Markierung heißt dort „[CauseTag]“. Ursachen sind (Alarm-)Zustände von Modulen. Da die Benennung der Datenbereiche einer gewissen Struktur folgt, kann die Variablenadresse der Ursache generiert werden.

4.5 Kompilierung

Unter Kompilieren versteht sich in diesem Kontext, dass Zusammenfassen der Informationen aus Vorlagen, Variablentabellen und Interlocklogik und dem Erstellen der Bausteine für das TIA Portal. Die Kompilierung besteht aus mehreren Schritten. Essenziell ist dabei die Erstellung eines Kompilierungsrezeptes. Es wird zunächst erstellt und besteht aus Schritten, welche anschließend nacheinander interpretiert und abgearbeitet werden.

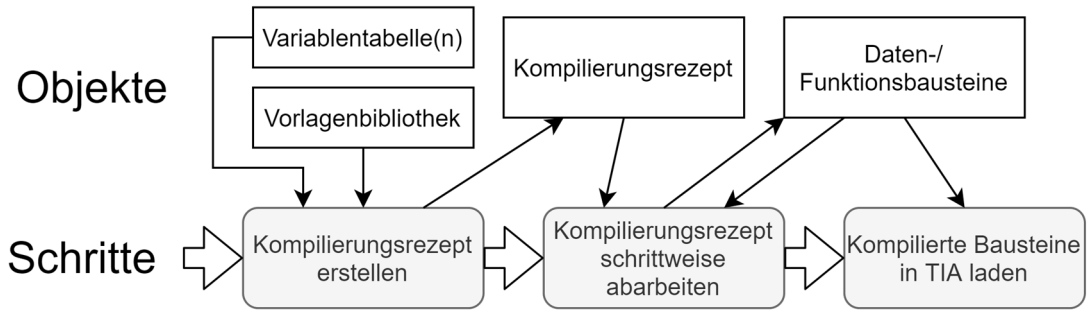


Bild 5: Ablauf Kompilierung [Eigene Darstellung]

In Bild 5 ist der Ablauf der Kompilierung schematisch dargestellt. Unten befinden sich die Schritte, oben die Objekte, mit welchen der Schritt interagiert. Als Ausgangsobjekte existieren Variablentabellen, also Tabellen in der die Modultags, Kommentare, Adressen und Kreuzreferenzen eingetragen sind und die Vorlagenbibliothek, in der sich die Vorlagen mit Platzhaltertags befinden. Aus diesen beiden Objekten wird das Kompilierungsrezept erstellt. Jeder Schritt des Rezeptes enthält dabei eine Bausteinvorlage und die Anweisung, wie sie manipuliert werden soll; also die Bezeichnung der Platzhalter und die Werte, mit welchen sie zu ersetzen sind, aber auch die Informationen, welche Elemente wo eingefügt werden sollen. Das Rezept wird vom Hauptprogramm erstellt. Im nächsten Schritt wird das Rezept vom TIAProvider interpretiert und schrittweise abgearbeitet. Dabei werden Daten- und Funktionsbausteine erstellt und bearbeitet. Wenn ein Template als Ziel einen Baustein hat, der schon durch einen anderen Schritt erstellt wurde, dann wird dieser wieder geladen und erweitert. Sind alle Schritte des Kompilierungsrezeptes abgearbeitet, dann werden alle erstellten Bausteine in das TIA Portal geladen.

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4.6 Benutzeroberfläche

Bei dem Design der Benutzeroberfläche ist es wichtig die Erwartungshaltung des Nutzers zu beachten. Dieser kennt schon zahlreiche andere Programme und erwartet einen ähnlichen Aufbau und ordnet die Funktionalität entsprechend ein. Gerade bei Einsatz einer Menüleiste ist die in Anwendungen geläufige Strukturierung zu beachten.
Prinzipiell besteht die Anwendung aus einem Hauptfenster und verschiedenen Nebenfenstern zum Konfigurieren der Modulvorlagen und der Interlocklogik. Dazu kommen verschiedene kleinere Dialoge. In Bild 6 ist das Hauptfenster zu sehen. Dieses öffnet sich, wenn der TiaHaxxor ausgeführt wird. Das Schließen des Fensters beendet das Programm.

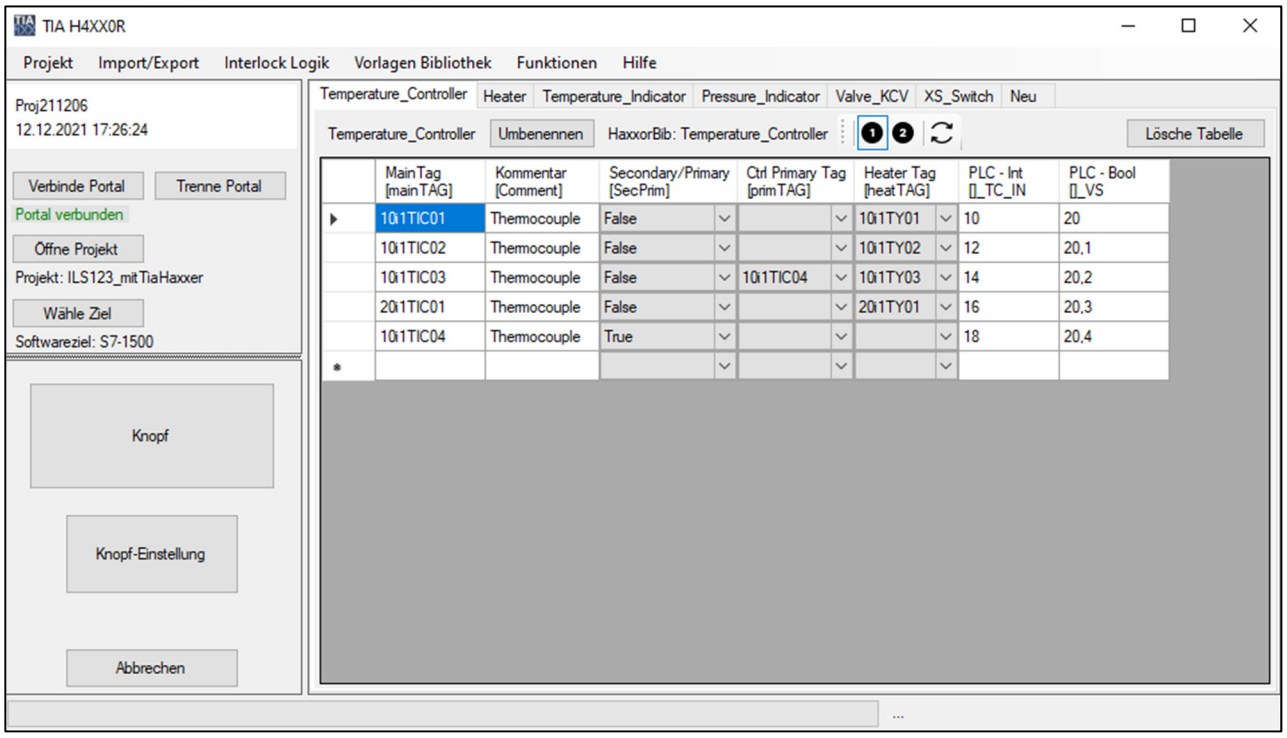


Bild 6: Hauptfenster des TiaHaxxors [Eigene Darstellung]

Das Fenster besitzt oben eine Menüleiste, über die verschiedene Funktionen abgerufen werden können. Im linken oberen Bereich befinden sich Schaltflächen, um die Anwendung mit dem TIA Portal zu verbinden und wieder zu trennen. Darunter befinden sich Statusanzeigen und Meldungen zur aktuellen Verbindung und dem aktuellen Softwareziel. Im linken unteren Bereich befinden sich drei Schaltflächen. Die große Schaltfläche namens „Knopf“ startet die Kompilierung und das Einfügen des Codes ins Portal. Die Benennung der Schaltfläche wird gewählt, weil lustige Bezeichnungen sehr einprägsam sein können und es eine Anspielung auf das Klischee ist, dass Programmierer bzw. Automatisierer für die Programmierung nur auf „ein paar Knöpfe drücken“ müssen. Über die Schaltfläche „Knopf-Einstellungen“ wird konfiguriert, welche Tabellen kompiliert und geladen werden sollen. Darunter befindet sich eine Schaltfläche zum Abbrechen des Kompilierungsvorgangs. Unten im Fenster befindet sich eine Fortschrittsleiste, die den aktuellen Fortschritt bei der Kompilierung anzeigt.
Im rechten Teil des Fensters befindet sich eine Tab-Leiste, mit der unterschiedliche Variablentabellen aufgerufen werden können. In der Variablentabelle werden alle Variablen (Tagbezeichnungen) eines Moduls eingetragen, welche später die Platzhalter ersetzen werden.
Das Fenster der Vorlagenbibliothek wird über den entsprechenden Menüeintrag aufgerufen. In Bild 7 ist das Fenster dargestellt. Das Fenster besteht aus drei Bereichen. Im rechten Bereich befindet sich die „Blank Tag Masterliste“, also die Liste aller verwendbaren Platzhalter mit ihren Namen und Typen.

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Diese kann durch drei Schaltflächen „Neu“, „Bearbeite“ und „Lösche“ bearbeitet und erweitert werden. Zu Bearbeitung wird ein kleines Dialogfenster eingeblendet. Dort werden das Symbol (die Zeichenfolge des Platzhalters) und der Name des Blanktags angeben. Für den Typ steht eine Kombobox zu Verfügung. Der Typ limitiert die später zulässigen Werte in der Variablentabelle und spezifiziert ihre Verarbeitung.

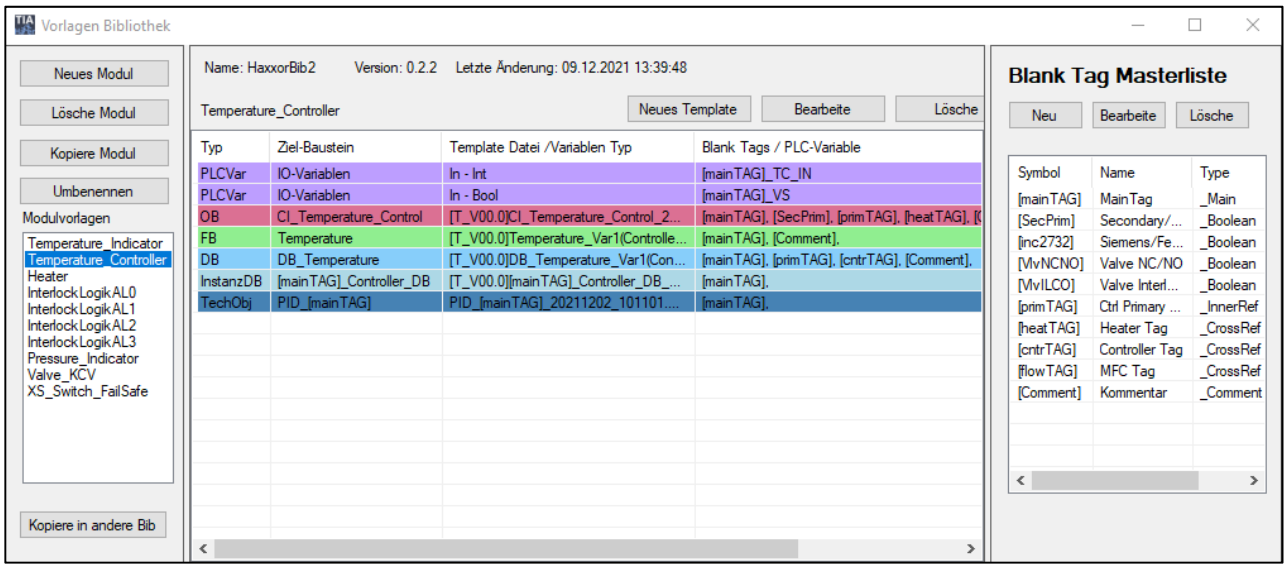


Bild 7: Fenster Vorlagenbibliothek [Eigene Darstellung]

Im linken Bereich befindet sich eine Liste mit allen Modulvorlagen. Darüber befinden sich wieder Schaltflächen zur Bearbeitung. Wird in der Liste eine Modulvorlage ausgewählt, wird diese im mittleren Bereich geöffnet und die zugehörigen Bausteinvorlagen angezeigt. Oben im mittleren Bereich stehen der Name der Vorlagenbibliothek, die Versionsnummer und das Datum der letzten Änderung. Mit den Schaltflächen „Neues Template“, „Bearbeite“ und „Lösche“ können Bausteinvorlagen erstellt und verwaltet werden. In der unteren Tabelle werden sie angezeigt.
Wird eine neue Bausteinvorlage erstellt, dann ist eine Verbindung zum TIA Portal zwingend notwendig. Es öffnet sich ein Dialogfenster in welchem ein TIA Portal-Objekt ausgewählt werden kann. Es stehen alle Bausteine, Geräte und PLC-Variablen zur Auswahl. Das dort ausgewählte Objekt dient als neue Vorlage und wird aus dem TIA Portal exportiert. Anschließend öffnet sich ein Dialogfenster der Vorlage. In ihm wird der Typ der Vorlage und gefundene Platzhalter angezeigt. Es kann ein vom ursprünglichen Namen abweichender Name für den Zielbaustein eingegeben werden.

5 Einsatz und Test

Um den Nutzen des TiaHaxxors zu bewerten, wird die Zeitersparnis an einem pseudorealen Projekt, genannt ILS123, gemessen. Dafür wird das Projekt einmal ohne und einmal mit TiaHaxxor teilweise umgesetzt. Das Projekt ist einem echten Projekt entlehnt, wurde aber hinsichtlich des Umfangs und der Funktionalität verändert.

5.1 Testszenario

In dem Testszenario sind keine Neuentwicklungen nötig und alle Komponenten sind bekannt und standardisiert. Die Programmierung einer Benutzeroberfläche (HMI) wird völlig vernachlässigt. Das Projekt ILS123 besteht aus: 24 Massendurchflussregler; 4 ESD-Schalter; 9 Türschalter; 11 Heizkreise

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

bestehend aus Regler, Heizung und 2 Thermoelementen; 29 Ventile; 11 Sicherungskontakte; 10 Temperaturmessern; 3 Druckmessern und diversen anderen Komponenten. Die Komponenten sind in einer IO-Liste festgehalten. In dieser stehen Tagbezeichnung und verwendete Eingänge bzw. Schnittstelle. Die Adressen der PLC-Variablen sind vorab definiert. Zusätzlich wird die Alarmmatrix implementiert. Auch diese wurde dem realen Projekt entlehnt, stellenweise aber verändert. Sie besteht aus 16 Strategien mit unterschiedlichem Umfang (durchschnittlich 4 Ursachen und 2 Wirkungen). Die Effekte bestehen aus den Standard-Interlockeffekten. Es gibt keine besonderen Strategien, die eine erweiterte Programmierarbeit erfordern. Für die händische Programmierung wird das bei ILS übliche Vorgehen genutzt. Bei der Programmierung mit dem TiaHaxxor werden alle zur Verfügung stehenden Möglichkeiten genutzt. Die benötigten Modulvorlagen sind vorab konfiguriert und einsatzbereit. Eine Abschätzung der Projektprogrammierung ergibt, dass der Test ungefähr 45 Prozent der vollständigen Projektprogrammierung umfasst.

5.2 Auswertung

In Tabelle 2 sind die Zeiten der Programmierung aufgetragen. Es wurde zwischen der normalen Programmierung und der Implementierung der Interlocklogik unterschieden. Von Hand dauert die gesamte Programmierung 8 Stunden, mit dem TiaHaxxor 2,5 Stunden. Das ergibt eine Zeitersparnis von 5,5 Stunden.

Tabelle 2: Zeiten Testprojekt

	Programmieren von Hand	**Programmieren mit TiaHaxxor**	**Differenz**
Bausteine	07 h 1 min	2 h 11 min	4 h 50 min
Interlocklogik	01 h 3 min	20 min	43 min
Gesamt	8 h 4 min	2 h 31 min	5 h 33 min

Die Programmierung von Hand ist ermüdend und repetitiv. Es treten immer wieder Flüchtigkeitsfehler auf, sodass manche Bausteine ein zweites Mal überarbeitet werden müssen. Auch fällt die Kommentierung der Netzwerke teilweise recht spärlich aus. Die Programmierung mit dem TiaHaxxor ist weniger wiederholend. Variableninformation müssen nur einmal angegeben werden. So minimieren sich Flüchtigkeitsfehler. Treten dennoch welche auf, sind sie leichter zu finden und zu beheben. Die Implementierung der Interlocklogik ist mit dem TiaHaxxor schneller und unkompliziert. Durch die automatische konsequente Benennung von Netzwerken und Kommentaren wird eine spätere händische Anpassung und Erweiterung der Programmierung erleichtert. Jedoch erweist sich die Bedienung des TiaHaxxors stellenweise als kompliziert. Es erfordert mehrere Anläufe bis das Projekt, in welches der Code eingefügt werden muss, dahingehend angepasst ist, dass es keine Konflikte mit den Modulvorlagen hinsichtlich der Projektsprachen und Datentypen bzw. Standardbausteinen gibt.

6 Fazit

Die Entwicklung des TiaHaxxors kann als erfolgreich gewertet werden. Die Verwendung einer Vorlagenbibliothek erweist sich als sinnvoll und praktisch. So ist die Codegenerierung nicht auf eine konkrete Anwendung beschränkt, sondern kann, im Rahmen der beschriebenen Möglichkeiten, beliebig erweitert werden. Einzig die Art der Interlocklogik ist beschränkt auf das beschriebene Konzept, könnte aber in Zukunft erweitert werden. Durch die erfolgte Entwicklung von Funktionen zur unkomplizierten Manipulation von KOP-Netzwerken ist eine noch komplexere Codegenerierung in Zukunft denkbar. Die Entwicklung ist prinzipiell abgeschlossen, kann aber fortgesetzt werden. Die Oberfläche

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

besitzt noch Verbesserungspotenzial und sollte hinsichtlich Bedienbarkeit und Benutzerführung verbessert werden. Durch die Verwendung von Platzhaltertypen, können Verknüpfungen zwischen Modulen erstellt und hinsichtlich ihrer Gültigkeit geprüft werden. So können beispielsweise Kaskadenregler konfiguriert werden. Der Test am Beispielprojekt zeigt, dass eine Zeitersparnis messbar und nennenswert ist. Auch die verbesserte Codequalität ohne Flüchtigkeitsfehler hat einen großen Nutzen und trägt zur Effizienzsteigerung bei. Der TiaHaxxor wird in Zukunft bei ILS eingesetzt werden. Das Anlegen und Pflegen der Vorlagenbibliothek könnte sich als Zeitintensiv erweisen und es sollte ermittelt werden, ab welcher Projektgröße oder Projektanzahl sich die Entwicklung und das Betreiben eine Codegenerierungssoftware wirklich lohnt.

7 Literatur

[1] Siemens, *SIMATIC STEP 7 und WinCC Engineering V16 Systemhandbuch: PLC programmieren.* [Online]. Verfügbar unter: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109773506/STEP_7_WinCC_V16_deDE_de-DE.pdf (Zugriff am: 20. April 2021).

[2] Siemens, *TIA Portal Openness: Einführung und Demoanwendung.* [Online]. Verfügbar unter: https://support.industry.siemens.com/cs/document/108716692/tia-portal-openness%3A-einf%C3%BChrung-und-demoanwendung (Zugriff am: 26. April 2021).

[3] Integrated Lab Solutions, *Website | Integrated Lab Solutions* (Zugriff am: 21. September 2021).

[4] A. Armentia, E. Estevez, D. Orive und M. Marcos, „A Tool Suite for Automatic Generation of Modular Machine Automation Projects“ in *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Porto, 72018, S. 553–558, doi: 10.1109/INDIN.2018.8472085.

[5] E. Estévez, M. Marcos und D. Orive, „Automatic generation of PLC automation projects from component-based models“ (En;en), *Int J Adv Manuf Technol*, Jg. 35, 5-6, S. 527–540, 2007, doi: 10.1007/s00170-007-1127-4.

[6] A. E. Gillert, „Entwicklung eines SCL-Codegenerators für die Entwicklungsumgebung TIA Portal“. Bachelorarbeit, 2016. [Online]. Verfügbar unter: http://www.lab4inf.fh-muenster.de/lab4inf/docs/thesis/BA_Gillert_20160708.pdf

[7] HS Automation Software, *PLC Code Generator: Code Generator für das TIA Portal.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.hs-automation-software.de/plccodegenerator.php (Zugriff am: 14. April 2021).

[8] Grollmus -, *Factory Automation Studio | TIA Portal - Grollmus.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.grollmus.de/factory-automation-studio/ (Zugriff am: 21. September 2021).

[9] M. Roske und P. Zanoni, *Automatisierung von Engineering-Aufgaben bei der SPS-Programmierung im TIA Portal.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.all-electronics.de/automatisierung/automatisierung-von-engineering-aufgaben-bei-der-sps-programmierung-im-tia-portal.html (Zugriff am: 14. April 2021).

[10] H. Koziolek, A. Burger, M. Platenius-Mohr und R. Jetley, „A classification framework for automated control code generation in industrial automation“, *Journal of Systems and Software*, Jg. 166, S. 110575, 2020, doi: 10.1016/j.jss.2020.110575.

[11] Siemens, *SIMATIC STEP 7 und WinCC Engineering V16 Systemhandbuch: Technologiefunktionen einsetzen.* [Online]. Verfügbar unter: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109773506/STEP_7_WinCC_V16_deDE_de-DE.pdf (Zugriff am: 20. April 2021).

[12] Siemens, *Openness: Projekterstellung automatisieren: Online help printout.* [Online]. Verfügbar unter: https://support.industry.siemens.com/dl/dl-media/802/109773802/att_1007203/v6/131611131147/de-DE/index.html (Zugriff am: 26. April 2021).

Open Access. © 2022 **Johannes Silas Detje, Jan-Eric Meißner, Alexander Stolpmann**
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Hochschule Pforzheim, 09.03.–11.03.2022

Prozessinnovation: Selbstlernendes Assistenzsystem für die manuelle Montage

J. Jung[1], A. Hubert[2], K. Doll[3], M. Kröhn[4], J. Stadler[5]

Zusammenfassung

Manuelle Montageprozesse sind nach wie vor unverzichtbar in vielen Bereichen der produzierenden Industrie. Vor allem die Qualitätskontrolle, sowie das Einlernen neuer Mitarbeitenden stellen Betriebe durch die voranschreitende Digitalisierung vor neue Herausforderungen. Assistenzsysteme können hier helfen, die Lücke zwischen Anforderungen und Qualifikation zu überbrücken. Wir stellen einen Ansatz zur intelligenten Assistenz vor, welcher auf einer kamerabasierten Erkennung von Arbeitsabläufen mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens beruht. Das Assistenssystem erzeugt automatisiert Hilfsmaterial zur Unterstützung der Werkenden. Zusätzlich zur Darstellung der technischen Aspekte, werden psychologische Aspekte, wie Akzeptanz und Motivation untersucht.

Stichwörter

Machine Learning, Montage, Assistenzsystem, Mensch-Maschine-Schnittstelle

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Kleine und mittelständische Unternehmen aus dem produzierenden Gewerbe stehen heute vor der Aufgabe, sich durch Digitalisierung für die Zukunft aufzustellen, aber gleichzeitig und oftmals in Nischenbereichen wirtschaftlich zu bleiben. In diesem Zusammenhang stellen manuelle Montageprozesse eine besondere Herausforderung dar. Durch meist kleine Losgrößen oder komplexe Bauteile ist ein hoher Automatisierungsgrad nicht wirtschaftlich umsetzbar, sodass Werkende unentbehrlich bleiben. Allerdings werden die Montageprozesse immer komplexer, während Mitarbeitende in diesen Bereichen häufig gering qualifiziert und teilweise keine Muttersprachler sind. Daher sind Assistenzsysteme, die die Lücke zwischen Anforderungen und Qualifikation überbrücken können, ein zunehmend bedeutenderer Faktor, um Unternehmen erfolgreich zu halten. Zudem lässt sich dadurch auch ein Bruch in der Digitalisierungskette vermeiden, indem wertvolle Daten zum Fertigungsprozess erfasst werden können. Daraus ergibt sich ein Bedarf an intelligenten Montagearbeitsplätzen, die die Wirtschaftlichkeit der Prozesse des Unternehmens und die Qualifikation der Mitarbeitenden berücksichtigt. Vor diesem Hintergrund bearbeitet die Technische Hochschule Aschaffenburg gemeinsam mit den Industriepartnern Fischer Information, ROBUR Automation und weiteren Partnern das Forschungsprojekt GesInA40 (Gestenbasiertes Intelligentes Assistenzsystem) [1]. Die Partner beforschen seit 2012 das Thema Unterstützungssysteme, mit deren Hilfe Beschäftigten komplexe Montageprozesse vermittelt werden, indem sie kontextbezogene Hilfe durch das System erhalten. Aus diesen Arbeiten ist bereits ein

1 Janis Jung, TH Aschaffenburg – University of Applied Sciences, Aschaffenburg
2 Andreas Hubert, TH Aschaffenburg – University of Applied Sciences, Aschaffenburg
3 Konrad Doll, TH Aschaffenburg – University of Applied Sciences, Aschaffenburg
4 Michael Kröhn, ROBUR Automation GmbH, Niedernberg
5 Jochen Stadler, Fischer Information Technology AG, Radolfzell

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Musterarbeitsplatz hervorgegangen, an dem ein intelligentes, automatisiert lernendes Assistenzsystem einen einfachen Ablauf unterstützt. Technisch blieben dabei noch einige Themen unberührt, die im aktuellen Vorhaben bearbeitet werden.

1.2 Ziele

Im Vorhaben wird die Verbesserung des bestehenden Assistenzsystems hinsichtlich technischer Robustheit und Usability angestrebt. Hierzu wurde der vorhandene Musterarbeitsplatz (Bild 1) adaptiert, um damit unterschiedlichste Montageprozesse nachzustellen. Mit dem bestehenden Assistenzsystem können gelernte Abläufe an einem manuellen Montagearbeitsplatz beobachtet, validiert und unterstützt werden. Konkret soll die Erweiterung des Systems erlauben, neue Abläufe ohne Prozesswissen durch das Beobachten von erfahrenen Mitarbeitern einzulernen und unerfahrenen diese aufgezeichneten Beobachtungen abhängig vom Prozessschritt zur Verfügung zu stellen. Visuelle Hilfestellung werden hierzu während des Einlernens automatisiert aufgezeichnet und können bei Bedarf prozessgerecht und im Kontext des aktuellen Arbeitsschritts dargestellt werden. Eine besondere technische Herausforderung stellen Aktivitätserkennung und Handerkennung dar, weil diese den von System erfassten Montageprozess darstellen. Aktivitäten innerhalb eines Montageprozesses werden als Gesten und Bewegungen erfasst. Für eine erweiterte Abdeckung von Anwendungsfällen ist es wichtig, dass dies ohne zusätzliche Hilfsmittel, wie bspw. eingefärbte Handschuhe oder Marker, möglich ist. Andererseits sollen Handschuhe auch kein Problem für die Erkennung darstellen, da viele Assemblierungsprozesse aus Reinheitsgründen damit durchgeführt werden. Ziel ist, dass Beschäftigte ihre Arbeitsroutine weiterhin beibehalten können. Dies wird auch dadurch unterstützt, dass Informationen im Sichtfeld des Arbeitenden dargestellt werden. Hier kommt ein Beamer zum Einsatz, der automatisiert generierte Videosequenzen auf die Arbeitsfläche projiziert.

Bild 1: Musterarbeitsplatz an der Technischen Hochschule Aschaffenburg, an dem sich unterschiedliche Montageprozesse oberhalb der gesamten Tischplatte simulieren lassen. Kamera und Beamer sind überkopf montiert, Eye-Tracker auf Höhe der blauen Boxen.

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

In diesem Zusammenhang ist zu klären, welche Form der Darstellung an welcher Position auf der Arbeitsfläche am effektivsten ist. Außerdem ist wichtig, wie lange eine Information dargestellt werden soll, um die Gefahr von Reizüberflutung und Sättigung zu vermeiden. Hier kommt unter anderem ein Eyetracker zum Einsatz, der von den psychologischen Fakultäten der Universitäten Würzburg und Heidelberg verwendet wird, um diese Sachverhalte zu untersuchen. Als weitere Konsortialpartner beschäftigen diese sich mit Usability, Arbeitsmotivation und Arbeitsplatzgestaltung. Unter anderem werden Aufmerksamkeitsspannen untersucht, um die Nützlichkeit verschiedener Unterstützungselemente zu validieren. Begleitet werden diese Untersuchungen durch Kampagnen mit Mitarbeitenden der Firmen und Studierenden. Im Folgenden werden zunächst die Komponenten des Assistenzsystems, wie die verbindende Software-Architektur und die Kommunikationsflüsse, beschrieben. Dann werden die technischen Herausforderungen und Lösungen bei der Umsetzung von Hand- und Aktivitätserkennung diskutiert. Im Anschluss daran werden technische Ergebnisse sowie die Resultate aus einer Usability-Kampagne vorgestellt. Aus den Ergebnissen kann weiterer Handlungsbedarf abgeleitet werden, der in Zusammenfassung und Ausblick mit nächsten Schritten unterlegt wird.

2 Assistenzsystem

Der innovative Kern der Arbeit entwickelt sich um ein Assistenzsystem zur Unterstützung manueller Montageprozesse. Dieses System, seine Komponenten und seine Abläufe sollen zunächst betrachtet werden, um darauf aufbauend die Entwicklungsarbeiten zu diskutieren. Das Assistenzsystem besteht aus einer 3D Kamera (Intel RealSense D435) und einem Projektor, die beide überkopf am Arbeitsplatz montiert werden, sowie einem Eye-Tracker und einem Industrie-PC. Visualisierung und Konfiguration erfolgen über eine Smartphone-App. Die Systemarchitektur besteht softwareseitig aus einem Steuersystem und einem Informationssystem mit semantisch strukturierter Wissensdatenbank. Das Setup ist in Bild 2 zu sehen.

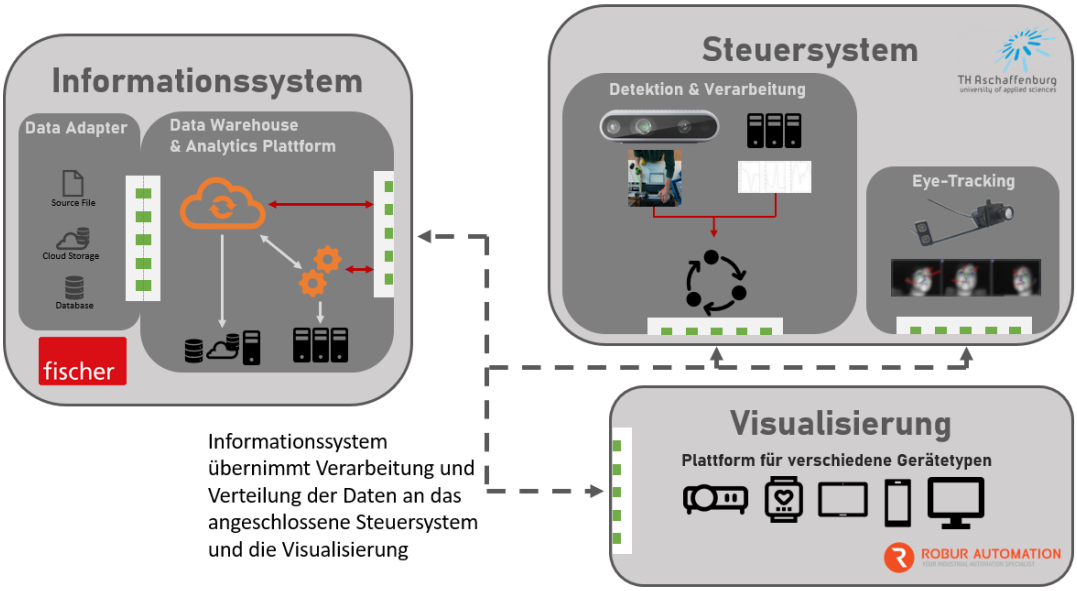


Bild 2: Schematisches Setup der Systemarchitektur und Verknüpfung der Einzelsysteme, bestehend aus Informationssystem, Steuersystem, Visualisierung.

Die 3D-Kamera ermöglicht eine Erfassung von Bild- und Tiefendaten. Zusätzlich kann ein Infrarot Bild abgerufen werden. Damit lassen sich die Bewegungen auf der Arbeitsfläche auf verschiedene Weisen auswerten. Hierzu wurden Algorithmen erprobt und verglichen, die markerbasiert (bspw. eingefärbte Handschuhe) oder markerlos eine Erkennung der Hände in unterschiedlichen Detailstufen ermöglichen und eine Umwandlung von Videostreams in Zeitreihen von Positionsdaten ermöglichen. Diese

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Zeitreihen werden weiter analysiert, um daraus Aktivitäten abzuleiten. Auf Basis dieser Aktivitäts- und Gestenerkennung, wird das System so erweitert, dass ein Arbeitsprozess durch den Einsatz von Machine Learning Verfahren selbständig belernt werden kann. Das System lernt, indem es einen erfahrenen Werkenden bei der Durchführung von unbekannten Aktivitäten beobachtet. In der Lernphase wird der Arbeitsprozess solange wiederholt, bis das System ein zuvor festgelegtes Konfidenzlevel übersteigt. In einem ersten Test hat sich gezeigt, dass ein Arbeitsprozess mit 15 Einzelschritten bereits nach 5 Wiederholungen soweit eingelernt werden kann, dass mit hoher Sicherheit alle Aktivitäten des Arbeitsprozesses korrekt erkannt werden. Während der Lernphase baut das System den Arbeitsprozess als gerichteten, azyklischen Graphen auf. Dieser Graph stellt durch Knoten (Prozesszustände) und Kanten (Aktivitäten) verschiedene mögliche Arbeitsabläufe dar. Hilfematerial wird automatisiert in Form von Videos der Handgriffe und entsprechenden Arbeitsanweisungen produziert, welche dann in situ als Augmented Reality (AR) über den Projektor bereitgestellt werden. Der passende automatisierte Zuschnitt auf die Teilschritte ist dabei für die Akzeptanz durch den Anwender ebenso wichtig, wie die Klarheit und Einfachheit der Darstellung. Wissenschaftliche Auswertungen bezüglich Mensch-Maschine-Schnittstellen werden in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Kognitive Psychologie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg und dem Psychologischen Institut der Universität Heidelberg durchgeführt. Der Eye-Tracker, der in erster Linie zur Bestimmung von Aufmerksamkeitsspannen verwendet wird, soll in diesem Zuge auch als Eingabemöglichkeit untersucht werden. Erste Tests mit dem Auslösen von Events durch Blickrichtungssteuerung, wie dem Einblenden von Hilfevideos, gestalteten sich sehr positiv. Komplettiert wird das Assistenzsystem von einer Wissensdatenbank, die die redaktionelle Pflege der automatisiert generierten Inhalte ermöglicht. Mitarbeitende der technischen Redaktion können die aufgezeichneten Abläufe Teilschritt für Teilschritt abrufen und um weitere Inhalte, wie etwa beschreibende Texte, ergänzen.

2.1 Automatisierung

Ein wesentlicher Bestandteil des Assistenzsystems ist das automatische Einlernen und Beobachten von unbekannten Prozessen. Das System durchläuft für einen unbekannten Prozess drei Betriebszustände. Im ersten Schritt wird der grundlegende Arbeitsprozess durch Beobachtung gelernt. Im zweiten Schritt wird durch wiederholte Ausführung des Arbeitsprozesses eine mögliche Variabilität trainiert, um eine höhere Robustheit gegenüber möglichen Abweichungen zu schaffen. Der dritte Schritt ist der Normalbetrieb, der Prozess wird beobachtet und kann mit der eingelernten Vorlage abgeglichen werden.

Einlernen. Zu Beginn durchläuft das Assistenzsystem für neue Umgebungen einmalig einen Kalibrierprozess, um sich an unterschiedlichen Umgebungen (z.B. Belichtung) anzupassen. Das System übergibt nach der Initialisierung an den Werker, der den konkreten Arbeitsablauf durchführt. In dieser Phase lernt das System anhand der Analyse von Livebildern die korrekte Abfolge von Montageschritten. Durch Machine Learning Methoden wird aus den Beobachtungen des Systems ein Zustandsautomat erstellt. Es findet dabei kein aktiver Eingriff durch das System statt, auch muss der Werkende keine zusätzlichen Informationen beitragen.

Weiterlernen. Der initial erstellte Ablauf ist auf Basis einer oder weniger Beobachtungen des Montageprozesses gelernt worden. Beim wiederholten Durchführen des Montageprozesses kommt es für einzelne Prozessschritte zu unterschiedlich großen Abweichungen, die für eine robuste Erkennung der Aktivitäten abgeschätzt und berücksichtigt werden müssen. Der Montageprozess wird so lange durchgeführt, bis das System ein bestimmtes Konfidenzlevel erreicht hat. Darüber hinaus können während des Weiterlernens, der Zustandsautomat dynamisch um weitere Prozessschritte und veränderte Abläufe ergänzt werden.

Normalbetrieb. Einlernen und Weiterlernen müssen einmalig erfolgt sein, damit das Assistenzsystem im Normalbetrieb arbeiten kann. In diesem Betriebsmodus beobachtet das System den Werker und gleicht den erfassten Prozess mit dem im Zustandsautomaten hinterlegten Prozess ab. Dem Wer-

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

ker ist es möglich auf Hilfematerial für den aktuellen Prozessschritt zurückzugreifen und sich dieses visuell darstellen zu lassen. Abweichungen werden vom System in einer Wissensdatenbank abgelegt. Das System lässt sich durch weitere Metainformationen anreichern, um Prozessschritte mit Labeln und Beschreibungen zu versehen.

2.2 Handdetektion

Die in dieser Arbeit verwendeten Algorithmen zur Erfassung und zum selbstständigen Lernen von Aktivitäten, bauen auf einem Modul zur Handerkennung auf. Die Erfassungsgenauigkeit dieser Handerkennung beeinflusst die Genauigkeit des gesamten, darauf aufbauenden Systems. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle genauer auf verschiedene Techniken und deren Vor- und Nachteile eingegangen werden, die zur Erkennung der Hände herangezogen worden sind.

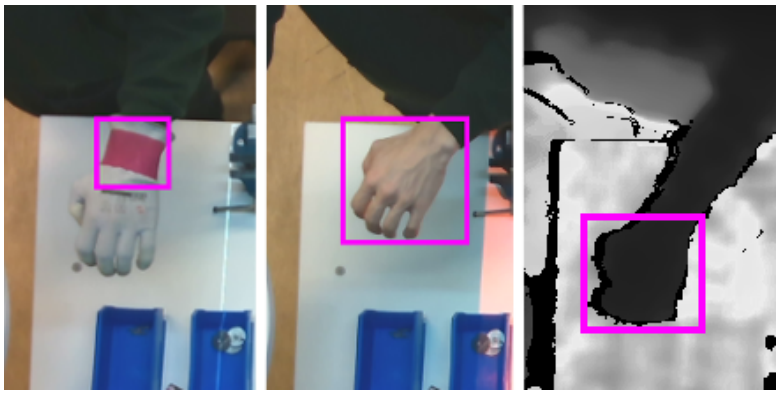


Bild 3: Darstellung der Handerkennung auf Basis verschiedener Verfahren und verschiedener Eingangsdaten. Links: Farbbasierte Erkennung. Die Erkennung findet anhand der rosa Farbe des Handschuhs statt. Mitte: Erkennung im Farbbild. Deep Learning Verfahren zur Erkennung von Händen auf Farbbildern. Rechts: Erkennung im Tiefenbild. Deep Learning Verfahren zur Erkennung von Händen auf Tiefenbildern.

Farbbasierte Erkennung. Durch das Tragen von speziellen, farbig markierten Handschuhen können diese robust und sehr effizient im Bild durch Blob Detection erkannt werden. Die Berechnungsrate ist stark abhängig von der verwendeten Hardware und Optimierung, aber im Vergleich zu den weiteren vorgestellten Methoden deutlich schneller. Wie in Bild 3, links, dargestellt, ist die Markierung am Handgelenk angebracht, da dieses in dem normalen Bewegungsraum der Hände am Arbeitsplatz, im Gegensatz von z.B. den Fingern, fast immer sichtbar ist. Eine weitere gängige Methode zur robusten Erkennung ist das Einbringen von speziellen Mustern oder Makern auf die Handschuhe [2]. Je nach Anforderung kann aus diesen Mustern auch die Pose der Hand bestimmt werden.

Vorteile:

- Effizient zu berechnen, benötigt keine dedizierte Hardware, wie z.B. Grafikkarten
- Robuste Erkennung, auch für schnelle Bewegungen oder schlechten Lichtverhältnissen
- Übertragbar, da sich das Erscheinungsbild der Hand nicht ändert

Nachteile:

- Durch die Erkennung des Handgelenks kommt es zu einer Abweichung von der eigentlichen Handposition. Kleine Bewegungen der Hand sind dadurch nicht erkennbar.
- Farbe ist vorgegeben, darf nicht in Farbspektrum des Arbeitsplatzes vorkommen
- Tragen von Handschuhen ist erforderlich, dies ist nicht immer möglich. Vorgaben zum Tragen von speziellen Handschuhen kann auch auftragsseitig vorgegeben sein.

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Erkennung im Farbbild. Tiefe neuronale Netze bilden den de facto Standard in der Objekterkennung [3]. Bei der Handerkennung handelt es sich um einen prominenten Spezialfall, für den es eine große Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen und öffentliche Datensätze gibt. Durch die vielen Freiheitsgrade der Erscheinungsform von Händen, wie z.B. Blickwinkel, Textur, Entfernung zur Kamera, Verdeckung, wird eine sehr große Anzahl an Trainingsdaten benötigt, um einen hinreichend guten, allgemeingültigen Klassifikator zu erstellen [4]. Die daraus resultierenden, großen Modelle mit hoher Genauigkeit sind im Vergleich langsam (<30 fps).

Vorteile:

- Funktioniert auch bei Handinteraktion verlässlich
- Funktioniert auch für Handschuhe
- Muss nicht trainiert werden, verfügbare Modelle liefern bereits Out-of-the-box sehr gute Erkennungsqualität, auch für komplexe Szenarien, wie getragene Handschuhe

Nachteile:

- Große Modelle, grundsätzlich langsam, kleinere und schnellere Modelle brauchen spezifisches Training oder liefern schlechte Performance
- Benötigt dedizierte Hardware, wie z.B. Grafikkarten

Erkennung im Tiefenbild. Handerkennung findet direkt auf der Disparitätenkarte einer Stereokamera statt. Ein eminentes Problem bei der Verwendung von Handerkennern, die ohne Hilfsmittel wie Farbe oder Marker auskommen ist die große Variabilität der Hände. Variation in Farbe und Muster senken die Genauigkeit von Handerkennern immens. Ein konkretes Problem ist das Tragen von Handschuhen, die zur Trainingszeit unbekannt sind. Tiefeninformationen beinhalten die Form und sind unabhängig von Farbe und Muster.

Vorteile:

- Übertragbar, da sich die Handform grundlegend nicht verändert
- Invariant gegenüber Farbe und Muster

Nachteile:

- Geringe Auflösung und Genauigkeit, z.B. Interaktion zwischen Händen oder mit Werkzeug
- Vergleichsweise hohe fehlerhafte Erkennungen

Erkennung der Gelenkpunkte. Für verschiedenen Anwendungsszenarien kann es erforderlich sein, über die reine Lokalisierung der Hand im Bild hinaus, Informationen zu erfassen. Sollen Gesten und Handpositionen ausgewertet werden, kann dies durch die Erfassung einzelner Gelenkpunkte, aus denen sich ein Handskelett erstellen lässt, erfolgen [5, 6].

Vorteile:

- Detaillierte Analyse zum Zustand der Hände, z.B. Hand offen, Objekt gegriffen
- Ergebnis kann plausibilisiert werden

Nachteile:

- Grundsätzlich langsamer als die reine Handerkennung, da die Schätzung der Gelenkpunkte auf eine Handerkennung folgt.
- Hoher Annotationsaufwand beim Erstellen von Datensätzen

Für das Vorhaben kommt die farbbasierte Erkennung und die Erkennung auf den Tiefenwerten zum Einsatz. Die Farberkennung liefert mit Abstand die robustetste Erkennung und ist daher wann immer möglich bevorzugt. Die Erkennung auf Basis der Tiefenwerte kommst in allen anderen Fällen zum

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Einsatz, da diese unabhängig vom Erscheinungsbild (Farbe und Muster) der Hand und somit für ein breites Anwendungsgebiet einsetzbar ist.

2.3 Aktivitätserkennung

Aktivitäten sind im Kontext von manuellen Montageprozessen dadurch definiert, dass diese Bestandteile einer zumeist vordefinierten Abfolge von eindeutig zuordenbaren Tätigkeiten darstellen. Dabei können Aktivitäten einfach oder auch mehrfach in einer solchen Abfolge auftreten. Um einen möglichst hohen Grad an Assistenz zu bieten, müssen die Aktivitäten innerhalb einer Abfolge robust und frühzeitig erkannt werden, damit bei möglichen fehlerhaften Ausführungen schnellstmöglich eingeschritten werden kann. Die Detektion der Hände und der resultierende Positionsverlauf dienen als Basis für die Erkennung der Aktivitäten während der Montage.

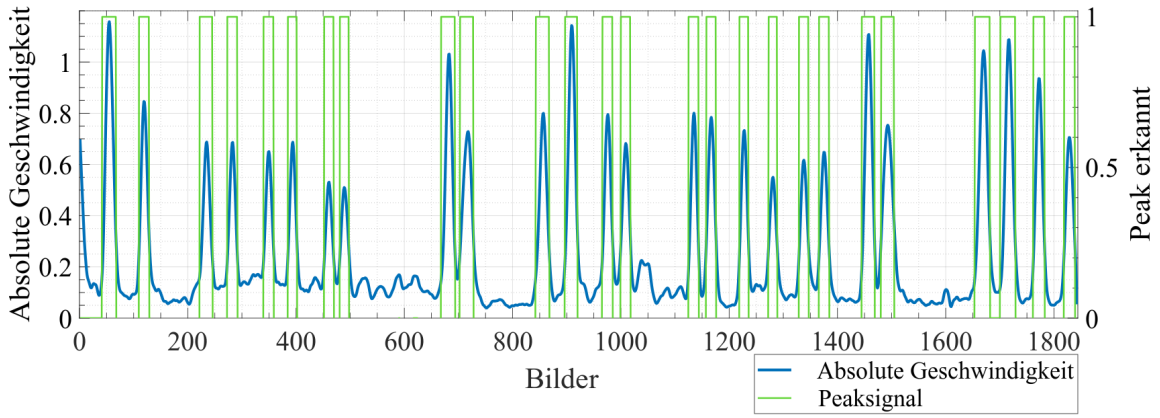


Bild 4: Ausgangssignal des Peakdetektions-Algorithmus (grün) auf die geglättete absolute Geschwindigkeit (blau) für einen beispielhaften Arbeitsablauf.

Aktuell wird die Aktivitätserkennung mit Hilfe eines k-Nearest-Neighbor (kNN) Klassifikators realisiert [7]. Dieser Ansatz wurde bereits in vorherigen Arbeiten experimentell evaluiert [8, 9]. Die Grundlage ist die einfache Annahme, dass sich eine oder beide ausführenden Hände zur Aktivität bewegen, bei der Durchführung nahezu ruhig an einer Stelle bleiben, womöglich auch nur für einen sehr kurzen Moment, und sich danach zur nächsten Aktivität bewegen. Durch diese Annahme lassen sich alle Aktivitäten eines Prozesses bestimmen, in dem die Geschwindigkeitsverläufe der Hände segmentiert werden, siehe auch Bild 4. Dadurch entstehen ortsgebundene Aktivitäten, die sich durch mehrfache Wiederholungen zu einer Datenbasis, bestehend aus Aktivitätsclustern, entwickeln, beispielhaft dargestellt in Bild 5. Diese Vorgehensweise erlaubt das Einlernen des Assistenzsystems durch mehrfache Wiederholung eines Arbeitsablaufs von geschultem Personal. Diese Art der Aktivitätserkennung ist rein positionsbasiert, d.h. alle unterschiedlichen Aktivitäten eines Prozesses müssen räumlich getrennt sein, ansonsten ist eine Unterscheidung nicht möglich.
Um diese Einschränkung zu überwinden, wird eine trajektorienbasierte Aktivitätserkennung implementiert. Diese bezieht zusätzlich zur aktuellen Position auch die vergangenen Positionen der Hände mit ein. Dazu werden nicht die Positionen geclustert, sondern die Trajektorien zwischen den Aktivitäten verwendet. Eine Aktivität ist der Bereich zwischen zwei Peaks, wie in Bild 4 in grün hervorgeboben. Die einzelnen Trajektorien werden mittels Dynamic Time Warping (DTW) [10] verglichen und geclustert. Für die Aktivitätserkennung werden diese Cluster mit DTW Barycenter Averaging (DBA) [11] gemittelt, um repräsentative Trajektorien zu erhalten. Im Livebetrieb des Assistenzsystems werden die repräsentativen Aktivitätstrajektorien mit den erfassten Handtrajektorien über DTW verglichen.

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

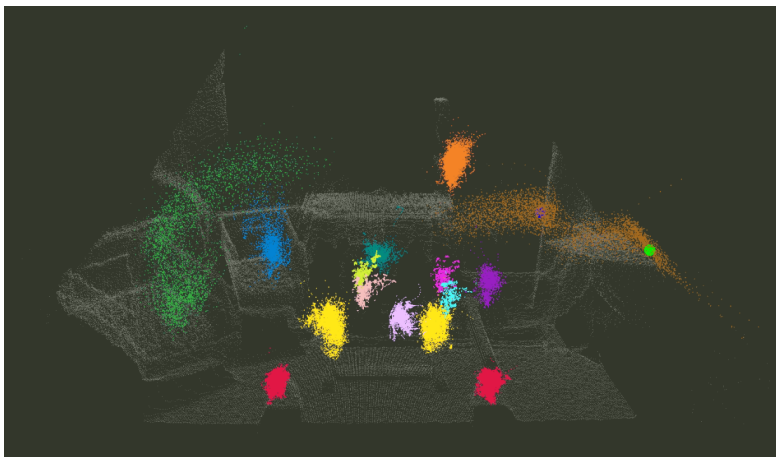


Bild 5: Beispielhafte Darstellung der farbigen Cluster, welche die einzelnen Aktivitäten repräsentieren. Der Arbeitsplatz ist durch die weiße Punktewolke angedeutet.

3 Evaluation

Im laufenden Vorhaben werden insbesondere die Hand- und Aktivitätserkennung gegenüber dem ursprünglichen Assistenzsystem verbessert. Der Vorgänger arbeitete mit einer farbbasierten Handschuherkennung, da sie, wie zuvor beschrieben, robust und kostengünstig bzgl. Hardware und Energieeffizienz ist. Allerdings hängt sie vom Einsatz farbiger Handschuhe ab. Dies ist ggf. nicht möglich. Unter Umständen lässt sich auch kein ausreichend isolierter Farbort für die Erkennung finden. Daher wird das System an dieser Stelle verallgemeinert. Die Vorteile einer farbbasierten Erkennung bestehen in der Robustheit nicht zuletzt auch hinsichtlich der erkannten Aktivitäten. Um diese auch mit anderen Ansätzen zu erreichen, wird die zuvor beschriebene neue Methode der trajektorienbasierten Aktivitätserkennung verwendet. Nachfolgend werden erste Ergebnisse und Limitationen besprochen.

3.1 Aktivitätserkennung

Der erste Schritt zur Evaluierung der trajektorienbasierten Aktivitätserkennung, ist die Beurteilung der Ähnlichkeit zweier Instanzen anhand eines Similarity-Scores, der durch ein Matching mittels DTW ermittelt werden soll. Um diesen methodischen Ansatz auf dessen Eignung zu untersuchen, wurden zwei komplette Arbeitsdurchläufe ID 0 und ID 1, von unterschiedlichen Personen durchgeführt und miteinander verglichen. Beide beinhalten jeweils 26 Aktivitätssegmente, von denen jede mögliche Kombination mit DTW verglichen und ein Score berechnet wurde. Bild 6 zeigt das Ergebnis der Untersuchung. Der Marker (roter Stern) in den Feldern zeigt den geringsten Score für die jeweilige Spalte – also die Kombination mit der höchsten Ähnlichkeit. Eine Diagonale durch die Matrix deutet auf ein perfektes Matching der Segmente hin. Für die Kombinationen (5, 5) und (6, 6) wurde dies nicht erreicht, jedoch liegt bei Beachtung der in Klammern geschriebenen ClassIDs keine fehlerhafte Erkennung vor. Dieser Umstand ist auf die Redundanzen in den Klassen zurückzuführen. Ein weiteres Phänomen – bei Betrachtung der gesamten Heatmap – sind schachbrettartige Interferenzmuster im linken oberen und rechten unteren Bereich, aber auch abgeschwächt in anderen Teilen des Diagramms. Diese kommen durch die zugrundeliegende Abfolge an Tätigkeiten und den aufeinanderfolgenden Interaktionsgruppen von Take-Use-Interaktionen auf, die sehr ähnliche Trajektoriensegmente aufweisen und teilweise derselben Klasse zugehörig sind. Dabei sticht das Feld (9, 9) beziehungsweise dessen Spalte dadurch heraus, dass es eine allgemein geringere Ähnlichkeit zeigt verglichen mit anderen gematchten Feldern. Dies ist ein Indiz dafür, dass in dieser aufgenommenen Sequenz ID 1 parasitäre Variationen in Segment ID 9 auftreten, die zu einer erschwerten oder sogar fehlerhaften Erkennung führen können. Aus diesem Grund ist es essenziell, eine repräsentative Datenbasis aufzubauen, um zum einen tatsächliche Variationen in der Aktivitätsausführung zu berücksichtigen und zum anderen solche parasitären Effekte durch ein geeignetes Averaging zu reduzieren. Detailliertere Evaluationen zur trajektorienba-

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

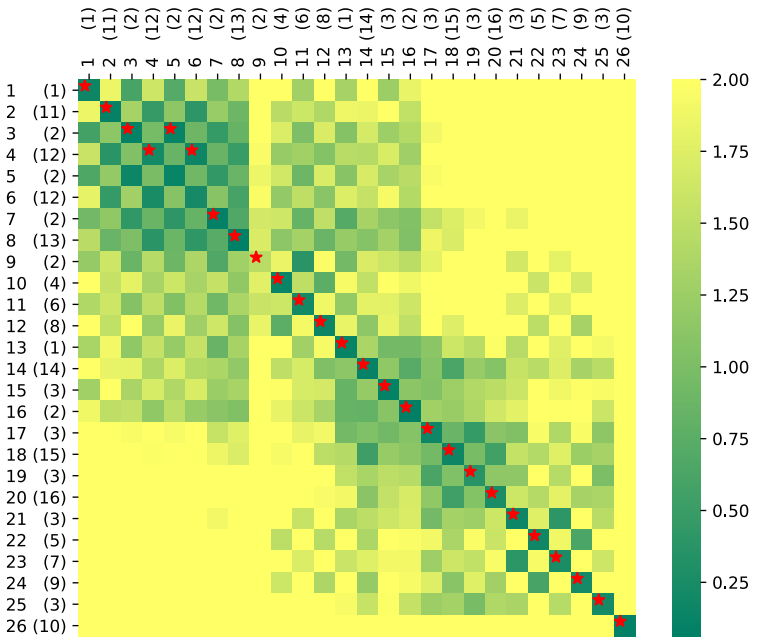


Bild 6: Similarity-Scores der DTW Berechnungen aller Kombinationen der extrahierten Segmente aus den Sequenzen ID0 (links aufgetragen) und ID1 (oben aufgetragen) – betitelt mit der Segment ID und in Klammern die dazugehörige ClassID. Je höher die Ähnlichkeit, desto dunkler ist das jeweilige Feld. Der geringste Score jeder Spalte ist mit einem Stern versehen.

sierten Aktivitätserkennung und ihrer Robustheit beim Einsatz im Assistenzsystem stehen noch aus.

3.2 Limitation

Die aktuell implementierten Verfahren, für sowohl trajektorien- wie auch positionsbasierten Aktivitätserkennung lassen nur eine gewisse Auflösung von Aktivitäten zu. Reale Prozessschritte, die nicht eindeutig aufgelöst werden können, werden vom System zu einer Aktivität zusammengefasst. Wie groß die Auflösung des Systems ist, liegt an mehreren Faktoren. Der wesentliche Faktor ist dabei die gelernte Abweichung für ein und dieselbe Aktivität. Beispielsweise ist der Mittelpunkt der Aktivität nicht der Mittelpunkt der erfassten Hand, bei veränderter Griffposition verändert sich entsprechend der Ort der Aktivität und die Unsicherheit nimmt zu.

3.3 Nützlichkeit und Motivation

Entscheidend für die erfolgreiche Einführung neuer Technologien ist die Akzeptanz der Anwendenden. Wird das System als nützlich empfunden? Motiviert es im Arbeitsprozess? Aus diesem Grund wird begleitend zur technischen Entwicklung eine psychologische Evaluation durchgeführt. In der ersten Phase einer Kampagne wurde das Assistenzsystem dem klassischen Lernen des Arbeitsablaufs mit Papierdokumentation gegenübergestellt. Die Aufgabe bestand darin, den vorgegebenen Montageprozess drei Mal korrekt auszuführen, entweder auf Basis der Videos oder der Dokumentation. Ein Montagefehler führt zum Abbruch und erneuten Start von vorne. In einer zweiten Phase wurde dann das Erlernte ohne Hilfsmittel angewandt. Ziel war es, den Montageprozess fünf Mal korrekt auszuführen. Die Studie, die mit 29 Teilnehmenden durchgeführt wurde, ergab, dass mit der aktuellen Version des Assistenzsystems Durchführungszeiten und Fehlerhäufigkeiten im Vergleich zum klassischen Ansatz in ähnlichen Bereichen lagen. Auch in der User Experience, die mit begleitenden Fragebögen erhoben wurde, ist das Assistenzsystem der Papierdokumentation aktuell noch nicht überlegen. Allerdings

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

ließen sich daraus konkrete Handlungsempfehlungen ableiten, die in der nächsten Iteration des Entwicklungsprozesses umgesetzt werden, beispielsweise die präzisere Vermittlung von Feedback und die Verwendung zusätzlicher, intuitiver Darstellungselemente.

4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden die zentralen technischen Bausteine eines Assistenssytems für manuelle Montageprozesse vorgestellt. Zum einen wurde auf Methoden zur Handerkennung, sowie deren Vor- und Nachteile eingegangen. Zum anderen wurde die darauf basierende Aktivitätserkennung geschildert und in einem ersten Ansatz evaluiert. Erste Auswertungen haben Limitationen des Gesamtsystems sowohl auf technischer, aber auch aus psychologischer Sicht ergeben. Diese fließen in die weitere Entwicklung des Systems ein. Die zukünftigen Entwicklungen zielen vor allem auf die Robustheit der Aktivitätserkennung, sowie die Darstellung und Aufbereitung der Hilfsmaterialien zur Steigerung der Akzeptanz der Werkenden bei Anwendung im Echtzeitbetrieb ab.
Für den Einsatz einer Lösung zur Unterstützung von manueller Montage ist die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit unabdingbar. Die vorgestellte Lösung macht einen Vorschlag zur Entwicklung flexibler Systeme, die robuste KI-Modelle verwenden, welche den hohen Initialaufwand und laufenden Support durch selbstständiges Lernen deutlich reduzieren. Konkret bedeutet das für Unternehmen, dass sich durch eigenes Wissen selbstständig und schnell digital abgebildete Montageprozesse ändern oder bestehende erweitern lassen, ohne dass Fachkenntnisse zu den KI-Modellen notwendig sind.

5 Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Forschungsprojektes GesInA40 (01IS19043C) im Rahmen der Fördermaßnahme "KMU-innovativ" sowie beim DLR Projektträger Datenwissenschaften / Softwareintensive Systeme.

6 Literatur

[1] GesInA40: Projekt im Rahmen der Förderinitiative "KMU-innovativ", die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt wird. Zuteilungsnummer: 01IS19043C
[2] Han, S., Liu, B., Wang, R., Ye, Y., Twigg, C., Kin, K.: Online optical marker-based hand tracking with deep labels. ACM Transactions on Graphics **37**, 1–10 (2018). DOI 10.1145/3197517.3201399
[3] Kebinger, S., Kröhn, M.: A brief history of deep neural networks for image processing tasks (2021). DOI 10.13140/RG.2.2.29804.80005
[4] Shan, D., Geng, J., Shu, M., Fouhey, D.: Understanding human hands in contact at internet scale (2020)
[5] Simon, T., Joo, H., Matthews, I., Sheikh, Y.: Hand keypoint detection in single images using multiview bootstrapping. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (2017)
[6] Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C., Grundmann, M.: Mediapipe hands: On-device real-time hand tracking. CoRR **abs/2006.10214** (2020). URL https://arxiv.org/abs/2006.10214
[7] Altman, N.S.: An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. The American Statistician **46**(3), 175–185 (1992). URL http://www.jstor.org/stable/2685209
[8] Köhler, S., Doll, K., Kebinger, S., Schmitt, D., Kröhn, M., Fried, M., Börsig, R.: Prozessinnovation: Hochautomatisiert lernendes Assistenzsystem für die manuelle Montage. AALE pp. 153 – 164 (2018)
[9] Köhler, S., Doll, K., Kebinger, S., Schmitt, D., Kröhn, M., Fried, M., Börsig, R.: Gestenerkennung in einem hochautomatisiert lernenden Assistenzsystem für manuelle Montageprozesse. In: AUTOMATION 2018, VDI-Berichte 2330, pp. 145 – 156 (2018)
[10] Petitjean, F., Forestier, G., Webb, G.I., Nicholson, A.E., Chen, Y., Keogh, E.: Dynamic time warping averaging of time series allows faster and more accurate classification. In: 2014 IEEE International Conference on Data Mining, pp. 470–479 (2014). DOI 10.1109/ICDM.2014.27
[11] Petitjean, F., Ketterlin, A., Gançarski, P.: A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering. Pattern Recognition **44**(3), 678–693 (2011). DOI https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.09.013. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003132031000453X

Open Access. © 2022 J. Jung, A. Hubert, K. Doll, M. Kröhn, J. Stadler
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Aufbau virtueller Versuchsanlagen und deren Nutzung in Lehrveranstaltungen zur Automatisierungstechnik

M. Othman[1], C. Stöcker[2]

Zusammenfassung

In der Ingenieursausbildung ist die Arbeit an Anlagen und Maschinen ein wesentlicher Baustein, um die Anwendbarkeit, Möglichkeiten und Grenzen der in der Theorie vermittelten Methoden an praktischen Problemstellungen zu erproben und einschätzen zu lernen. Zu diesem Zweck werden an vielen Hochschulen und Universitäten unterschiedliche Versuchsanlagen eingesetzt. Die Errichtung und der Betrieb solcher Anlagen erfordern jedoch Platz und sind typischerweise mit hohem Einsatz personeller und finanzieller Ressourcen verbunden. Dieser Beitrag betrachtet den Einsatz virtueller Versuchsanlagen als eine mögliche Ergänzung der bestehenden Laborinfrastruktur. Virtuelle Anlage sind solche, die nicht physisch existieren, sondern deren dynamisches Verhalten simuliert und in einer 3D-Visualisierungen auf einem Monitor oder in einer VR-Brille dargestellt werden kann. Virtuelle Anlagen haben gegenüber realen Versuchsanlagen viele Vorteile in Bezug auf die Dauer und Kosten für deren Realisierung, sowie deren Erweiterung und Anpassung an neue Lehrinhalte und die Skalierung und Vervielfältigung für den Einsatz in Praktika. Auf der anderen Seite müssen Laboringenieure für die Entwicklung, Pflege und Instandhaltung virtueller Anlagen über andere Kompetenzen (insb. im Bereich der IT und Programmierung) verfügen, als bei realen Anlagen. Zudem wird für den Betrieb solcher Anlagen zusätzliche Soft- und Hardware benötigt. Am Beispiel eines virtuellen Aufzugs beschreibt dieser Beitrag im Einzelnen diese Vor- und Nachteile und gibt Hinweise für den Einsatz einer virtuellen Anlage in Praktika und Übungen.

Stichwörter

Virtuelles Labor, Virtuelle Versuchsanlage, Simulation, Virtual Reality, 3D-Visualisierung, Unity, game4automation, TwinCAT3, Steuerungstechnik, Regelungstechnik, Aufzugsanlage

1 Einleitung

1.1 Motivation

Labor- und Versuchsanlagen sind in der Ingenieursausbildung ein wichtiges Mittel, um theoretisch erlerntes Wissen in die Praxis umzusetzen und die Anwendbarkeit und Grenzen von Methoden an praktischen Problemstellungen zu erfahren. Der finanzielle und personelle Aufwand für die Errichtung und den Betrieb dieser Anlagen ist jedoch häufig groß. Änderungen an bestehenden Anlagen sind entweder nicht umsetzbar oder sie erfordern umfangreiche Planungsvorleistungen sowie erneuten Einsatz finanzieller und personeller Ressourcen. Wenn also Veränderungen in den Lehrinhalten oder den Lernzielen, Anpassungen von Laboranlagen erforderlich machen, sind diese Umbauten selten kurzfristig möglich. Eine Ergänzung zur bestehenden Laborinfrastruktur können dann virtuelle Versuchs-

[1] Moaid Othman, M. Sc., FH Bielefeld, moaid_ismail.othman@fh-bielefeld.de
[2] Prof. Dr.-Ing. Christian Stöcker, FH Bielefeld, christian.stoecker@fh-bielefeld.de

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

anlagen sein. Dies sind Simulationsmodelle technischer Anlagen (die nicht zwingend real existieren müssen), deren dynamisches Verhalten realitätsnah ist. Genauso wie bei realen Anlagen, kann das Verhalten dieser Modelle durch Eingangssignale beeinflusst und durch Ausgangssignale erfasst werden. Über geeignete Schnittstellen ist es also möglich, virtuelle Anlagen mit realen Steuerungen zu verbinden und die entwickelte Automatisierungssoftware daran zu testen und zu erproben. Bei Einsatz einer VR-Brille kann darüber hinaus das Verhalten der automatisierten Anlage in der virtuellen Realität erfahren werden.

1.2 Zielstellung und Inhalte des Beitrags

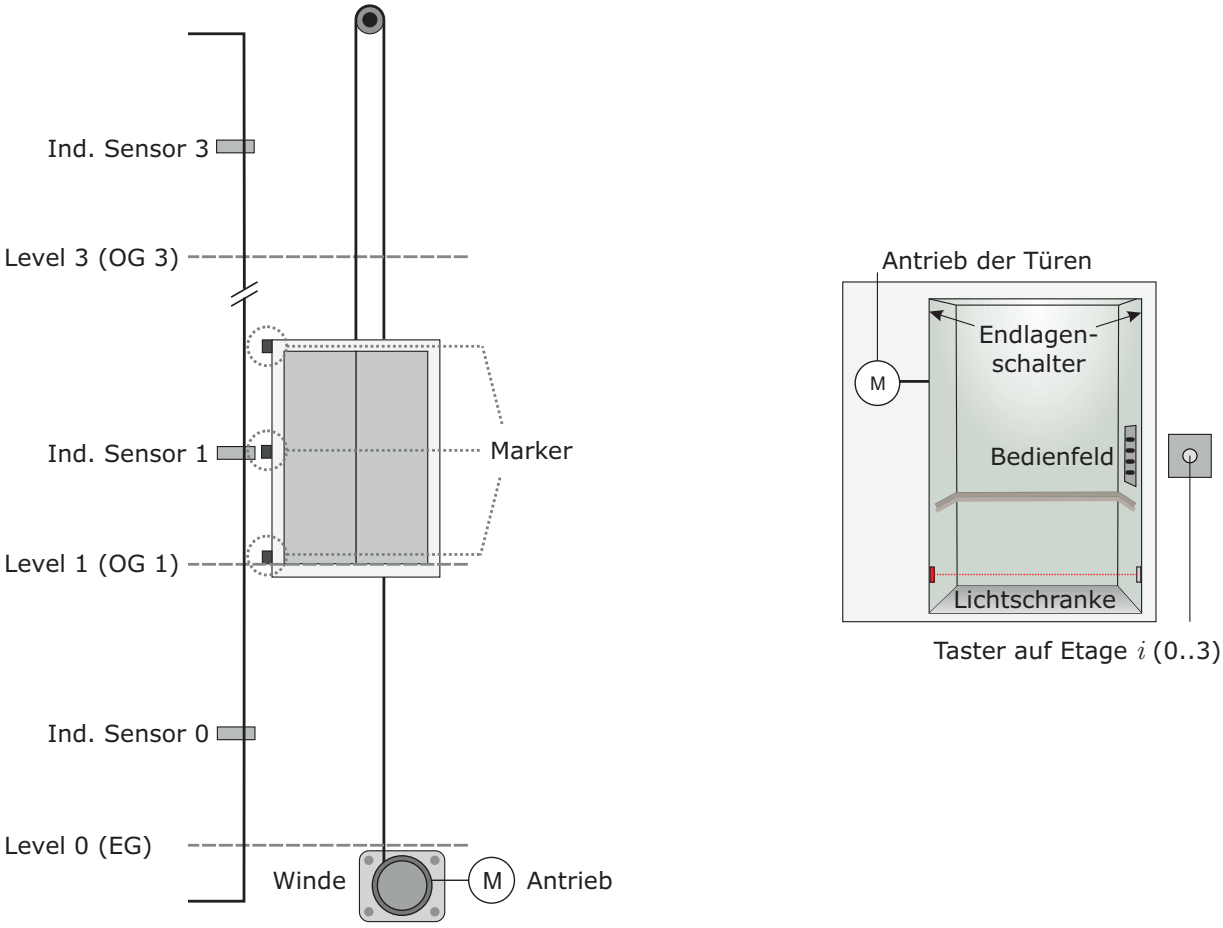
Das Ziel dieses Beitrags ist, die Erfahrungen, die bei der Konzeptionierung, Realisierung und Anwendung einer virtuellen Anlage gesammelt wurden, zu beschreiben. Es sollen Informationen gegeben werden, die eine mögliche Entscheidungsfindung bzgl. der Erstellung virtueller Versuchsanlagen in Institutionen zur Ausbildung von Automatisierungsingenieuren unterstützen. Das Beispiel eines Prototyps einer virtuellen Anlage, anhand dessen die Autoren ihre Erfahrungen beschreiben, ist ein virtueller Aufzug, der in Kapitel 2 spezifiziert wird. Hier werden zudem die für den Aufbau der Anlage verwendete Soft- und Hardware, die für die Entwicklung benötigten Kompetenzen sowie eine Abschätzung der entstandenen Kosten und der Entwicklungsdauer angegeben. In Kapitel 3 wird dann eine mögliche Praktikumsaufgabe an dem virtuellen Aufzug dargestellt und es werden unterschiedliche Varianten eines möglichen Praktikumsaufbaus erklärt, welche die Verfügbarkeit spezieller Hardware (Industrie-PC mit Soft-SPS und VR-Brille) berücksichtigen. In Kapitel 4 werden schließlich die Argumente für und wider den Einsatz virtueller Anlagen in der Ingenieursausbildung zusammengefasst.
Es sei hier erwähnt, dass die Idee, neu entwickelten Programmcode der Automatisierungstechnik an Simulationsmodellen zu erproben, nicht neu ist. Das Testen von Steuerungscode an Simulationen ist unter dem Begriff *virtuelle Inbetriebnahme* bekannt und wird seit Anfang der 2000er Jahre Wissenschaft diskutiert [2, 4] und seit einigen Jahren auch industriell eingesetzt [5]. Zudem werden virtuelle Anlagen auch für Schulungen von Anlagenbedienern eingesetzt [3].

2 Aufbau einer virtuellen Anlage

2.1 Beispiel: Aufzugsanlage

Das Beispiel, anhand dessen im Folgenden das Vorgehen für die Realisierung einer virtuellen Anlage erläutert wird, ist ein Aufzug, der in Bild 1 schematisch dargestellt ist. Das Teilbild (a) veranschaulicht die Umsetzung der vertikalen Bewegung und der Positionierung des Fahrkorbs. Der Aufzug soll über vier Etagen (Erdgeschoss EG, 1. Obergeschoss OG1, 2. Obergeschoss OG2 und 3. Obergeschoss OG3) fahren, von denen in Bild 1(a) nur EG, OG1 und OG3 gezeigt werden. In jedem Geschoss ist ein induktiver Sensor eingebaut. Diese Sensoren dienen zur Positionierung des Aufzugs und zur Steuerung der Fahrgeschwindigkeit beim Beschleunigen und Abbremsen. An dem Aufzug sind oben, in der Mitte und unten jeweils ein metallischer Marker montiert, die von den induktiven Sensoren erfasst werden, wenn sich der Aufzug daran vorbei bewegt. Die Bewegung des Fahrkorbs wird über eine motorisierte Winde realisiert. Der Antrieb, der die Winde bewegt, wird über zwei Signale angesteuert: Ein binäres Enable-Signal aktiviert oder deaktiviert den Antrieb und über ein weiteres analoges Signal kann eine Geschwindigkeit eingestellt werden.
Das Teilbild (b) zeigt eine Detailansicht des Fahrkorbs. Die Türen lassen sich über einen Antrieb öffnen und schließen, wobei deren Positionen über Endlagenschalter erfasst werden. Der hier eingesetzt Antrieb wird über zwei binäre Signale angesteuert. Über ein Enable-Signal kann der Antrieb aktiviert oder deaktiviert werden und über ein weiteres Signal kann die Bewegungsrichtung vorgegeben werden. Der Antrieb bewegt sich nur mit fest eingestellter Geschwindigkeit; eine Geschwindigkeitsregelung ist hierbei nicht vorgesehen. Eine Lichtschranke im Zugang zum Fahrkorb soll Hindernisse im Bereich der Türen erkennen. Im Fahrkorb befindet sich ein Bedienfeld, über das einerseits der Fahrwunsch in die einzelnen Ebenen eingegeben werden kann und andererseits eine manuelle Steuerung

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +



(a) Positionierung des Fahrkorbs (b) Detailansicht des Fahrkorbs

Bild 1: Schematische Darstellung der Aufzugsanlage

der Türen vorgenommen werden kann. Auf jeder Ebene befindet sich zudem ein Taster, über den ein Fahrwunsch angezeigt und entsprechend der Fahrkorb gerufen werden kann.
Zusätzlich zu den Türen des Fahrkorbs gibt es noch auf jede Ebene eine Tür, die den Aufzugsschacht von der jeweiligen Ebene trennt, die aber in Bild 1 nicht eingezeichnet sind. Diese Türen werden nur geöffnet, wenn der Fahrkorb in der entsprechenden Ebene hält. Andernfalls müssen diese Türen immer geschlossen sein. Der in diesen Türen eingesetzte Antrieb ist der gleiche Typ, wie der Antrieb der Türen im Fahrkorb.
Die für eine Automatisierung der Aufzugsanlage verwendbaren Ein- und Ausgangssignale werden aus Sicht einer Steuerung in Tabelle 1 zusammengefasst. In der Tabelle werden grob drei Typen von Signalen unterschieden: digitale Eingänge (DI), digitale Ausgänge (DO) und analoge Ausgänge (AO). Insgesamt verfügt die Anlage über einen anlogen und 11 digitale Ausgänge sowie über 26 digitale Eingänge.

2.2 Software-Tools für die Entwicklung der virtuellen Anlage

Für die Realisierung des zuvor beschriebenen Aufzugsystems als digitale Anlage wird die Spiele-Engine Unity verwendet. Unity ist ursprünglich als Entwicklungs- und Laufzeitumgebung für Spiele entwickelt worden, wird jedoch zunehmend auch in anderen Bereichen eingesetzt. In [1] wird erklärt, wie VR-Applikationen mit Unity erstellt und für die Ausbildung von Studierenden in der Mechatronik verwendet werden können. Zudem werden in Unity erstellte Simulationsmodelle auch im industriellen Umfeld eingesetzt, wie z. B. [6] beschreibt.
Ein besonderer Nutzen von Unity für den Aufbau virtueller Anlagen liegt in der *Physics Engine*. Dies ist

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Tabelle 1: IO-Signale der Aufzugsanlage

Beschreibung	**Anzahl**	**Typ**
Antrieb der Winde: Enable	1	DO
Antrieb der Winde: Velocity	1	AO
Positionserfassung des Fahrkorbs mit induktivem Näherungssensor	4	DI
Antrieb der Türen des Fahrkorbs: Enable	1	DO
Antrieb der Türen des Fahrkorbs: Open/Close	1	DO
Antrieb der Türen in den Ebenen: Enable	4	DO
Antrieb der Türen in den Ebenen: Open/Close	4	DO
Endlagenschalter der Türen des Fahrkorbs: isOpen/isClosed	2	DI
Endlagenschalter der Türen auf den Ebenen: isOpen/isClosed	8	DI
Lichtschranke	1	DI
Taster auf dem Bedienfeld im Fahrkorb	7	DI
Taster zur Angabe des Fahrwunsches auf jeder Ebene	4	DI

ein Softwarepaket, dass Objekten in der virtuellen Welt ein an realen physikalischen Gesetzmäßigkeiten angepasstes Verhalten gibt. So werden in dieser Engine u.a. die Schwerkraft und andere Kräfte (z. B. Reibung) sowie auch Kollisionen simuliert. Es ist also nicht erforderlich, das dynamische Verhalten der virtuellen Anlage mathematisch zu modellieren (z. B. in einem Zustandsraummodell), da also die Dynamik durch die Physics Engine berechnet wird. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Simulationswerkzeugen, in denen das zu simulierende Verhalten mathematisch beschrieben werden muss, mit der Konsequenz, dass für die Simulation typischerweise nur ein stark vereinfachtes Modell verwendet wird und daher nur ein kleiner Teil aller Effekte, die in einer realen Anlage auftreten können, erfahrbar gemacht werden.
In Unity kann folglich die virtuelle Anlage zusammen mit ihrer Umgebung aufgebaut werden, wobei das dynamische Verhalten frei beweglicher Komponenten in dem gesamten Modell grundsätzlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten folgt. In dem betrachteten Beispiel wird i. W. ein Hochhaus mit vier Ebenen, einem Aufzugsschacht und dem Fahrkorb realisiert (vgl. Bild 2). Das dynamische Verhalten, das durch die Aktorik in dem Modell erzwungen werden soll, wird durch die o. g. Physics Engine jedoch nicht abgedeckt. Die vertikale Bewegung des Fahrkorbs innerhalb des Aufzugsschachts, wie auch die horizontale Bewegung der Türen (zum Öffnen und Schließen) müssen durch sog. Verhaltensmodelle programmiert werden. Verhaltensmodelle sind Funktionen, in denen die Effekte von Aktoren auf Objekte in dem Modell beschrieben werden. Gleiches gilt auch für die in der virtuellen Anlage verwendete Sensorik. Die Umwandlung simulierter physikalischer Größen in einen Messwert muss ebenfalls durch Verhaltensmodelle programmiert werden. In der Beispielanlage werden solche Verhaltensmodelle für die Sensorik insb. für Näherungssensoren und Taster benötigt. Die Implementierung der Verhaltensmodelle erfolgt in der Programmiersprache C#.

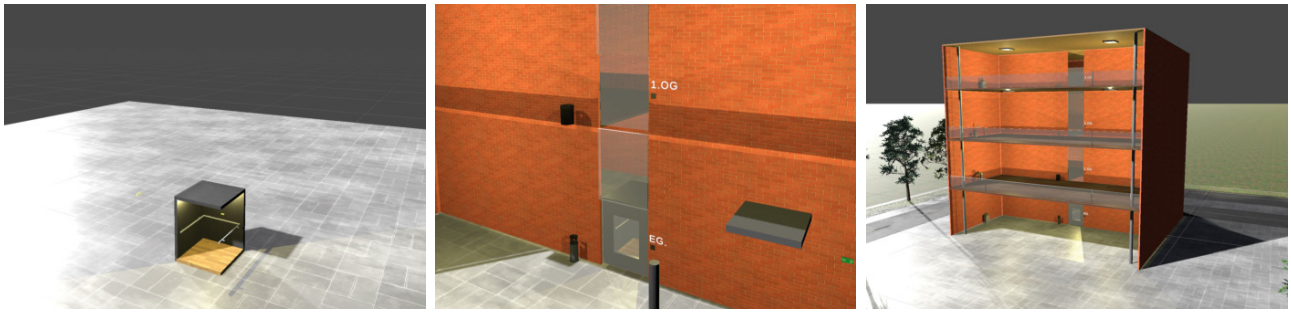


Bild 2: Beginn der Modellierung, ein Zwischenstand und das fertige 3D-Modell

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Für die umfassende und realitätsnahe Simulation einer virtuellen Anlage ist natürlich das Verhalten automatisierungstechnisch relevanter Komponenten der Sensorik und Aktorik unerlässlich und damit die Implementierung der Verhaltensmodelle eine Notwendigkeit. Die Tatsache, dass aber diese Verhaltensmodelle für typische Sensor- und Aktortypen in unterschiedlichen Simulationsmodellen wiederkehrend eingesetzt werden können, hat ein Geschäftsmodell eröffnet, das auf der Lizenzierung von Verhaltensmodellen für solche automatisierungstechnischen Standardkomponenten basiert. Alternativ zu der Möglichkeit, diese Funktionen selber zu schreiben, kann man diese auch kaufen. Ein Unternehmen, das sich auf die Programmierung dieser Verhaltensmodelle spezialisiert hat, ist die Firma inSight GmbH, die mit dem Produkt game4automation eine Reihe von Verhaltensmodellen für Sensorik und Aktorik anbietet und das auch in dem hier beschriebenen Projekt zum Einsatz kommt.

2.3 Schnittstelle zwischen virtueller Anlage und SPS

Damit die virtuelle Anlage später auch durch eine reale speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) automatisiert werden kann, muss eine Schnittstelle implementiert werden, über die ein Datenaustausch zwischen der Simulation und der SPS erfolgt. Neben den Verhaltensmodellen enthält game4automation solche Schnittstellen für die Kopplung zwischen der virtuellen Anlage in Unity und Steuerungen unterschiedlicher Hersteller. In dem hier erklärten Beispiel wird eine PC-basierte Steuerung der Firma Beckhoff eingesetzt. Die Entwicklungs- und Laufzeitumgebung der Steuerungen dieser Firma ist TwinCAT3. Eine Kopplung zwischen Unity und TwinCAT ist sowohl über OPC/UA, wie auch über das proprietäre Kommunikationsprotokoll ADS möglich.
Der Informationsaustausch zwischen diesen beiden Programme erfolgt über Variablen, was in Bild 3 am Beispiel von zwei Sensorsignalen (`bLimitSenClosedInside` und `bLimitSenOpenInside`) und zwei Aktorsignalen (`bMotorLiftEnable` und `nMotorLiftVel`) veranschaulicht ist. Auf der linken Seite der Abbildung ist ein Codeausschnitt aus einem SPS-Projekt in TwinCAT dargestellt. Die hierin gelb hervorgehobenen Variablen sind in dem SPS-Projekt in einer globalen Variablenliste deklariert. Auf der rechten Seite von Bild 3 ist ein Ausschnitt der Liste aller in der Simulation verwendeten Signale dargestellt. Die hier dargestellten Signale haben dieselben Bezeichner, wie die Variablen in TwinCAT, was eine notwendige Voraussetzung für die Informationskopplung ist.
Die Signale `bLimitSenClosedInside` und `bLimitSenOpenInside` sind in Unity Objekten zugeordnet, die das Verhalten von Endlagenschaltern simulieren. Wenn diese Objekte mit anderen Objekten in Kontakt kommen – der Endlagenschalter also aktiviert ist – wird das zugehörige Signal auf `TRUE` gesetzt, andernfalls ist dessen Wert `FALSE`. Durch die Schnittstelle werden diese Signale aus Unity ausgelesen und der jeweilige Wert wird dann in TwinCAT in die gleichnamige Variable geschrieben, wo diese dann, wie im Codeausschnitt in den Zeilen 60 und 61 dargestellt, ausgelesen werden können.
Bei der Ansteuerung von Aktoren funktioniert dieser Informationsaustausch in die umgekehrte Richtung. Die Signale `bMotorLiftEnable` und `nMotorLiftVel` sind in Unity einem Objekt zugeordnet, welches das Verhalten eines einfachen Antriebs hat. Wenn `bMotorLiftEnable` den Wert `TRUE` hat, wird der Antrieb aktiviert und über `nMotorLiftVel` kann dann eine Geschwindigkeit vorgegeben

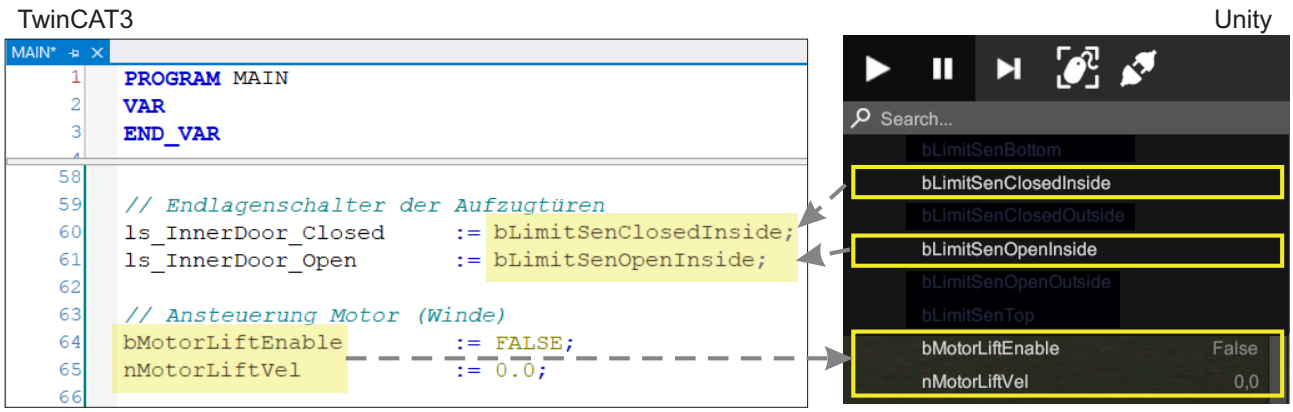


Bild 3: Informationsaustausch zwischen TwinCAT und Unity

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

werden. Im TwinCAT-Projekt existieren Variablen mit denselben Bezeichnern. Die Schnittstelle liest die Werte dieser Variablen aus und schreibt diese dann in die Signale in Unity, wodurch die Aktoransteuerung realisiert wird.

2.4 3D-Simulation der virtuellen Anlage

Das mit Unity entwickelte Modell der virtuellen Anlage kann in der Laufzeitumgebung von Unity direkt ausgeführt werden und in einer 3D-Visualisierung entweder auf einem normalen Bildschirm oder auf einer VR-Brille angezeigt werden. Interaktive Elemente wie z. B. Taster, können am Bildschirm mit der Maus bedient werden. Bei Einsatz einer VR-Brille können hierfür Touch-Controller verwendet werden. Die vollständig entwickelte virtuelle Anlage, inkl. der Verhaltensmodelle und Schnittstellen zu externen Steuerungen kann aber auch als ausführbare Datei erzeugt werden. Damit ist es möglich, die Simulation auf Rechnern zu starten, auf denen Unity nicht installiert ist und die Simulationen dennoch in vollem Umfang nutzen zu können. Dies ist insb. für die Verwendung der Modelle in online-Praktika wichtig, bei denen Studierende ggf. eigene Hardware verwenden. Diese ausführbaren Dateien sind keinen Lizenzbeschränkungen unterworfen und können daher beliebig oft kopiert werden.
Die Systemanforderungen für die Ausführung des fertigen Projekts orientieren sich an den Anforderungen von Unity. Für die Ausführung der Applikation wird ein Computer mit Windows 10 und einer Grafikkarte mit DirectX 10 oder besser benötigt. Als Entwickler-PC wird ein leistungsstarker Computer empfohlen, insb. wenn eine VR-Version entwickelt werden soll. Zur Orientierung folgt eine technische Beschreibung der Computer, die für die Entwicklung dieses Projekts verwendet wurden. 3D-Entwicklung: Intel Xeon E-2186M, NVIDIA Quadro P3200 6GB Grafikspeiche, 16GB DDR4 Arbeitsspeicher und VR-Entwicklung: Intel Core™ i9 9900K, NVIDIA GeForce RTX 2080 OC mit 8GB GDDR6 Grafikspeicher, 16GB DDR4 Arbeitsspeicher.

2.5 Benötigte Kompetenzen

Für die Entwicklung virtueller Systeme werden unterschiedliche Kompetenzen benötigt, die den Umgang mit Soft- und Hardware betrifft, die typischerweise nicht im klassischen Laborumfeld eingesetzt werden. Die benötigten Kompetenzen sind in der Tabelle 2 zusammengefasst wobei auch das aus Sicht der Autoren notwendige Niveau der Kompetenzerfüllung angegeben ist.

Tabelle 2: Für die Entwicklung einer virtuellen Anlage benötigte Kompetenzen

Soft- und Hardware	**Anwendung**	**Kompetenz**
Unity	Aufbau eines 3D-Modells der virtuellen Anlage durch pick&place von Objekten im virtuellen Raum	Erweiterte Grundkenntnisse
game4automation	Anwendung von Verhaltensmodellen und Implementierung einer Schnittstelle zu einer realen Steuerung	Erweiterte Grundkenntnisse
IDE für C#	u. a. Entwicklung eigener Verhaltensmodelle	Fundierte Kenntnisse
SPS oder Industrie-PC	Laufzeitumgebung für die entwickelte Automatisierungssoftware	Grundkenntnisse
IDE für SPS-Programmierung	Erstellen eines Templates für ein SPS-Projekt, das mit den Signalen der virtuellen Anlage verbunden werden kann	Grundkenntnisse
VR-Brille	Darstellung der Simulation in der virtuellen Realität	Erweiterte Grundkenntnisse

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2.6 Kosten und Dauer der Entwicklung

Die Dauer der Entwicklung ist stark abhängig von der Komplexität des Projekts und den Vorkenntnissen des Entwicklers. Für das hier beschriebene Beispielprojekt des virtuellen Aufzugs wurden insg. ca. 100 Arbeitsstunden investiert. Eine Einarbeitungszeit in die benötigte Soft- und Hardware ist hierin nicht enthalten. Die Summe der Investitionskosten beläuft sich auf ca. 4400 EUR. Diese teilen sich wie folgt auf: 700 Euro Lizenzgebühren für game4automation, 2.500 EUR für den Entwicklungsrechner, 1.200 EUR für VR-Brille. Wiederkehrende Kosten fallen nicht an.

2.7 Erweiterbarkeit der Anlage

Ein großer Vorteil von virtuellen Anlagen gegenüber realen Laboranlagen ist, dass diese schnell und einfach erweitert werden können. Um dies zu verdeutlichen, sind bei dem Beispiel der virtuellen Aufzugsanlage mehrere Erweiterungen vorgenommen worden. In einem ersten Schritt wurde die Anzahl der Stockwerke, zwischen denen der Aufzug verfährt, verändert. Dazu wurde zunächst ein Stockwerk als ein Modul konfiguriert, das dann in der virtuellen Umgebung per copy&paste vervielfältigt werden kann. Der zeitliche Aufwand für die Zusammenfassung aller Elemente eines Stockwerks zu einem Modul beträgt dabei ca. 30 Minuten und das Kopieren der Stockwerke kostet dann jeweils nur wenige Minuten.
In einem zweiten Schritt wurde in der virtuellen Aufzugsanlage ein weiterer Aufzugsschacht mit einem Fahrkorb durch Kopieren des ersten Schachts hinzugefügt. Der zeitliche Aufwand für diese Erweiterung beträgt ca. 30 Minuten. Der Zweck einer solchen Erweiterung kann sein, die Komplexität der Anlage zu erhöhen und damit die Herausforderungen an einen Steuerungsentwurf erhöhen, da in diesem System eine Koordination zwischen den Aufzügen erforderlich ist.
Diese beiden Erweiterungen deuten an, dass eine Anpassung einer virtuellen Anlage an neue Lehrinhalte oder geänderte Lernziele mit geringem Aufwand und Kosten möglich ist. Ähnliche Änderungen an einer realen Versuchsanlage würden offensichtlich einen deutlich längeren Planungsaufwand erfordern und wären auch in der Realisierung um ein Vielfaches zeit- und kostenintensiver.

3 Anwendung der virtuellen Anlage im Praktikum

3.1 Beispiel für eine Praktikumsaufgabe am virtuellen Aufzug

Im Folgenden wird ein Beispiel gegeben für eine mögliche Praktikumsaufgabe, bei der die hier hier erklärte virtuelle Aufzugsanlage eingesetzt wird. In der Aufgabe soll eine Ablaufsteuerung mit einer in der Lehrveranstaltung behandelten Entwurfsmethode für die Positionierung des Fahrkorbs eines Aufzugs entworfen und in der Programmiersprache ST auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung implementiert werden. Die theoretischen Grundlagen zu dieser Praktikumsaufgabe werden in dem folgenden Video erläutert: https://youtu.be/wDNiReGEZGs.
Mit der Aufgabe werden die folgenden Lernziele verfolgt: Die Praktikumsteilnehmer können

- die Spezifikation einer Ablaufsteuerung in Form eines UML-Zustandsdiagramms beschreiben,
- die Steuerung gem. dem entwickelten UML-Zustandsdiagramm in ST implementieren,
- Aktoren aus der Steuerung über Einzelsteuerfunktionen ansteuern,
- die Steuerung durch geeignete Testfälle an dem simulierten System experimentell erproben und
- die Entwurfsmethodik hinsichtlich des Aufwands und Nutzen gegenüber rein heuristischen Verfahren einschätzen und bewerten.

Das Ziel dieser Praktikumsaufgabe ist die Entwicklung eines Funktionsbausteins zur automatischen Positionierung des Fahrkorbs. Nachfolgend ist das Verhalten des gesteuerten Fahrkorbs beschrieben, das als Spezifikation der zu entwickelnden Steuerung zu verstehen ist.
Wenn der Aufzug wie in Abb. 1(a) dargestellt in OG1 halten soll, muss dieser so positioniert werden,

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

dass sich der mittlere Marker genau vor dem induktiven Sensor 1 befindet. Gleiches gilt für die Positionierung des Aufzugs in allen anderen Geschossen. Um den Komfort bei der Fahrt zu erhöhen, sollen Anfahrt und Abbremsen des Aufzugs mit verringerter Geschwindigkeit erfolgen. Dafür werden der obere und der untere Marker am Aufzug verwendet, was an folgenden zwei Beispielen erläutert wird: Im ersten Beispiel soll der Aufzug ausgehend aus der in Abb. 1(a) dargestellten Situation von OG1 nach EG fahren. Dabei werden die folgenden Schritte durchlaufen:

– Beim *Anfahren* fährt der Aufzug mit geringer Geschwindigkeit herab, bis der obere Marker am induktiven Sensor 1 erfasst wird. Danach beschleunigt der Aufzug auf normale (höhere) Geschwindigkeit.

– Sobald der untere Marker am induktiven Sensor 0 erfasst wird, beginnt das *Abbremsen*. Dafür wird die Geschwindigkeit des Aufzugs zunächst wieder verringert, bis der induktive Sensor 0 den mittleren Marker detektiert. Dann soll der Aufzug stehen bleiben.

Im zweiten Beispiel soll der Aufzug ausgehend aus der in Abb. 1 dargestellten Situation von OG1 nach OG3 fahren. Dabei werden die folgenden Schritte durchlaufen:

– Beim *Anfahren* fährt der Aufzug mit geringer Geschwindigkeit herauf, bis der untere Marker am induktiven Sensor 1 erfasst wird. Danach beschleunigt der Aufzug auf normale (höhere) Geschwindigkeit.

– Sobald der obere Marker am induktiven Sensor 3 erfasst wird, beginnt das *Abbremsen*. Dafür wird die Geschwindigkeit des Aufzugs zunächst wieder verringert, bis der induktive Sensor 3 den mittleren Marker detektiert. Dann soll der Aufzug stehen bleiben.

3.2 Varianten des Praktikumsaufbaus

Je nach verfügbarer Hardware, sind bei einem Praktikum unter Verwendung einer virtuellen Anlage, unterschiedliche Varianten des Aufbaus umsetzbar. Im Folgenden werden vier aufeinander aufbauende Varianten beschrieben. In jedem dieser vorgestellten Aufbauten ist eine Durchführung und Bearbeitung einer Praktikumsaufgabe, wie sie im vorherigen Abschnitt beispielhaft beschrieben wurde, möglich.
Die nachfolgend vorgestellten Varianten des Praktikumsaufbaus werden in Bild 4 in kompakter Form gezeigt. Die in dieser Abbildung dargestellten gestrichelten Linien sind Abgrenzungen, innerhalb derer die Hard- und Software angegeben ist, die für die Umsetzung der jeweiligen Variante benötigt wird. Die Variante B ist also eine Erweiterung der Variante A, Variante C erweitert die Variante B und in der Varianten D wird sämtliche in der Abbildung gezeigte Hardware verwendet.
Für die Umsetzung der **Variante A** ist lediglich ein PC oder Laptop erforderlich, auf dem die Entwicklungs- und Laufzeitumgebung TwinCAT installiert ist und der die in Abschnitt 2.4 beschriebenen Anforderungen hinsichtlich der Darstellung der 3D-Visualisierung auf einem Monitor erfüllt.

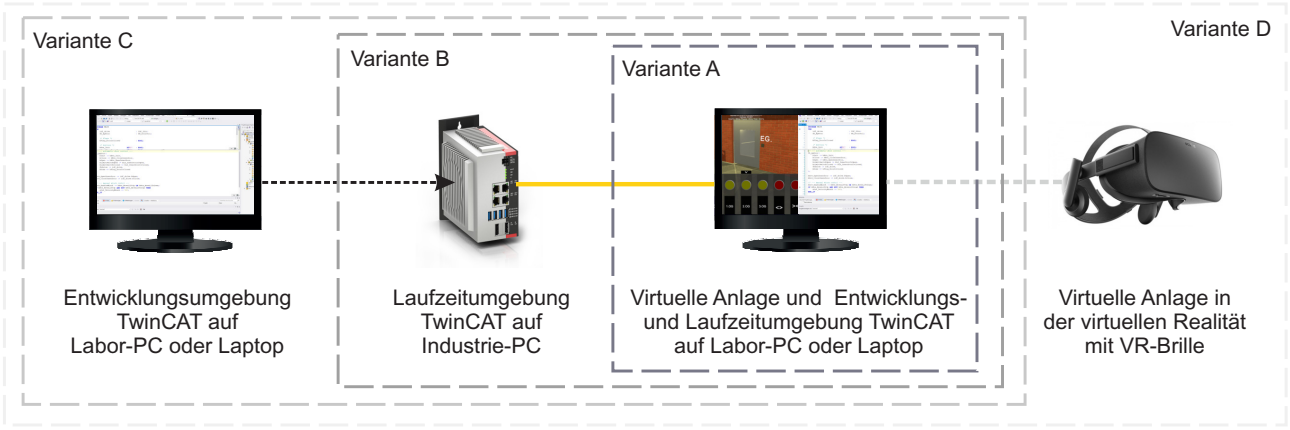


Bild 4: Varianten eines möglichen Praktikumsaufbaus

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

In der Entwicklungsphase kann die Steuerung also auf diesem Rechner entworfen und implementiert werden. In der Erprobungsphase werden dann die virtuelle Anlage als ausführbare Datei und die Steuerung in der Laufzeitumgebung TwinCAT gestartet. In der Simulation der virtuellen Anlage werden dann die Aktionen ausgeführt, die durch die Steuerung vorgegeben werden, wodurch ein Test der entwickelten Steuerung möglich ist. Diese sehr einfache Konfiguration des Versuchsaufbaus eignet sich z. B. für vorbereitende Aufgaben, die die Studierenden vor dem eigentlichen Praktikum lösen sollen oder für die Durchführung des Praktikums im vollständigen Distanzunterricht.
Wenn im Praktikum auch industriell eingesetzte Hardware der Steuerungstechnik verwendet werden soll, kann der Praktikumsaufbau – wie in **Variante B** gezeigt – um eine SPS oder einen Industrie-PC erweitert werden. Hierbei wird der Industrie-PC mit dem Entwicklungsrechner über ein Ethernet-Kabel (in Bild 4 gelb dargestellt) verbunden. Der wesentliche Unterschied zur Variante A betrifft die Erprobungsphase. Die auf dem PC oder Laptop entwickelte Steuerung muss nämlich zuvor auf den Industrie-PC geladen und dort gestartet werden. In der Simulation der virtuellen Anlage sind darüber hinaus keine Veränderungen der Einstellungen im Vergleich zu Variante A vorzunehmen.
Um den Workflow der Steuerungsentwicklung noch realitätsnäher zu gestalten, kann der Entwicklungsrechner (häufig auch als Engineering-Station bezeichnet) ein anderes Gerät sein, als der PC, auf dem die Simulation läuft, wie dies in **Variante C** dargestellt ist. Nach der Entwicklung und Implementierung der Steuerung muss der Code wieder auf den Industrie-PC geladen und dieser dann gestartet werden. In der Erprobungsphase kommt der Entwicklungsrechner dann nicht mehr zum Einsatz. Auf dem PC, auf dem die Simulation der virtuellen Anlage ausgeführt wird, muss in dieser Konfiguration TwinCAT nicht installiert sein. Der Vorteil der Trennung der Geräte für die Steuerungsentwicklung und die Ausführung der Simulation ist, dass der Entwicklungsrechner nicht die hohen Anforderungen an die Grafikleistung erfüllen muss. Daher können als Entwicklungsrechner ggf. auch private Geräte von Studierenden verwendet werden, was eine Vorbereitung der Implementierung der Steuerung (z. B. als Teil der vorbereitenden Aufgaben) möglich macht.
Die 3D-Visualisierung auf einem Monitor ist eine gute Möglichkeit, das Verhalten des gesteuerten System zu veranschaulichen. Darüber hinaus kann – wie in **Variante D** – die virtuelle Anlage aber auch unter Verwendung einer VR-Brille in der virtuellen Realität als echte 3D-Simulation erfahrbar gemacht werden. Dabei können sich die Studierenden im virtuellen Raum bewegen, das Verhalten der gesteuerten Anlage beobachten und empfinden den virtuellen Raum als „fast“ reale Praktikumsumgebung. Im Beispiel der Aufzugsanlage können die Studierenden u. a. die Bewegung des Aufzugs von Außen beobachten oder sogar im Aufzug mitfahren und hier die Taster bedienen, deren Funktionalität sie selber programmiert haben.
Die hier dargestellten Varianten des Praktikumsaufbaus stellen keine abschließende Aufzählung dar. So ist z. B. auch möglich die Variante A nur um eine VR-Brille zu erweitern, ohne dass ein Industrie-PC eingesetzt wird. Weiterhin kann natürlich auch eine Trennung der Geräte für die Entwicklung und Ausführung der Steuerung einerseits und die Ausführung der Simulation andererseits erfolgen, ohne Verwendung eines Industrie-PCs. Je nach Zielstellung des Praktikums kann also die Konfiguration des Aufbaus an die Aufgabenstellung oder sogar an die Phase der Durchführung (z. B. Entwicklungs- und Erprobungsphase) angepasst werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Bewertung der Vor- und Nachteile virtueller Anlagen

In dem Beitrag wurden einige Vor- und Nachteile virtueller Anlagen gegenüber realen Laboranlagen genannt und erläutert. Hier sollen diese Aspekte, die für oder gegen deren Verwendung sprechen nochmal zusammengefasst werden.
Virtuelle Versuchsanlagen haben aus folgenden Gründen einen besonderen Nutzen in der praktischen Ingenieursausbildung:

– Kurze Entwicklungszeiten mit geringen Investitionskosten

– Vernachlässigbarer Platzbedarf (nennenswert ist hier lediglich ein abgesperrter, freier Bereich, in

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

dem man sich mit einer VR-Brille bewegen kann)
- Einfach planbare, schnell umsetzbare und kostengünstige Erweiterungen, die eine Anpassung der virtuellen Anlagen an neue Aufgabenstellungen, überarbeitete Lehrinhalte und geänderte Lernziele möglich macht
- Mehrere Praktikumsgruppen können an Kopien derselben virtuellen Anlage zur gleichen Zeit arbeiten
- Vervielfältigungen und Verteilung Simulationsmodelle virtueller Anlagen sind möglich, da diese Dateien keinen Lizenzbeschränkungen unterliegen
- Einsatz in unterschiedlichen Varianten von Praktikumsaufbauen je nach verfügbarer Hardware möglich

Die Entwicklung und Anwendung virtueller Anlagen als Ergänzung bestehender Laboraufbauten birgt folgende Herausforderungen und Probleme:
- Laboringenieure benötigen neue Kompetenzen im Bereich der IT, die für den Betrieb „klassischer" Labore nicht notwendig sind
- Simulationsmodelle sind Idealisierungen der Realität, in denen unerwartete Störungen oder technische Fehler nicht vorkommen
- Visualisierungen des Verhaltens der automatisierten virtuellen Anlage an einem Monitor sind bei Weitem nicht so wertvoll, wie die Erfahrungen an realen Anlagen
- 3D-Simulationen in der virtuellen Realität bedingen Kompetenzen in der Inbetriebnahme und Anwendung von VR-Brillen

4.2 Vision zu der Zukunft der Laborpraktika

Aus aus der vorangegangenen zusammenfassenden Bewertung zur Verwendung virtueller Anlagen im Rahmen einer Ingenieursausbildung ist zu erkennen, dass es keine Argumentation exklusiv für oder wider Praktika mit virtuellen Laboranlagen gibt. Vielmehr können diese Art der Anlagen eine sinnvolle Ergänzung der bestehenden Laborinfrastruktur sein. Diese Einschätzung wird sich auch in Zukunft mit einer zunehmenden Digitalisierung der Lehre nicht verändern, da die praktischen Erfahrungen mit realen Anlagen unersetzbar bleiben.
Dennoch ist es vorstellbar, dass virtuelle Anlagen zukünftig häufiger in Laborpraktika oder auch in Übungen im Rahmen von Lehrveranstaltungen mit seminaristischem Unterricht (z. B. in der im Abschnitt 3.2 beschriebenen Variante A) eingesetzt werden. Besonders interessant ist dabei, dass die als ausführbare Dateien exportierten Simulationsmodelle der virtuellen Anlagen lizenzfrei nutzbar sind und damit auch zwischen Lehrenden ausgetauscht werden können. Sollten also unterschiedliche Entwickler virtueller Anlagen (z. B. an verschiedenen Hochschulen) die Bereitschaft haben, diese Entwicklungen freizugeben, könnte zukünftig eine Plattform zum Austausch virtueller Anlagen entstehen.

5 Literatur

[1] E. Kucera, O. Haffner und R. Leskovský, „Interactive and virtual/mixed reality applications for mechatronics education developed in unity engine", 2018 Cybernetics Informatics (K&I), 2018, S. 1–5.
[2] C. G. Lee und S. C. Park, „Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems", Journal of Computational Design and Engineering, 2014, S. 213-222.
[3] M. E. Macías García, A. A. Cortés Pérez und A. R. Izaguirre Alegría, „Cyber-Physical Labs to enhance engineering training and education", Int. Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2020, S. 1253–1269.
[4] G. Reinhart und G. Wünsch, „Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems", Production Engineering, 2007, S. 371–379.
[5] R. Stark, T. Damerau und K. Lindow, „Industrie 4.0 – Digitale Neugestaltung der Produktentstehung und Produktion am Standort Berlin", Industrie 4.0 grenzenlos, 2016, S. 169–184.
[6] J. Wang et al., „Simulation and visualization of industrial processes in unity", Conference on Summer Computer Simulation (SummerSim '15), 2015, S. 1–7.

Open Access. © 2022 M. Othman, C. Stöcker
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Development of an application for teaching PLC and robot programming based on OPC UA

C. Zieringer[1], Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg[2], F. Schneider[3]

Abstract

This paper describes the development of a proof-of-concept application, which can be used to train people in the field of programmable logic controller (PLC) and robot programming. This concept leads to a better understanding, what kind of infrastructure and software packages can be combined, to not only have a visual representation of an industrial like scenario, but also the possibility to use commonly established programming environments such as TIA Portal, to set up a PLC program. In addition, it provides insights on how OPC UA can be used and is suitable for controlling a typical six-axis industrial robot with the help of a PLC.

Keywords

Unity3D, TIA Portal, S7-PLCSim Advanced, OPC UA, Industry 4.0, PLC, gamification, serious games

1 Introduction

The industry is undergoing a significant transformation regarding the way we produce products thanks to the digitalization of manufacturing. This fourth revolution is so compelling, that it is being called Industry 4.0 (i4.0). This revolution is based on the connection of computers to communicate with one another. A combination of cyber physical systems (CPS), the Internet of Things (IoT) and the Internet of Systems (IoS), makes this transition become possible and the smart factory a reality.[1] The characteristics of a smart factory, which are visibility, connectivity and autonomy, are achieved through an extensive use of IoT sensors and devices, to connect the plant internally and with other entities in the digital supply network [2]. So called digital twins, which act as a mirror of the real world, become a central concept in those smart factories. By using such digital representations, together with intelligent algorithms, organizations can achieve data driven operation monitoring, simulation, predicting and optimization of physical manufacturing systems and processes.[3] With the emergence of such technologies, there is also responsibility for the extent to which this affects or adversely affects the supply-chain industries. Some experts point to a risk of inequality developing in society - those providing purely labour will become dispensable, while those who provide intellectual and physical capital are the biggest beneficiaries.[4] A possible help could be new platforms for independent or guided learning of the core concepts of this revolution. With the emerge of i4.0 and the enhanced connectivity of machines and devices, there was a new educational paradigm created, called Education 4.0 (e4.0), which builds on learning by doing and intends to address the needs and potentialities of the fourth industrial revolution. E4.0 occurs in complex virtual learning environments (VLEs), where there is a greater need to have interactive and collaborative educational components. A key point in the addition of VLEs is the technological dimension. In this sense, the use of emerging technologies

1 TriCAT GmbH
2 Hochschule Heilbronn
3 TriCAT GmbH

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

such as robotics and virtual reality (VR) emerge as educational practices in pioneering projects.[5] Using these technologies, a specialized application to train people from around the globe in the field of i4.0 is possible to develop. Therefore, this research contribution, which arose as part of a master's thesis at Heilbronn University in cooperation with TriCAT GmbH, deals with one possible method for developing such an application.

2 Concept of the Application

The concept of the application can easily be split into two larger parts. The information or data layer, that contains logic and communication, and the operating layer through which the application can be coordinated and controlled. The data layer determines the structure of the infrastructure and will be seen and named as such in the following. The operating layer corresponds to a user interface with graphic elements.

2.1 Infrastructure

The basic concept was developed in such a way, that it can meet the requirements of professional PLC training. It should therefore be possible to use software that is also widely used in industry. Also, the simulation should only differ slightly from reality. So, the choice fell on the PLC programming environment TIA Portal V15.1 [6] in interaction with the PLC emulation S7-PLCSim Advanced v2.0 SP1 [7]. The emulation provides a software PLC on which the programs created in TIA Portal can be loaded and executed. In addition to that, there is also the possibility to use the API [8] to interconnect with any co-simulation. This allows sending data, like in- and outputs, or commands, like start and stop, back and forth from the PLC to the simulation environment. As a central framework or in that manner a co-simulation, Unity3D [9] was used. Its openness makes it possible to combine different software packages with the typical characteristics of a game engine. Within the game engine, the user interface, different devices like sensors, robots, grippers and conveyer belts were realized. Those devices can be placed freely in the scene to let trainees create scenarios on their own. The sensors serve as inputs to the PLC, whereas the actuators such as the motors of the conveyer belts serve as outputs. With that alone, it's already possible testing simple PLC programs. To go one step further, as already mentioned, robots are integrated which send and receive data and commands to or from the PLC via OPC UA. For this purpose, the .NET OPC UA SDK of Unified Automation [10] is used, which creates a Namespace for each robot and each gripper placed in the scene, on one common server running directly in the Unity3D framework. The software PLC establishes a client connection to this OPC UA server. With the help of ready to use data blocks [11] within TIA Portal, the robots and grippers can be logically included into the PLC program. The resulting concept is shown using the following simplified diagram.

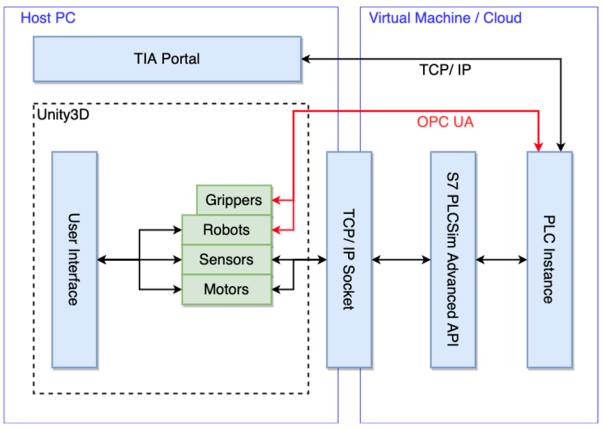


Figure 1 : Infrastructure of the application

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2.2 User Interface

The application should be based on widely used interface interactions, to easily navigate and operate. So, there is a Drag & Drop menu created to drag out the different modules like conveyer belts, sensors and robots with different grippers attached. Additionally, there is a menu to start and stop the other components used, like the PLC and the OPC UA server. The user can configure the server and the PLC emulation by typing in an IP address or give the PLC instance a name, under which it can be found again in the network. Furthermore, a feedback interface was integrated to give the user all kinds of information like the status of the server, or the started PLC and the messages sent to the virtual machine. There is also a message box on the top of the screen which informs the user about certain errors or warnings and provides support by showing tooltips. To program the built industry example, there should also be a list where all the in- and outputs of the sensors and motors, which communicate with the PLC, are listed in a tag menu with their respective value. There may also be the option to set these values manually to true or false, to quickly test the built system. To prevent the necessity of rebuilding the scene and arrange every object from scratch, a saved scene can be loaded again. The operator should also be able to decide whether the menu is expanded or hidden, to have a wider range of view. To have objects for interaction, there is a short menu to spawn objects, like boxes or plates, on a designated spot the user can decide.

3 Method

First, the planned modules were created and prepared for import into Unity3D. If a skeleton is required to implement inverse kinematics (IK) as is necessary for the robot, this can be done using Blender or a comparable 3D modeling environment. As soon as the models are imported, a gameobject can be generated, to which new properties or so-called components can be added. These components are then responsible for how they behave within the scene. In the case of the sensors, they are responsible for exchanging data. The data is sent via TCP /IP connection to the virtual machine if the sensor detects an object. This data is transferred to the memory of the PLC instance via the S7-PLCSim API. The program created by the user then decides how the data will be processed. The sensor can be logically connected to a motor on a conveyer belt. The conveyer belt will receive the corresponding command in the next update cycle and then behave accordingly. This easy method can be transferred to other modules, depending on whether the module is to be defined as an input or an actuator. This relationship is illustrated in the following diagram.

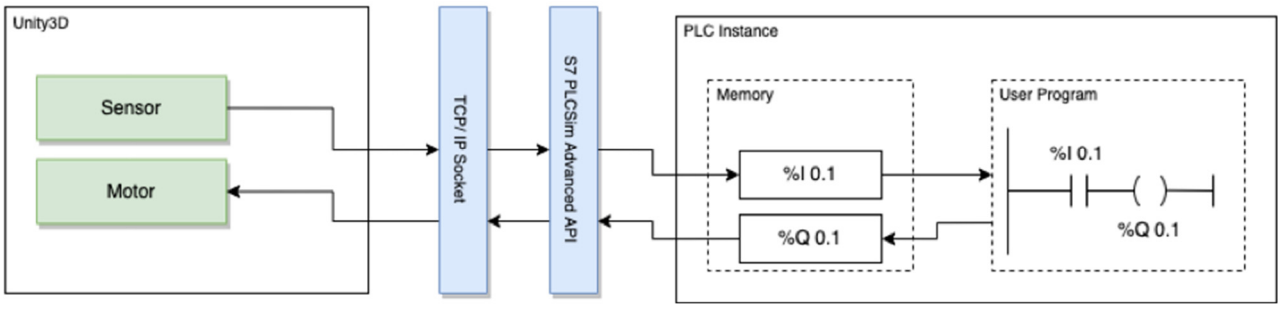


Figure 2 : Basic communication of the modules and the PLC instance

As already mentioned above, the robot needs IK for a more convenient operation. Later, the movement can only be defined via the tool center point (TCP), which defines the end point of the kinematic chain. The individual members will then align themselves accordingly. For solving the IK, a Unity Asset called FinalIK[12] was used as the IK solver. The grippers were animated, because they only have very simple

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

clamping movements. In addition to use these modules in the application, the robots and grippers receive components that automatically create an OPC UA server, which contains the corresponding information models. The information model the robot can be taken from the specifications of the OPC UA Foundation [13]. The namespace of common grippers was still in development phase up to this point, but an actual state of the current development provided insights about the final structure. A newer source is available under [14]. A state machine forms the core concept of the operation and control of the gripper as well as the robot. A short extraction from the specification describes this in more detail.

Table 1 : Description of the state machine

Transition	Name	Cause
1	HaltedToReady	Reset Method
2	ReadyToRunning	Start Method
3	RunningToHalted	Halt Method or Internal Error
4	RunningToReady	Internal
5	RunningToSuspended	Suspend Method
6	SuspendedToRunning	Resume Method
7	SuspendedToHalted	Halt Method
8	SuspendedToReady	Internal
9	ReadyToHalted	Halt Method

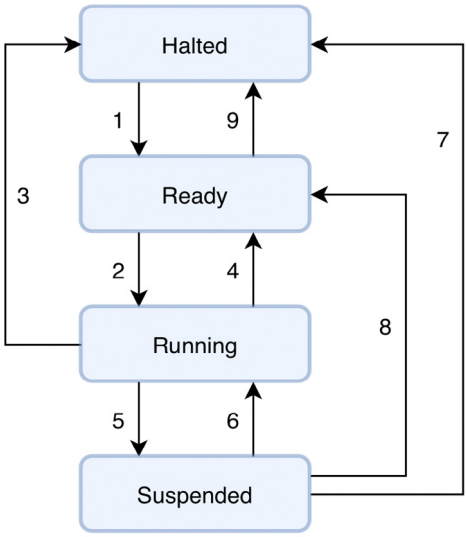


Figure 3 : The state machine as described in the specification [15]

As with the idea of a state machine, there is already a scientific paper [16] on how this state machine can be used to control robots from different manufacturers by a skill-based approach. According to Profanter et al., one major requirement for having generic hardware independent robot, tool and device skills is to use an adaptable underlying skill model. In their view, a skill is a specific piece of functionality which is provided by a hardware or software component. The proposed Information Model of a SkillType that fulfill all the requirements Profanter et al. thought of, can be seen in the extracted diagram.

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

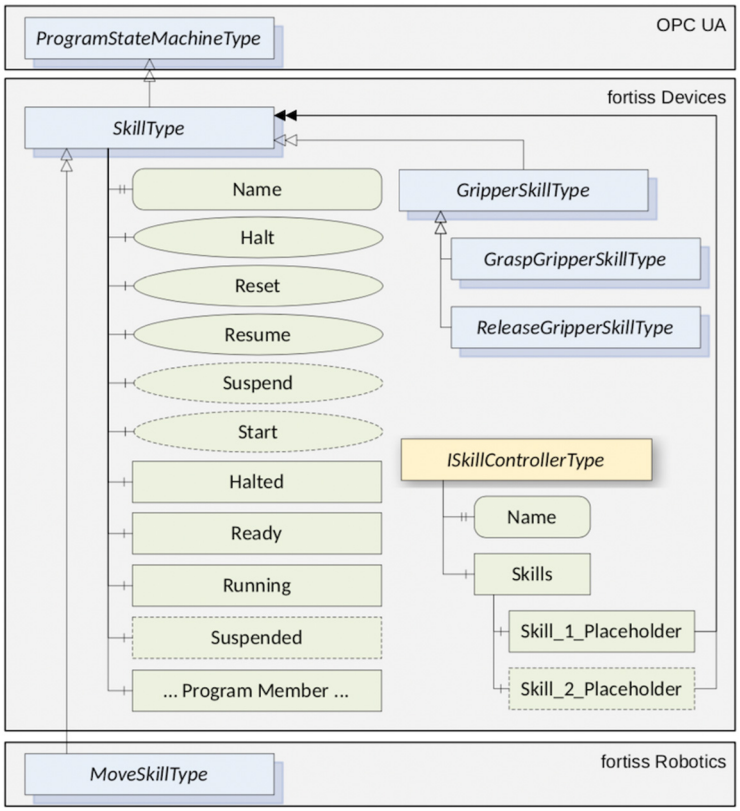


Figure 4 : Description of a SkillType [16]

This concept is used to create routines for different devices. For example, defining PTP movements for the robot or close and open operations for the gripper. The state machine can then be controlled using various methods such as start, stop or pause. Any parameters can also be transferred to this method, in the example of a PTP movement, these can be coordinates, the value of blending points or the speed. Different methods of different devices can also be linked together, through the precise information about the progress of the method. In addition, the idea here is to carry out entire operations such as pick & place tasks [16]. These methods can then be called by the PLC instance in the manner of the user program. To do this, the PLC instance connects to any server via a client and gives instructions to start or stop these methods. Ready-to-use data blocks can be inserted into a network of TIA Portal. The data blocks then are provided with the necessary information. The following diagram shows how the robot and the gripper were integrated into the application.

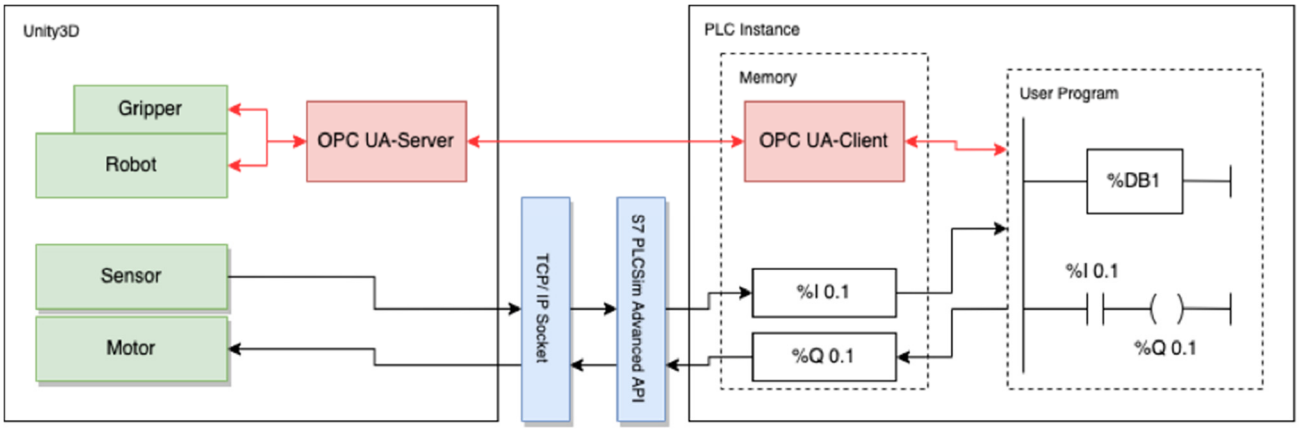


Figure 5 : Integration of the OPC UA components

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Outcome

The steps outlined in the previous chapters can be implemented in different ways regarding programming or design. They should just be seen as an overview of the different components that are necessary to create such an application with the specified interfaces. The interface of the application developed in this project is shown in the following picture. The numbering is used for description and is briefly summarized in the table below. The use of the software will be discussed afterwards

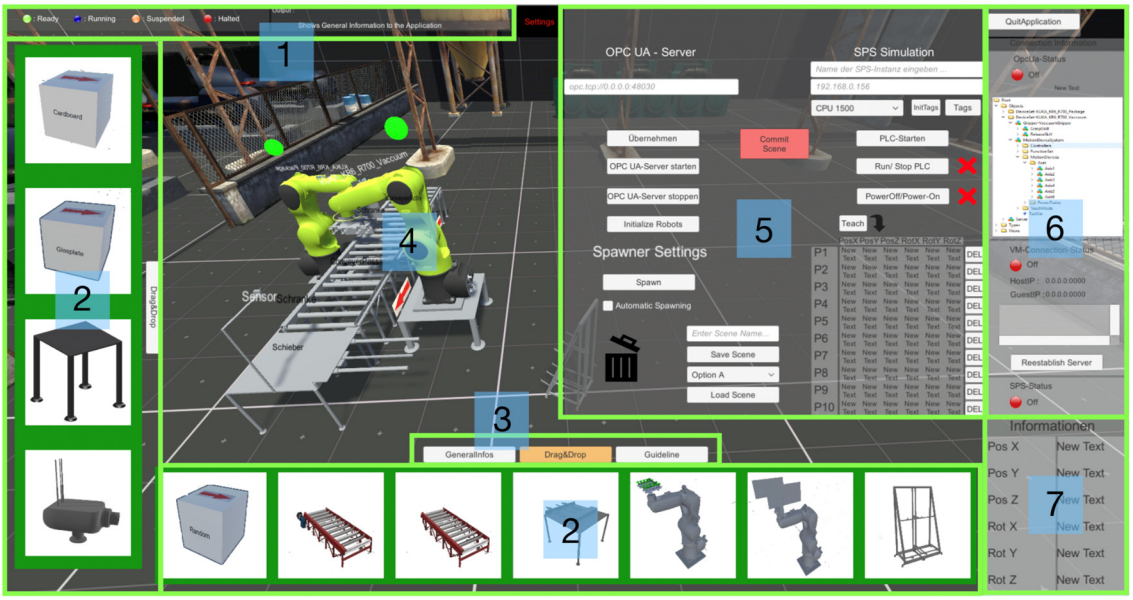


Figure 6 : Overview of the developed application

Table 2 : Explanation of the numbering

Nr.	**Description**
1	Meaning of the status colors, they indicate the respective status of the robot, plus additional message box.
2	The drag & drop menu, from here the individual modules can be dragged into the scene and can then be aligned.
3	Different tabs for further information or a guideline.
4	Field of view, the menu can be folded in and out to enhance the view.
5	Settings for the PLC instance, OPC UA server, save, load, delete, spawn objects or view the taught coordinates of the selected robot.
6	Feedback system to check the connection to the virtual machine or the OPC UA server.
7	Position of the selected object

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

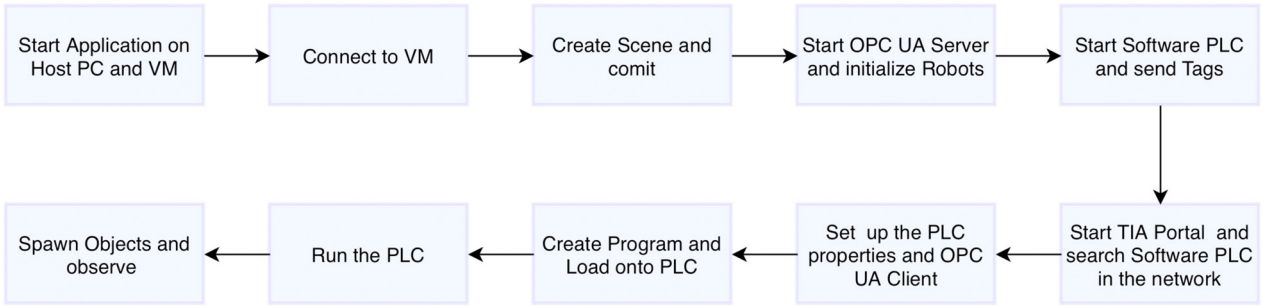


Figure 7 : General usage of the application

In the first steps, the entire infrastructure is started. This can also be prepared by the trainer, if one is available. Then the scene is created and all modules are prepared for data transmission. After that TIA Portal is connected to the created PLC instance and the OPC UA client is set up, it is best to use the wizard for this. The program can now be created, which is later loaded onto the PLC and run through. In order that the system can react to objects, these can be created by the user and transported by the conveyer belt. In the last step, the behavior of the system can be observed.

5 Evaluation

At the end of the work, there was also an evaluation performed with several probands. Due to unforeseeable external circumstances, no large-scale evaluation could take place. Therefore, it must be noted here, that the results of the subsequent survey may be biased, only probands from the immediate vicinity were considered, so the probability is high that the results are shifted to the positive. However, these people did not have any knowledge in the field of PLC or robot programming. The survey showed that the opinion about the application is rather mixed. This is due to the many small errors and malfunctions, but also because of the opacity of the communication. The answers show that the operators need even more support. For example, the infrastructure could be significantly simplified. The first steps to set it up, could also be automated in order to avoid additional sources of error. The results also show that an extended introduction can be very helpful for many beginners. Particularly regarding communication, there should be a detailed explanation on how and why things work, so it may be useful to teach the basics first and then move on to building and programming. There could also be a mission or level system that adapts to the corresponding skills of the trainee. This allows the students to learn independently and at their own pace. According to that a beginner or expert mode would also make sense. When it comes to programming with TIA Portal and the OPC UA data blocks, many find it not entirely plausible. As TIA Portal is a real expert tool for industrial use, beginner has a really hard time and almost no chance to understand the necessary steps right away. But controlling the robot with the help of a client with graphical interface, was considered very easy. This shows that at least a certain requirement must be met when dealing with TIA Portal in order to be able to use this application at all. Merely executing the OPC UA data blocks in a suitable sequence is then a rather minor hurdle. Nevertheless, many of the probands recognized the application as a benefit to traditional teaching and considered that this type of programming would play a greater role in the future. The opinion about the overall application is rather in the middle field. This is where the difficulty of operation, small errors in the program flow and errors in communication due to inadequately secured code play a role. However, it can be said that this is still a success. In order to get such an application ready for the market, many more steps must be taken, and things need to be simplified.

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

6 Conclusion

The project shows that the idea of a PLC trainings application included robots programmed via OPC UA is possible. With the help of the different used software packages and their APIs, a very complex and featurerich application can be produced. This application fulfils all the requirements to have a very industrial like PLC- and OPC UA training with only software solutions. With the ability integrating and combining the APIs with Unity3D, there can be a very extensive simulation carried out, to visualize the results of the PLC program. The application, as it is in the current state, leaves the user with many options as to what he or she wants to train. The scene can be created individually and all modules are independent of each other. In addition, the manual mode allows the user to try out different approaches and experiment a lot. Additional modules may be added during further development. Any robot can also be easily added since the programming is completely independent of the geometry and manufacturer of the robot. These things already make the application ready for first, smaller but meaningful tests, some of which have already been carried out. The knowledge gained from the tests can be used to continuously improve the application or, if necessary, to set it up again based on this work and the associated test results. These test results show that such an application requires more time and further considerations. The solution with the virtual machine has many sources of error and should be avoided if possible. Therefore, the structure would have to be completely redesigned and put more emphasis on more robust, synchronized communication. Other communication interfaces could also be tested, there one will surely come across other possibilities to expand the application usefully.

7 Future work

There are also other very interesting software packages from Siemens that can be integrated into this application. One would be TIA Portal Openess [17], with its API it is possible to create a whole TIA Portal project from code. It's so to say possible to support the user even further and to integrate different modes like the desired beginner mode. Another attempt would be to connect SIMIT [18] also from Siemens to the application. With SIMIT it is possible to carry out complex simulations. In addition, this software package can be coupled via a shared memory gateway [19] to other software such as Unity3D or using the software PLC instance established by S7- PLCSIM Advanced. In a further advanced, the idea of gamification could have further influence. For example, it is conceivable to create certain scenarios that are based on a field of activity or a task within the industry. After achieving this goal, a kind of reward could be activated, or access to even more complex modules. Furthermore, statistics can be implemented that record the progress of learning or the success of learning. Another algorithm could then suggest tasks to compensate the weaknesses and increase learning success. Another option would be to learn online with several people who can work on their ideas together on the same system and solve much more difficult tasks together. If the online access is then also enabled for experts, they can assess the result or provide assistance even from an exposed position.

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

8 References

[1] Bernard Marr : “What is industry 4.0? Here’s a super easy explanation for anyone”. In: *Forbes Magazine 2 (2018).*

[2] Margaret Rouse : “Definition : smart factory”. 2018. URL: https://searcherp.techtarget.com/definition/smart-factory (visited 13/12/2021)

[3] Yuqian Lu, Chao Liu, Kevin I-Kai Wang, Huiyue Huang and Xun Xu : “Digital Twin-driven smart manufacturing : Connotation, reference model, applications and research issues”. In : *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61 (2020), p. 101837.

[4] Trent Munro : “What you need to know about Industry 4.0”. 2016. URL: https://blog.matthews.com.au/what-you-need-to-know-about-industry-4-0/ (visited 13/12/2021)

[5] Fernando Almeida and Jorge Simoes : “The role of serious games, gamification and Industry 4.0 tools in the Education 4.0 paradigm”. In: *Contemporary Educational Technology* 10.2 (2019), pp. 120-136.

[6] Siemens AG : “TIA Portal”. URL: https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html (visited 13/12/2021)

[7] Siemens AG : “TRIAL Download SIMATIC S7-PLCSIM Advanced V2.0 SP1”. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/document/109758848/trial-download-simatic-s7-plcsim-advanced-v2-0-sp1?dti=0&lc=en-AE (visited 13/12/2021)

[8] Siemens AG : ”SIMATIC S7-PLCSIM Advanced : Co-Simulation via API”. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/document/109739660/simatic-s7%E2%80%91plcsim-advanced-co%E2%80%91simulation-via-api?dti=0&lc=en-AE (visited 13/12/2021)

[9] Unity Technologies : “Unlock your creativity” URL: https://unity.com/download (visited 13/12/2021)

[10] Unified Automation : “.NET Based OPC UA Client and Server SDK (Bundle)”. URL: https://www.unified-automation.com/products/server-sdk/net-ua-server-sdk.html (visited 13/12/2021)

[11] Siemens AG : “S7 user block for the OPC UA client of a SIMATIC s7-1500”. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/document/109762770/s7-user-block-for-the-opc-ua-client-of-a-simatic-s7-1500?dti=0&lc=en-AE (visited 13/12/2021)

[12] Unity Technologies : “Final IK”. URL: https://assetstore.unity.com/packages/tools/animation/final-ik-14290 (visited 13/12/2021)

[13] OPC UA Foundation : “OPC 40010-1 – UA for Robotics, Part 1 : Vertical Integration”. URL: https://reference.opcfoundation.org/Robotics/docs/ (visited 13/12/2021)

[14] Dr. Dirk Osswald, Patrick Zimmermann, Etienne Axmann : “OPC UA IAS Initiative”. In: *VDMA WebSeminar Series 21.07.2020.* URL: https://opcua.vdma.org/documents/26605244/49873132/OPC%20UA%20IAS_Web%20Seminar_21.07.20_1595411749536.pdf/d3588f54-a1cc-7898-142e-fb2dd88df775 (visited 13/12/2021)

[15] OPC UA Foundation : “OPC Unified Architecture Part 10 : Programs”. URL: https://reference.opcfoundation.org/v104/Core/docs/Part10/ (visited 13/12/2021)

[16] Stefan Profanter, Ari Breitkreuz, Markus Rickert and Alois Knoll : “A hardware-agnostic OPC UA skill model for robot manipulators and tools”. In: *2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA).* IEEE. 2019, pp. 1061-1068

[17] Siemens AG : “TIA Portal Openness : Introduction and Demo Application”. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/document/108716692/tia-portal-openness-introduction-and-demo-application?dti=0&lc=en-WW (visited 13/12/2021)

[18] Siemens AG : “Siemens SIMATIC SIMIT Simulation Platform (v10.0) Operating Manual”. URL: https://www.automation.siemens.com/sce-static/learning-training-documents/tia-portal/example-processes/sce-020-120-documentation-en.pdf (visited 13/12/2021)

[19] Siemens AG : “Siemens SIMIT 7 Shared Memory Gateway User Manual”. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/351/73136351/att_111459/v1/SIMIT_SHM_Gateway_e.pdf (visited 13/12/2021)

Open Access. © 2022 C. Zieringer, Prof. Dr.-Ing. C. Wittenberg, F. Schneider
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

3D VR Serious Games for Production & Logistics

A. Boden[1], A. Buchholz[1], M. Petrovic[1], F.J. Weiper[1]

Abstract

Within the Institute of Production of the University of Applied Science Cologne, TH Köln, the logistics IT group has initiated a new project for the 3D Virtual Reality digitization of logistics and manufacturing processes. The 3D Virtual Reality Serious Games learning environment is in accordance with the real physical model factory at the institute, where students of business engineering classes study and exercise the interdisciplinary processes of a whole manufacturing unit. On the basis of this project initiation within the institute of production we want to build and offer a widespread open-source standard framework for programming 3D VR Serious Games for Production & Logistics that can be used by other universities and industrial partners. A sneak preview of the game can be viewed in [1].

Keywords

Serious Game, 3D Virtual Reality, Production, Logistics

1 Introduction

The topic of 3D Virtual Reality in Industrial context has raised lot of interest in the past few years. One of the most promising application areas is the concept of 3D Serious Games in which on-the-job-trainings and advanced education in industrial context is performed with the help of 3D Virtual Reality games. By the immersive environment in which the trainee is placed to perform his training levels, not only the training performance is boosted by factors [2]. If we compare the results against traditional trainings, the virtual reality concept also can save time and resources to a large extend. Trainings can be performed without expensive real hardware training environments, machines, or production processes. The on-the-job-trainings can be performed without disturbance of the real production. Nonetheless trainings can easily be repeated, can be transferred to distributed training centers across the world. Finally, the training environments can easily be adapted to new scenarios and learning outcomes, since we do not need to change and arrange physical hardware but a software program only. The landscape for Serious Games in industry worldwide is growing rapidly, and because of the rationalism, the industry in any segment is adapting in very fast manner. For the entire 3D Virtual Reality scene, the market growth is measured in magnitudes of billions of Euros for the upcoming decades [3].

[1] Institute for Production, University of Applied Science Cologne, TH Köln

Open Access. © 2022 Boden, A. Buchholz1, M. Petrovic1, F.J. Weiper1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2 3D Serious Games for Production & Logistics

For university learning platforms serious games can also be very attractive. The logistics IT group of the University of Applied Science Cologne, TH Köln, has initiated a project for the 3D Virtual Reality digitization of logistics and manufacturing processes. The 3D Virtual Reality learning environment is in accordance with the real physical model factory, where students of business engineering classes exercise the interdisciplinary processes of a whole manufacturing unit [4].
Within the model factory there is installed on firsthand a fully equipped IT process that manages the entire flow from the customer request down to the production confirmation and product quality checks. The hardware equipment includes an automated storage device, a production line, CNC controlled milling machine, a laser-based gravure printer, a cutting machine, robotic arms for picking and material movement, a quality measurement work bench, a view of the plant can be seen in fig. 1.

Figure 1. Layout of the model plant at the Institute for Production at UAS Cologne, TH Köln. Further details can be found in [3].

The machinery is of high quality and very expensive industrial hardware. This means, that the students will need a lot of introductions, safety instruction, training, and exercises, before they can start the actual challenges of their lessons and courses. The new project now depicts in 3D Virtual Reality the entire hall with the equipment, and students have an excellent environment to study the entire manufacturing processes and machinery, before starting the hands-on exercises in the real physical world.
The 3D VR Serious Games are programmed on the basis of open-source standard frameworks. For the development of the Games we use the framework Unity [5] with the runtime environment Steam VR, components for the usage within the 3D Virtual Reality Game are being modelled with the 3D Graphics studio Blender [6]. For the 3D VR visualization high performance 3D VR glasses from HTC Vive Pro are being introduced.

Open Access. © 2022 Boden, A. Buchholz1, M. Petrovic1, F.J. Weiper1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

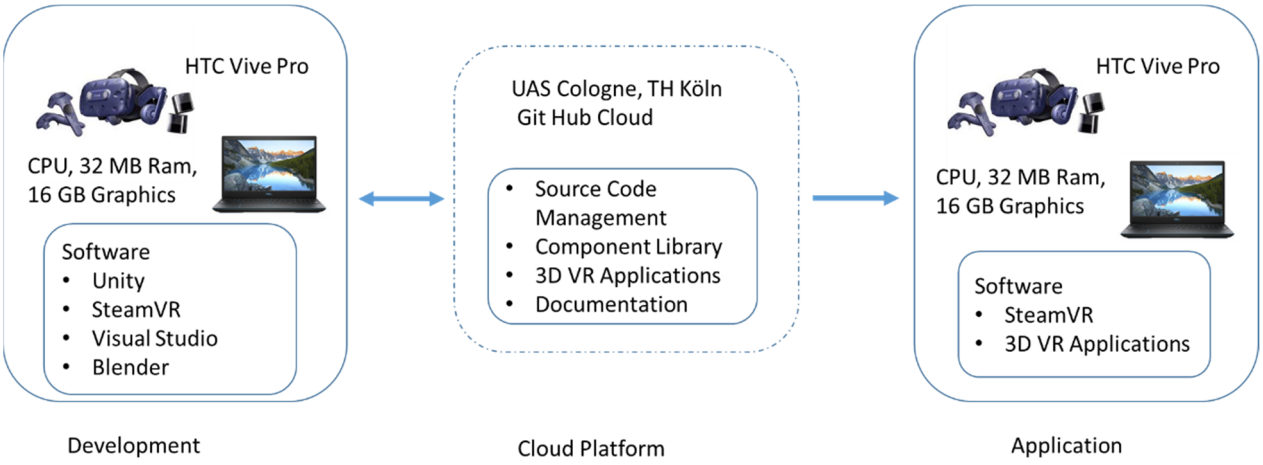


Figure 2. The Architecture for 3D VR Serious Games for Production & Logistics

In fig. 2 the chosen architecture for the 3D VR environment is depicted. The game includes the full production & logistics process, i.e. the IT workflow, safety instructions, instructions for the machinery & manual assembly steps, as well as the instruction for the automated storage device. Further within the 3D VR Serious Game audio streams and video clips are embedded for the sake of instructions and documentation. In the first phase of the project there is a scenario depicted, where different types of pumps (e.g. peristaltic & centrifugal pumps), are being manufactured. The workflow starts with order creation and confirmation. The next step is the material supply for the production out of the automated storage device, followed by the assembly of the pumps at a separate assembly work bench. Finally, the pumps are being tested on a quality measurement workbench. Fig. 3 depicts sample views from the 3D VR Serious Game.

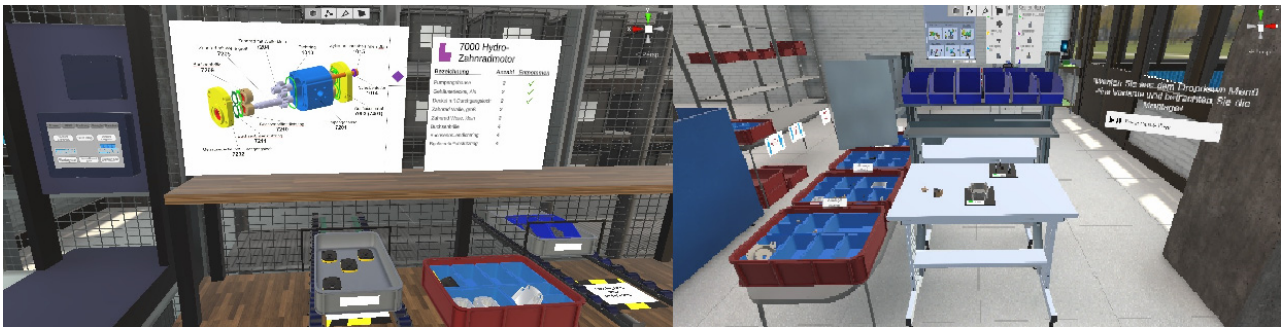


Figure 3. The picture shows details of the automated storage device (left), and the assembly workbench (right)

3 Outlook

On the basis of this project initiation within the institute of production we want to build and offer a widespread open-source standard framework for programming 3D VR Serious Games for Production & Logistics that can be used by other universities and industrial partners. We already have developed for the current programs at hand an extended library of components to be used, like machines, production lines, desktops, cases, shelfs, storage device, pumps, screws & nuts, tools, meters, etc... to depict realistic manufacturing scenes. With the help of CAD software and procedures in 3D graphics suites like Blender, we will integrate more and more components for the usage within new scenarios. On top

Open Access. © 2022 Boden, A. Buchholz1, M. Petrovic1, F.J. Weiper1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

of that we have a library of patterns, for example to steer the workflows, to interact with hand controllers, or to include audio streams and videos for instructions. Finally, there is a refined organization of the whole development environment that enables new developers to easily step into the framework and start developing new scenarios for other processes in Production & Logistics context. In a next step we will include the possibility of online interfaces with the real-world equipment to capture data also from the physical processes. By that, we will enter the research area of remotely controlled automated processes. This new field will need additional routines, new organizational structures within the framework, and a high-speed industrial framework for standardized interfaces.

4 Literature

[1] A. Boden, F.J. Weiper, TH Köln VR Modellfabrik, https://youtu.be/N7ZzIA31co8, 2021
[2] S. Kaczmarek, M. Henke, Gamification in der Logistik. Huss-Verlag GmbH, 2017; R. Dörner, S. Göbel, W. Effelsberg, J. Wiemeyer, (eds.). Serious Games: Foundations, Concepts and Practice. Springer 2016
[3] PWC, German Entertainment & Media Outlook 2019 – 2023, Virtual Reality in Deutschland, 2019
[4] Model Factory at the UAS Cologne, TH Köln, https://www.th-koeln.de/en/automotive-systems-and-production/modellfabrik-model-factory_72685.php, 2020
[5] T. Theiss, Einstieg in Unity, Rheinwerk Verlag, 2021
[6] O. Baechler, X. Greer, Blender 3D by Example, Packt Publishing 2020

Open Access. © 2022 Boden, A. Buchholz1, M. Petrovic1, F.J. Weiper1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation zur Schulung technischer Fachkräfte im Maschinen- und Anlagenbau

Jana Hönig [1], Marc Schnierle [1], Camilla Wehnert [2], Daniel Littfinski [3], Christian Scheifele [4], Denis Pfeifer [4], Carlos Münster [5], Armin Roth [5], Julia Franz [2], Sascha Röck [1], Alexander Verl [3]

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) zur Schulung technischer Fachkräfte im Maschinen- und Anlagenbau vor. Die MRiLS koppelt die aus dem Engineering bereits vorhandenen Modelle der Hardware-in-the-Loop Simulation (HiLS) mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality (MR) und integriert dadurch den Nutzenden und dessen Verhalten sowie die reale Umgebung vollständig in den Simulationskreislauf. Der Beitrag thematisiert neben der notwendigen Middleware zur Kopplung der HiLS mit der MR-Umgebung auch die Steuerungsbelastung durch Multiuser-Zugriffe. Die Funktionsfähigkeit des vorgestellten Konzepts wird anhand eines ausgewählten beispielhaften Automatisierungssystems belegt. Für das Automatisierungssystem wird der Aufbau der MRiLS sowie das Konzept für den Ablauf einer Schulung mittels MRiLS vorgestellt.

Stichwörter

Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation, Digitaler Zwilling, Mixed Reality, Augmented Reality, Virtual Reality, Hardware-in-the-Loop Simulation, Schulung, Maschinen- und Anlagenbau

1 Formen der Wissensvermittlung im Maschinen- und Anlagenbau

Der Maschinen- und Anlagenbau ist durch steigende Automatisierungsgrade, komplexe Prozessabläufe und eine zunehmende Vernetzung von Maschinen und Anlagen charakterisiert. Durch die somit wachsende Komplexität sowie vor dem Hintergrund des Fachkräftemangels kommt der Aus- und Weiterbildung technischer Fachkräfte eine zentrale Rolle zu.
Schulungen im Maschinen- und Anlagenbau erfolgen bislang vorwiegend an der realen Anlage und werden bei ausgewählten Lernszenarien um virtuelle Lerngegenstände (z.B. Webbased Trainings, Remote-Schulungen oder PC-basierte Schulungen vor Ort) ergänzt (siehe Bild 1).

1 Virtual Automation Lab, Fakultät Maschinen und Systeme, Hochschule Esslingen
2 Professur für Erwachsenenbildung und Weiterbildung, Otto-Friedrich-Universität Bamberg
3 Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart
4 ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH
5 Roth Steuerungstechnik GmbH

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

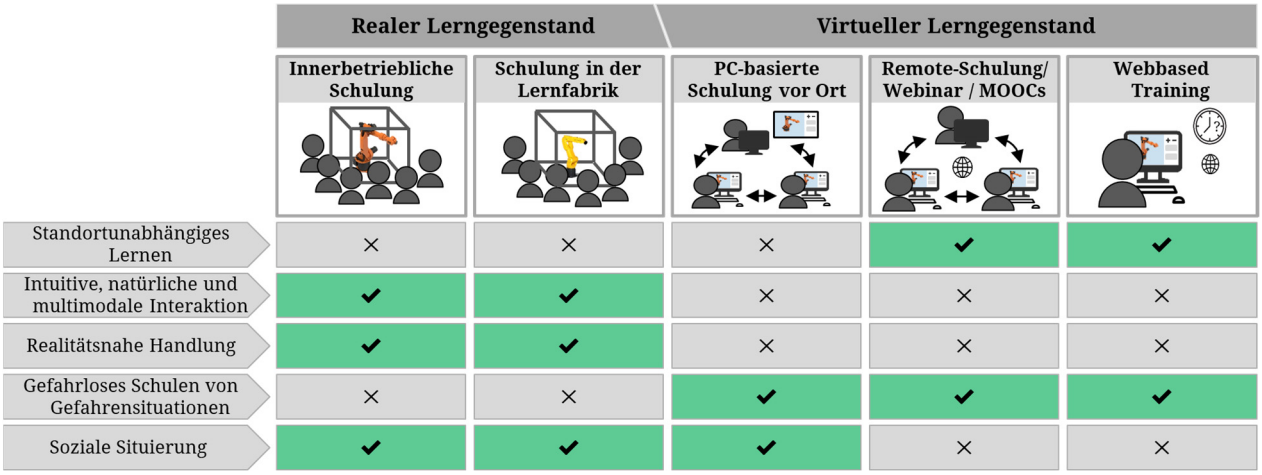


Bild 1: Methoden und Formen der Wissensvermittlung im Maschinen- und Anlagenbau (vgl. [1])

Die bislang eingesetzten Formen der Wissensvermittlung sind insbesondere im Hinblick auf die Interaktion zwischen Mensch und Maschine stark limitiert sowie beim Lernen an der realen Anlage mit Hemmnissen, Gefahrenpotenzialen und einer Standortgebundenheit verbunden. Standortunabhängige Methoden (z.B. Webbased Training) sind hingegen durch eine fehlende soziale Situierung sowie eine mangelnde Realitätsnähe der Handlungen geprägt.
Moderne Mixed Reality Technologien können an diesen Defiziten ansetzen und durch eine egozentrische standortunabhängige Visualisierung sowie eine multimodale Interaktion vielfältige Potenziale für neue Schulungsformate ermöglichen. Milgram et al. [2] beschreiben die Mixed Reality (MR) als stufenlose Kombination von virtuellen und realen Komponenten in einem gemeinsamen Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum. Entsprechend dem Verhältnis von realen und virtuellen Inhalten wird dieses Kontinuum in vier Kategorien unterteilt. Während die reale Umgebung (RE) ausschließlich physisch existierende Komponenten enthält, ist die Virtual Reality (VR) komplett computergeneriert. Zwischen diesen beiden Extremformen gibt es gemischte Umgebungen, die sowohl reale als auch virtuelle Komponenten enthalten. Eine Augmented Reality (AR) Umgebung umfasst mehr reale als virtuelle Inhalte, während bei der Augmented Virtuality (AV) die Relation umgekehrt ist.
Bisherige Implementierungen für Schulungen in Mixed Reality (z.B. [3], [4]) bilden das Anlagenverhalten zumeist ohne Integration industrieller Steuerungstechnik zeitaufwändig nach, wobei durch die notwendige Abstraktion des Verhaltens eine geringe Modell- und Schulungstiefe resultiert.
Im Entwicklungsprozess des Maschinen- und Anlagenbaus entstehen demgegenüber bei den steuerungsgekoppelten Hardware-in-the-Loop Simulationsmethoden (HiLS) Maschinenmodelle mit hoher Modelltiefe (vgl. [3]). Während die HiLS durch die Kopplung einer Steuerungsausprägung mit virtuellen Anlagenkomponenten (Digitaler Zwilling) zwar eine hohe Modelltiefe ermöglicht, ist die Integration des Menschen in den Simulationskreislauf durch die exozentrische Visualisierung auf zweidimensionalen Computer-Monitoren sowie die Interaktion über Maus und Tastatur weiterhin stark limitiert.

2 Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS)

In diesem Beitrag wird die im Rahmen des MRiLS-Forschungsprojektes[6] erforschte Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) für die innerbetriebliche Schulung im Maschinen- und Anlagenbau vorgestellt.

6 Das Verbundprojekt „Hybrides Interaktionskonzept für Schulungen mittels Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation“ (Förderung durch Bundesministerium für Bildung und Forschung,

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

2.1 Allgemeiner Aufbau

Die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) baut auf der HiLS auf und integriert den Nutzenden und dessen Verhalten sowie die reale Umgebung durch die Kopplung der aus dem Engineering bereits bestehenden HiLS-Modelle mit Visualisierungs- und Interaktionsmethoden der Mixed Reality vollständig in die Simulationsumgebung (siehe Bild 2). Die MRiLS ermöglicht eine natürliche und an den menschlichen Sinnen orientierte Interaktion zwischen Nutzendem und Digitalem Zwilling, während die Integration der industriellen Steuerungstechnik das realistische Anlagenverhalten absichert.

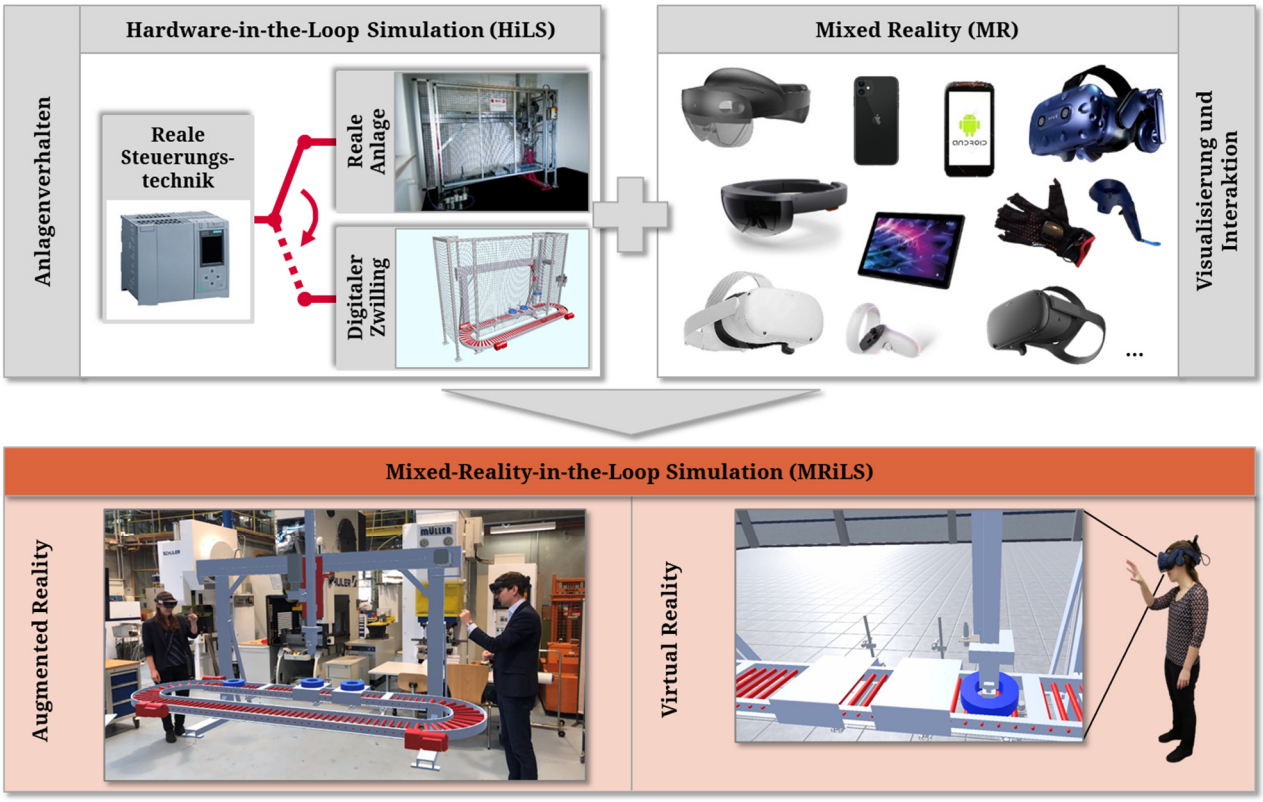


Bild 2: Aufbau der Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS)

Ein zentrales Kriterium für die vollständige Integration des Menschen in den HiLS-Kreislauf und somit für die Schulung technischer Fachkräfte mittels MRiLS ist die Immersionsfähigkeit des Systems sowie das daraus resultierende subjektive Präsenzgefühl des Nutzenden. Das Präsenzgefühl beschreibt das (psychologische) Gefühl des Nutzenden, sich tatsächlich innerhalb der bereitgestellten mediatisierten Welt zu befinden (vgl. [6], [7]). Daraus ergeben sich folgende Leitziele für die MRiLS (vgl. [8]):

– **Egozentrische Visualisierung:** Die Bereitstellung der virtuellen Komponenten erfolgt in egozentrischer (vom Benutzer abhängiger) Perspektive, so dass der Nutzende diese dreidimensional im Raum betrachten kann.

Fkz.:16SV8344 - 16SV8348) wird von den industriellen Projektpartnern ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH und Ingenieurbüro Roth GmbH & Co. KG mit den wissenschaftlichen Partnern Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Professur für Erwachsenenbildung und Weiterbildung, Universität Stuttgart, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) und Hochschule Esslingen, Virtual Automation Lab (VAL) durchgeführt. Die gewerblichen beruflichen Schulen des Landkreises Esslingen Max-Eyth-Schule Kirchheim, Friedrich-Ebert-Schule Esslingen sowie die Philipp-Matthäus-Hahn Schule Nürtingen sind als assoziierte Partner involviert.

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

- **Intuitive multimodale Mensch-Modell-Interaktion:** Der Nutzende kann intuitiv und multimodal mit den virtuellen Komponenten interagieren und erhält eine umfassende Rückmeldung durch Erzeugung synthetischer Stimuli für alle relevanten Sinne (z.B. visuell, haptisch, auditiv).
- **Kopplung realer und virtueller Komponenten:** Die realen und virtuellen Anlagenkomponenten werden in einer gemeinsamen Umgebung visualisiert und beeinflussen sich gegenseitig, so dass das Realitäts-Virtualitätskontinuum vollständig umfasst wird.
- **Multiuser-Kollaboration:** Mehrere Nutzende können mit den virtuellen Komponenten kollaborativ in einer gemeinsamen Umgebung standortunabhängig interagieren und in dieser Umgebung intuitiv miteinander kommunizieren.

2.2 Multiuser und Steuerungsbelastung

Die Multiuser-Kollaboration erfordert neben der Kommunikation zwischen mehreren Schulungsteilnehmenden untereinander auch die Kommunikation zwischen den unterschiedlichen Schulungsteilnehmenden und der angebundenen Hardware-in-the-Loop Simulation zum Austausch der Zustands- und Interaktionsdaten. Die Zustandsdaten der HiLS sowie der daran angekoppelten Steuerungstechnik müssen dabei an alle Schulungsteilnehmenden verteilt werden, wodurch im Vergleich zu einem Single-Userzugriff mit steigender Teilnehmendenzahl der Kommunikationsaufwand sowie die Auslastung der Steuerung steigt. Zeitgleich müssen auch die Interaktionsdaten (z.B. Manipulation der Position einer virtuellen Komponente) der einzelnen Nutzenden an die HiLS übermittelt und entsprechend ausgewertet werden.
Der wachsende Kommunikationsaufwand bei steigender Anzahl der Nutzenden limitiert somit bei einer direkten Anbindung der Endgeräte an die HiLS die Skalierbarkeit der Teilnehmendenzahl beziehungsweise die möglichen Kommunikationstakte zwischen HiLS und Nutzenden. Eine Reduktion des Kommunikationstaktes kann bei dem Nutzenden zu einer wahrnehmbaren Verzögerung beim Verhalten des Digitalen Zwillings (z.B. bei Interaktionen) führen. Diese wahrnehmbaren Verzögerungen können eine fehlende Plausibilitätsillusion (z.B. Ausführung einer Manipulation eines virtuellen Objektes führt nicht bzw. zu einer verspäteten Manipulation) hervorrufen, wodurch ein Bruch im Präsenzgefühl entstehen kann.
Als Lösung für die Steuerungsbelastung durch die Multiuser-Kollaboration wird für die MRiLS eine Middleware zur Kopplung der HiLS-Modelle mit den Mixed Reality-Endgeräten vorgeschlagen (vgl. [9]). Bild 3 zeigt das Konzept der Middleware, die zugleich der Kopplung der Nicht-Echtzeit-Umgebung der Mixed Reality-Endgeräte mit der Echtzeit-Umgebung der HiLS dient.

Bild 3: Middleware zur Kopplung von Mixed Reality Endgeräten und Hardware-in-the-Loop Simulationen

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

Die Nutzenden koppeln sich über das jeweilige Endgerät (z.B. Augmented Reality-Brille, Virtual Reality-Brille, Tablet, etc.) an die Middleware und tauschen über gängige Technologien aus den Bereichen Web und Cloud (z.B. WS, HTTP) Live-Daten der MRiLS sowie die auf dem Endgerät bereits abstrahierten Interaktionsdaten der Nutzenden (siehe auch [10]) mit der Middleware aus. Die Instanzen der HiLS verbinden sich über industrielle Kommunikationsprotokolle (z.B. OPC UA) ebenfalls mit der Middleware und erhalten die Sollwerte des Digitalen Zwillings, generieren daraufhin Istwerte und schreiben diese an die Middleware zurück. In der Middleware erfolgt die Auswertung der abstrahierten Interaktionsdaten der angebundenen Endgeräte, die Auslösung entsprechender Events sowie die Bereitstellung eines konsistenten Systemzustandes für alle Nutzenden auf Basis der eingehenden Daten (z.B. Istwerte der HiLS).
Durch die Integration einer Middleware erfolgt die Kommunikation der Endgeräte und der HiLS nicht mehr direkt, sondern die Daten werden gebündelt über die Middleware an die angebundenen Instanzen verteilt. Dies hat zur Folge, dass die Kommunikationslast im Vergleich zu einer direkten Verbindung sinkt und die Belastung der HiLS sowie der angekoppelten Steuerungstechnik bei gleichbleibender Anzahl der Nutzenden sinkt. Durch den Einsatz der Middleware sind damit eine höhere Anzahl an Teilnehmenden sowie ein höherer Kommunikationstakt möglich. Die Middleware ermöglicht zudem die Homogenisierung der Kommunikation zwischen Endgeräten und der HiLS, so dass nicht auf jedem Endgerät selbst das industrielle Kommunikationsprotokoll implementiert werden muss.

2.3 Potenziale und Mehrwerte

Der Einsatz der MRiLS bietet zahlreiche Potenziale für die Schulung technischer Fachkräfte im Maschinen- und Anlagenbau:

- **Präsenzgefühl des Nutzenden im Simulationskreislauf:** Die egozentrische Visualisierung durch AR/VR-Endgeräte und die damit verbundene multimodale Interaktion sowie die realitätsnahe Handlung der MRiLS ermöglicht ein hohes Präsenzgefühl des Nutzenden im Simulationskreislauf.

- **Flexible Bereitstellung des Lerngegenstandes:** Die Schulung mittels MRiLS kann standort-, endgeräte- als auch zeitunabhängig und somit entkoppelt von der realen Anlage stattfinden (z.B. vor Auslieferung der realen Anlage). Der Lerngegenstand kann dabei flexibel vervielfältigt werden, so dass jedem Lernenden ein eigener Lerngegenstand zur Verfügung steht.

- **Definierbare Fehlerszenarien:** Durch die Simulation des Verhaltens sowie die Anbindung an die reale Steuerungstechnik können Fehlerszenarien einfach reproduziert und ohne Gefährdung von Mensch und Maschine trainiert werden.

- **Unterstützung interaktiver Lernprozesse:** Die MRiLS eröffnet neue interaktive Lernprozesse und multimodale Lerneinheiten wie bspw. die maßstabsgetreue Visualisierung.

- **Kopplung realer und virtueller Anlagenkomponenten:** Die MRiLS ermöglicht die flexible Kopplung realer und virtueller Komponenten in einer gemeinsamen Umgebung, z.B. ein reales Bedienpanel zum Bedienen einer virtuellen Anlage in Augmented Reality.

- **Integration realer Steuerungstechnik:** Die MRiLS integriert bereits bestehende industrielle Steuerungstechnik sowie aus dem Engineering bereits vorhandene HiLS-Modelle, so dass keine aufwändige Nachbildung des Anlagenverhaltens für die Schulung in MR notwendig ist. Zudem kann durch diese Integration reale Hardware (z.B. ein reales Bedienpanel) flexibel in das Schulungsszenario eingebunden werden.

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

3 Anwendungsszenario

Im Rahmen des Forschungsprojektes MRiLS wird das zuvor vorgestellte Konzept der MRiLS für das beispielhafte Automatisierungssystem "Schulungslader" der Firma Roth Steuerungstechnik GmbH umgesetzt. Um frühzeitig alle relevanten Sichtweisen bei der MRiLS zu beleuchten, wird bereits zu Beginn der technologischen Entwicklung die didaktische Perspektive auf den Lernprozess sowie die Anwenderperspektive aus Sicht der industriellen, betrieblichen sowie universitären Bildung durch die Konsortialpartner und assoziierten Partner des MRiLS-Projektes einbezogen. Die beispielhafte Implementierung dient somit neben der Validierung und Erforschung des technologischen Gesamtkonzeptes auch der Erforschung didaktischer Fragestellungen der MRiLS.

3.1 Vorstellung Automatisierungssystem "Schulungslader"

Das Automatisierungssystem "Schulungslader" ist ein Linienportal mit zwei translatorischen Achsen und einem pneumatischen Greifer (siehe Bild 4). Der umlaufende Materialfluss ist über eine rücklaufende Schwerkraftrollenbahn realisiert. An zwei Bearbeitungsstationen können einfache Pick&Place Aufgaben durchgeführt werden. Das Verhalten der Bearbeitungsstationen ist über Simulationsmodelle hinterlegt.

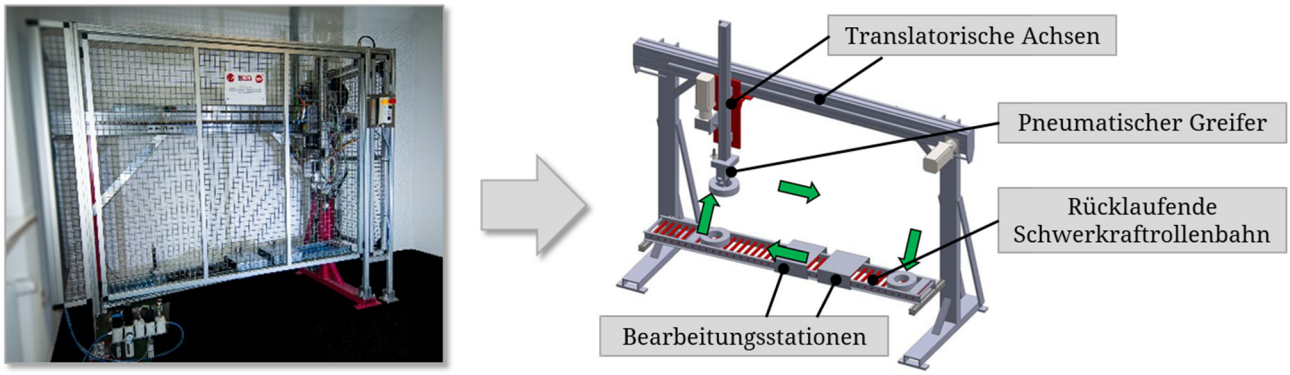


Bild 4: Aufbau des Automatisierungssystems "Schulungslader"

3.2 Aufbau der MRiLS

Das HiLS-Modell ist in der Echtzeit-Simulationsumgebung ISG-virtuos der Industriellen Steuerungstechnik GmbH unter Einbeziehung realer Steuerungstechnik implementiert. Die Echtzeitsimulationsumgebung ISG-virtuos ermöglicht die Simulation von Digitalen Zwillingen in Steuerungsechtzeit. Die Kopplung der Simulation mit der Steuerung erfolgt über gängige Feldbussysteme, so dass die Lösung unabhängig von Steuerungsherstellern ist.
Die Bereitstellung der MRiLS erfolgt unter Einsatz der am Virtual Automation Lab (VAL) der Hochschule Esslingen entwickelten Digital Twin as a Service Plattform (siehe auch [10]). Die Plattform agiert als Middleware (vgl. Abschnitt 2.2) und ermöglicht neben der endgeräte- und plattformunabhängigen Bereitstellung des Digitalen Zwillings auf verschiedenen Mixed Reality-Endgeräten auch die Integration verschiedener Funktionserweiterungen durch Public-Cloud-Dienste wie z.B. KI-basierte Sprachverarbeitung für multilinguale Schulungen. Über die Plattform ist sowohl ein individuelles als auch ein gemeinsames und interaktives Schulen mit dem Lernobjekt in Mixed Reality möglich. Bild 5 zeigt die Architektur der MRiLS des "Schulungsladers".

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

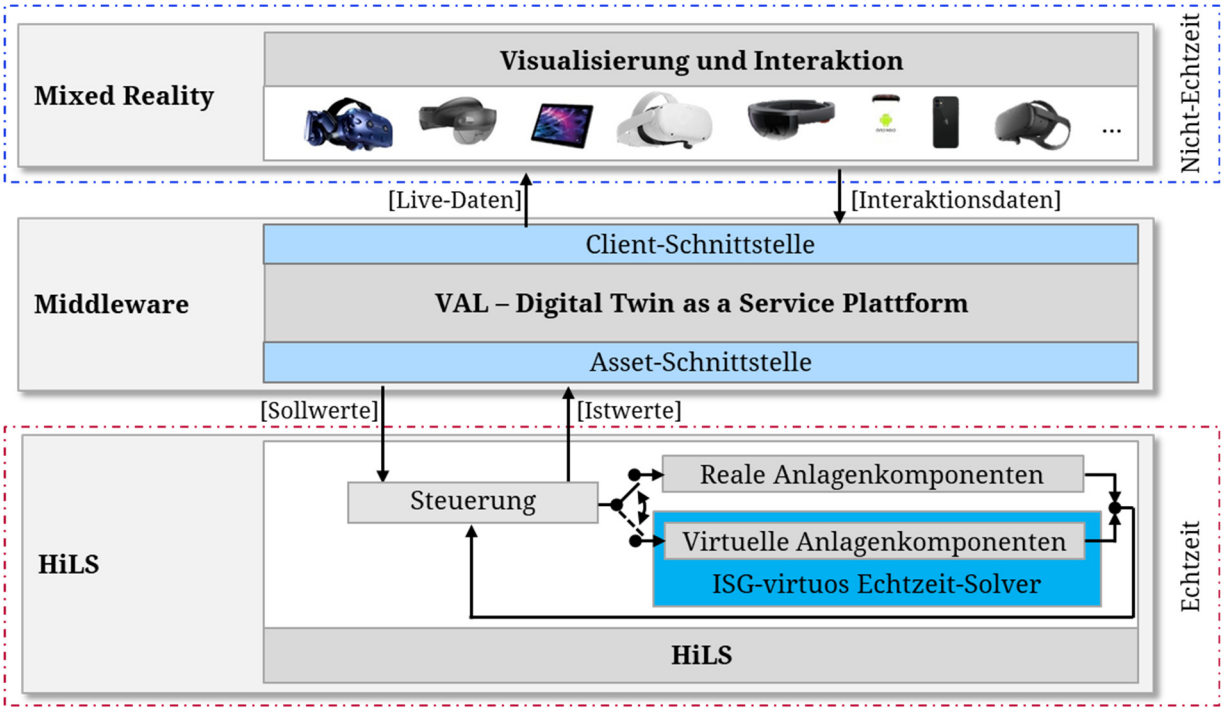


Bild 5: Architektur der MRiLS des "Schulungsladers" (vgl. [9])

Die HiLS des "Schulungsladers" umfasst neben der Implementierung des Verhaltens der virtuellen Anlagenkomponenten in ISG-virtuos auch die Anbindung an die reale Steuerungstechnik. Zur Validierung der Flexibilität des Gesamtkonzeptes wird sowohl eine Beckhoff Steuerung als auch eine Siemens Steuerung eingesetzt. Zudem kann das System mit rein virtuellen Anlagenkomponenten über das Verhaltensmodell in ISG-virtuos ohne Anbindung von realer Steuerungstechnik betrieben werden. Die industrielle Steuerungstechnik kann neben der Steuerungslogik auch die Anbindung eines realen Bedienpanels umfassen. Die HiLS koppelt sich über die Asset-Schnittstelle (bspw. über OPC UA) an die Digital Twin as a Service Plattform. Die Mixed Reality-Endgeräte verbinden sich über die Client-Schnittstelle an die Middleware und bekommen die Live-Daten für die Visualisierung übermittelt. Auf Basis dieser bereitgestellten Visualisierung können die Nutzenden über intuitive Eingabemöglichkeiten (z.B. Controller, Gestensteuerung, Sprachsteuerung) mit dem Digitalen Zwilling in Mixed Reality multimodal interagieren und dessen Verhalten manipulieren. Die Interaktionsdaten der einzelnen Nutzenden werden auf dem jeweiligen Endgerät abstrahiert und lösen entsprechende Events aus, die von jedem Endgerät direkt an die Middleware gesendet werden. In der Middleware erfolgt die Auswertung der ankommenden Events der verschiedenen Nutzenden, die Generierung von Sollwerten auf Basis dieser Events sowie die Übermittlung der Sollwerte an die angebundene HiLS. Die HiLS reagiert entsprechend dem hinterlegten Verhaltensmodell (z.B. Steuerungslogik) auf die Sollwerte und schreibt die Istwerte an die Middleware zurück. Diese Istwerte werden wiederum über die Middleware zentral an die angebundenen Endgeräte verteilt. In der Middleware existiert zu jedem Zeitpunkt ein nutzerunabhängiger konsistenter Systemzustand, so dass sich die Nutzenden flexibel während einer Schulung dazu schalten können.
Die Implementierung der MRiLS des "Schulungsladers" ermöglicht den Nutzenden, flexibel und intuitiv mit den angebundenen realen und virtuellen Anlagenkomponenten zu interagieren. Sowohl die Visualisierung als auch die Manipulation des Digitalen Zwillings sind endgeräte- (z.B. Augmented Reality-Brille, Virtual Reality-Brille, Tablet), eingabegeräte- (z.B. Controller, Datenhandschuhe) sowie ausgabegeräteübergreifend (z.B. Sprachausgabe, haptisches Feedback) auf Basis eines gemeinsamen Digitalen Zwillings durch mehrere Nutzende zeitgleich möglich.
Bild 6 zeigt einen beispielhaften Einsatz der MRiLS des "Schulungsladers" für die Schulung in Virtual Reality.

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

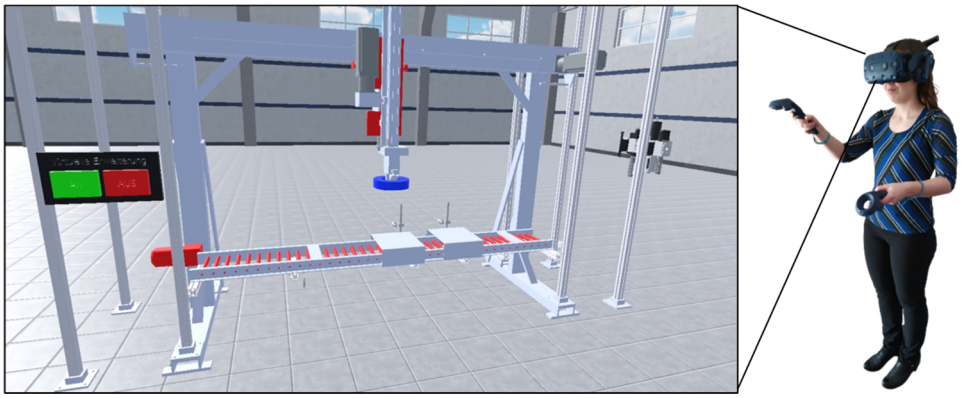


Bild 6: Beispielhafter Einsatz der MRiLS des "Schulungsladers" in Virtual Reality

3.3 Ablauf einer Schulung

Die Schulung mittels MRiLS gilt dabei nicht als Insellösung, sondern ist mit anderen Lehr- und Lernformen zu kombinieren und in das bestehende Schulungs-Framework zu integrieren. So kann die MRiLS beispielsweise unterstützend zum Lernen an der realen Anlage und dem Lernen mittels Bedienungsanleitung eingesetzt werden. Die MRiLS greift dabei an den Defiziten bisheriger Formen der Wissensvermittlung an und ergänzt das Schulungs-Framework um eine weitere Methode. Für die beispielhafte Implementierung des "Schulungsladers" wird die Zielgruppe der Maschinenbediener fokussiert. Bei dieser Zielgruppe ist zumeist davon auszugehen, dass die Lernenden bislang wenig Berührungspunkte beziehungsweise Erfahrungen mit Mixed Reality Technologien aufweisen. Daher kommt der Vorbereitung und Einführung der Lernenden in die virtuelle Lernumgebung durch die Schulungsleitung eine besondere Bedeutung zu. Bild 7 zeigt den geplanten Ablauf der Schulung mittels MRiLS. Nach einer kurzen Vorstellung der Schulungsanlage (z.B. durch ein Video oder an der realen Anlage), folgt eine Eingewöhnungsphase in Mixed Reality, um die Schulungsumgebung und die Bedienung kennen zu lernen und sich in der Lernumgebung zu orientieren. Das Schulungsszenario umfasst sowohl reproduktive als auch produktive selbstgesteuerte Lernphasen. In der reproduktiven Lernphase führen die Lernenden eine geleitete Bearbeitung verschiedener Aufgaben durch. Nach der Wissenseinübung und -erschließung in dieser reproduktiven Lernphase folgt die selbstgesteuerte Phase des Lernszenarios. Die Lernenden wenden dabei ihr gelerntes Wissen an und übertragen dieses beim explorativen Erkunden der Schulungsanlage auf weitere Anwendungsszenarien. Abschließend wird eine Lernzielkontrolle zur Überprüfung der Lerninhalte durchgeführt. Mögliche Wissenslücken werden durch adaptive Wiederholungen der Lerninhalte geschlossen.

Zielgruppe: Maschinenbediener				
Vorstellung Anlage	**Eingewöhnung MR**	**Schulung MR**	**Exploration**	**Lernzielkontrolle**
Kennenlernen der Schulungsanlage	Kennenlernen der Schulungs-umgebung in MR	Durchführung des Schulungs-szenarios in MR	Exploratives Erkunden der Anlage in MR	Überprüfung der Lerninhalte

Bild 7: Konzept des Schulungsablaufes mittels MRiLS

Für den "Schulungslader" wurden folgende relevante Schulungsszenarien für die Zielgruppe Maschinenbediener identifiziert:

- **Anlage hochfahren:** Der Bediener erlernt das Hochfahren der Anlage vom Einschalten des Hauptschalters bis zur Betriebsfähigkeit der Anlage.
- **Not-Halt betätigen und quittieren:** Der Bediener erlernt die Betätigung und das Quittieren des Not-Halts.

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

- **Fehlerzustände selbstständig identifizieren:** Der Bediener erlernt das selbständige Erkennen von spezifischen Fehlerzuständen.
- **Fehlerzustände durch manuellen Betrieb beheben:** Der Bediener erlernt das manuelle Bedienen der Anlage zur Behebung der Fehlerzustände.

Die logischen Abläufe der einzelnen Schulungsszenarien sind in Flussdiagrammen hinterlegt. Bild 8 zeigt beispielhaft das Flussdiagramm für das Schulungsszenario "Not-Halt betätigen und quittieren". Die Logik umfasst sowohl die manuellen Arbeitsschritte des Lernenden als auch die hinterlegten Abfragen von Statusvariablen aus der Steuerung.

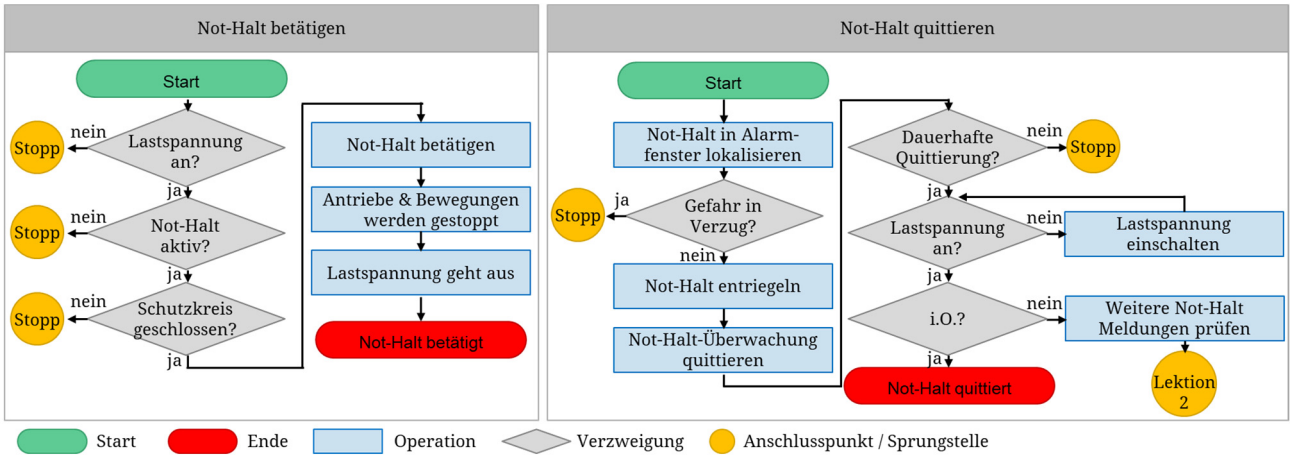


Bild 8: Flussdiagramm des Schulungsszenarios "Not-Halt betätigen und quittieren"

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrages sind die bislang im Maschinen- und Anlagenbau eingesetzten Formen der Wissensvermittlung und deren Defizite aufgezeigt worden. Zur Lösung der beschriebenen Defizite wird die Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation (MRiLS) vorgestellt. Die Funktionsfähigkeit des vorgestellten Konzeptes wird anhand eines beispielhaften Automatisierungssystems, dem "Schulungslader", validiert. Die Flexibilität und Übertragbarkeit der MRiLS wurde neben dem hier dargestellten Anwendungsbeispiel bereits bei weiteren Anwendungen, auch über die Domäne des Maschinen- und Anlagenbaus hinweg, untersucht (siehe Bild 9).

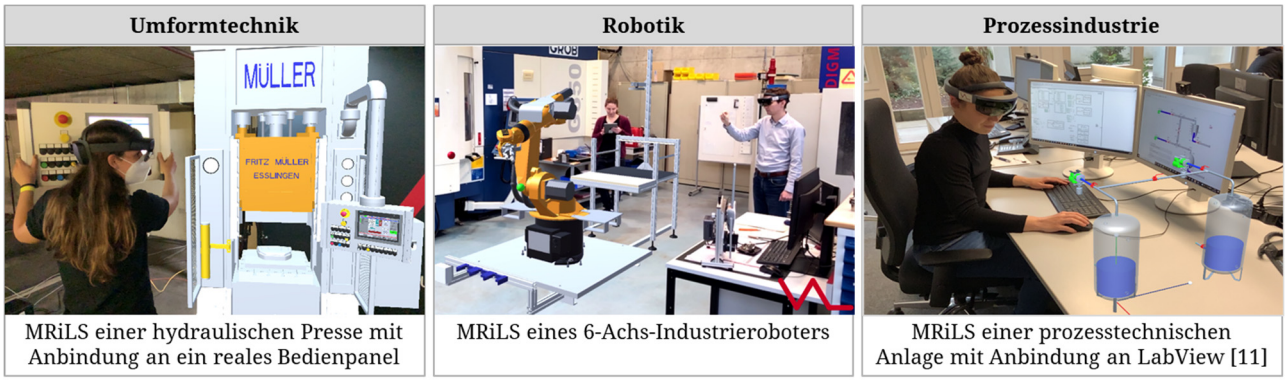


Bild 9: Weitere Anwendungsbeispiele der MRiLS

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

In Zukunft wird das Konzept für den Ablauf der Schulung mittels MRiLS für den "Schulungslader" weiter technologisch und didaktisch untersucht sowie der praktische Einsatz in der betrieblichen, beruflichen sowie universitären Bildung erforscht. Die Schulungsmodelle der MRiLS mit den zugehörigen Flussdiagrammen sollen in Zukunft zudem automatisiert aus den Engineering-Daten einer Virtuellen Inbetriebnahme abgeleitet werden können.

5 Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 16SV8344 - 16SV8348 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

6 Literatur

[1] Wehnert, C. et al.: Weiterbildung im Maschinen- und Anlagenbau mittels Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation, Journal of Technical Education (JOTED), Bd. 9 Nr. 2, pp. 108-128, 2021.
[2] Milgram, P. et al.: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In: Telemanipulator and Telepresence Technologies. 2351. 1994. Doi: 10.1117/12.197321.
[3] Gonzalez-Franco, M. et al.: Immersive Mixed Reality for Manufacturing Training. Frontiers in Robotics and AI, Volume 4. 2017.
[4] Shamsuzzoha, A. et al.: Digital factory – virtual reality environments for industrial training and maintenance. Interactive learning environments. 2019 doi: 10.1080/10494820.2019.1628072
[5] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: Virtuelle Inbetriebnahme - Modellarten und Glossar, VDI/VDE 3693 Blatt 1, 2016
[6] Slater M; Wilbur, S.: A framework for immersive virtual environments (FIVE): speculations on the role of presence in virtual environments. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(6):603–616, 1997.
[7] Oh, C. S. et al.: A Systematic Review of Social Presence: Definition, Antecedents, and Implications. Frontiers in Robotics and AI, vol. 5, 2018.
[8] Hönig, J. et al.: Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation für Schulungen im Maschinen- und Anlagenbau, Proceedings of DELFI Workshops 2021. In: Proceedings of DELFI Workshops 2021, pp. 9-22, Hochschule Ruhr West, 2021. ISBN 978-3-946757-03-0
[9] Hönig, J. et al.: Mixed-Reality-in-the-Loop Simulation von Produktionssystemen zur Aus- und Weiterbildung. atp magazin, atp 63 (6-7), Vulkan-Verlag, 2021.
[10] Schnierle, M. et al.: Mensch-Roboter-Interaktion mit Mixed Reality auf Basis einer "Digital Twin as a Service"-Plattform, atp magazin 5/2019, Robotik und Digital Twin in der Smart Factory, Vulkan-Verlag, 2019.
[11] Kronberger, K.; Schnierle, M.: Mixed Reality in the Loop Simulation - Ausbildung an prozesstechnischen Anlagen auf dem Weg zum Digitalen Zwilling. In: Tagungsband Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgemeinschaft Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik (PAAT), 2021.

Open Access. © 2022 Jana Hönig, Marc Schnierle, Camilla Wehnert, Daniel Littfinski, Christian Scheifele, Denis Pfeifer, Carlos Münster, Armin Roth, Julia Franz, Sascha Röck, Alexander Verl
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-ND

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Warum wir ein Security-Engineering-Informationsmodell brauchen

Motivation, Anwendungsfälle und Konzept für ein neues Domänenmodell für Security-Engineering

Emre Taştan[1], Sarah Fluchs[2,3], Rainer Drath[4]

Zusammenfassung

Security ist eine der größten Herausforderungen bei der industriellen Digitalisierung und der Einführung von Internettechnologien. Während die funktionale Sicherheit tief in die Entwicklung von Produkten oder Prozessen integriert ist, ist dies bei der Security nicht der Fall. Security-Engineering muss sich also – analog zur funktionalen Sicherheit – in den bestehenden und sich gerade stark verändernden Automation-Engineering-Prozess eingliedern, vor allem muss es aber für Automatisierungsingenieure effizient durchführbar sein. Dieser Beitrag begründet den Bedarf an einem Security-Engineering-Modell und berichtet über die laufenden Arbeiten zu den Anwendungsfällen und einem Modellierungsansatz mit AutomationML.

Stichwörter

Security, Security-Engineering, Domänenmodell, AutomationML, Anwendungsfälle, Funktionen

1 Motivation und Zielstellung

Industrielle Anlagen und Maschinen sind auf Lebenszyklen von 20 Jahren und länger ausgelegt und verfügen oftmals über keine oder schwach ausgeprägte Security-Eigenschaften, zum Beispiel unverschlüsselte und nicht-authentifizierte Kommunikation zwischen Sensoren, Steuerungen und Leitsystemen [1]. Prozess- und Fertigungsautomatisierungssysteme werden jedoch zunehmend über Internettechnologien miteinander vernetzt, was wiederum das Risiko von Schäden durch Ausfälle oder Cyberangriffe erhöht.
Eine große Herausforderung auch für moderne Anlagen ist, dass sie meist nicht aus dem Blickwinkel der Security konzipiert und errichtet wurden. Während der Bereich der funktionalen Sicherheit (Schutz von Menschen und Umwelt) seit Jahrzehnten durch weitreichende gesetzliche und normative Vorschriften reguliert ist, ist die Security in vielen Branchen, beispielsweise in der Chemieindustrie, nicht reguliert. Zwischenfälle wie Stuxnet (2010) [2] und die zunehmende Zahl von Ransomware-Vorfällen, die zu Kollateralschäden an Automatisierungssystemen führen (siehe Maersk (2017) [3],

[1] Hochschule Pforzheim, Pforzheim, Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter
[2] admeritia GmbH, Langenfeld, Chief Technology Officer (CTO)
[3] Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bunderwehr Hamburg, Hamburg, Doktorandin
[4] Hochschule Pforzheim, Pforzheim, Professor für Mechatronische Systementwicklung

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

verdeutlichen die Notwendigkeit der methodischen Integration von Security in die Planung kritischer IT-Infrastrukturen einschließlich ihrer Automatisierungssysteme.

Ein intuitiver und verbreiteter Ansatz zur Vermeidung von Security-Risiken ist der Verzicht auf Security-Maßnahmen und stattdessen die Isolation des Produktionssystems. Aber das ist weder zukunftstauglich, da die Produktion im Rahmen von Digitalisierung und Industrie 4.0 immer stärker vernetzt wird, noch wirksam, da eine Isolation beim zunehmenden Einsatz von drahtlosen Verbindungen und Wechseldatenträgern kaum durchzuhalten ist. Security ist deshalb eine der größten Herausforderungen in der industriellen Digitalisierung.

Nach heutigem Stand der Technik wird die Security üblicherweise in bestehenden Anlagen nachgerüstet. In neueren Anlagen gibt es Versuche, Security bei der Planung zu berücksichtigen – dann aber meist ganz am Ende des Prozesses, wenn die wichtigen Design-Entscheidungen bereits getroffen sind, was den Lösungsraum für die Security-Maßnahmen stark einschränkt. Künftig muss Security-Engineering ein selbstverständlicher und organischer Bestandteil des Automatisierungs-Engineering-Prozesses werden („Security by Design“). Das erfordert neue Methoden und in der Folge Veränderungen im Engineering, analog zur Etablierung der funktionalen Sicherheit in der Vergangenheit. Damit derartige Methoden von der Industrie akzeptiert werden, müssen das Security-Engineering und das klassische Automatisierungs-Engineering zusammenwachsen und für die beteiligten Automatisierungsingenieure gemeinsam effizient durchführbar sein.

Wie solch ein integrierter Automation-Security-Engineering-Prozess aussehen kann und wie ein Security-Domänenmodell im Engineering und auch in der späteren Betriebsphase helfen kann, diesen Prozess für Automatisierungsingenieure alltagstauglich zu machen, untersucht das Forschungsvorhaben IDEAS „Integrated Data Models for the engineering of Automation Security“ (FKZ: 16KIS1269K). Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Forschungsvorhaben wird von der admeritia GmbH in Kooperation mit der Hochschule Pforzheim durchgeführt. Als weitere assoziierte Partner unterstützen die INEOS Manufacturing Deutschland GmbH, die HIMA Paul Hildebrandt GmbH & Co KG sowie der NAMUR e. V.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist "Security by Design". Dafür wird ermittelt, in welchen Phasen des bestehenden Automatisierungs-Engineerings security-relevante Informationen für ein elektronisches Informationsmodell systematisch erfasst werden können. Es werden bestehende Workflows untersucht, ein Security-Domänenmodell sowie Software-Werkzeuge entwickelt. Zielgruppe sind Automatisierungs- bzw. Leittechnikingenieure, die befähigt werden sollen, Security bei der Entwicklung und Pflege ihrer Systeme im Sinne von „Security by Design“ direkt zu berücksichtigen.

Ausgangspunkt ist ein vom Projektpartner admeritia GmbH erarbeiteter Ansatz zur Strukturierung des Security-Engineering-Prozesses. Um bestehende Vorgehensweisen vergleichen und einordnen zu können, wurde das in Bild 1 dargestellte methodenneutrale Prozessmodell für das Security-Engineering entwickelt. Es besteht von unten nach oben aus den vier aufeinander aufbauenden Ebenen, in die sich bestehende Vorgehensweisen einordnen lassen. Die vier Ebenen sind wie die Ebenen eines Turms: keine Ebene funktioniert ohne die darunterliegende. Der Turm beschreibt ein allgemeines Security-Engineering-Prozessmodell für den gesamten Security-Engineering-Prozess: Ausgehend von der Identifikation schutzbedürftiger Funktionen (FC) werden Risiken (RI) abgeleitet, Security-Anforderungen (RE) gegen diese Risiken definiert und in einer Security-Lösung (IM) implementiert. [4]

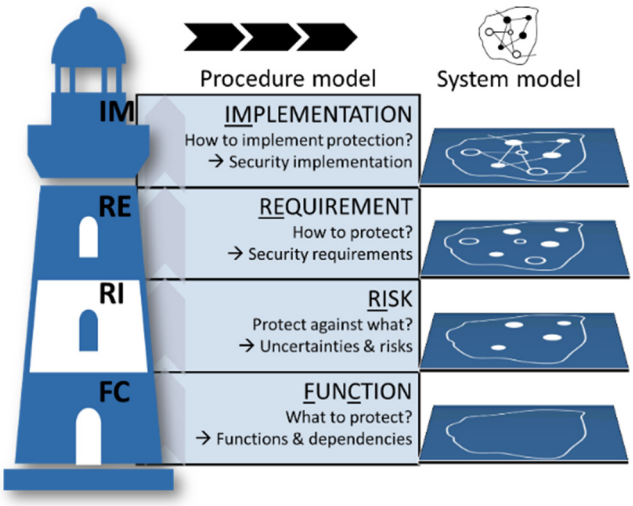


Bild 1: Allgemeines Prozessmodell für Security-Engineering [4]

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

Die verschiedenen in der Automatisierungstechnik verwendeten Security-Risikoanalyse- oder Systems-Security-Engineering-Methoden lassen sich alle entlang der vier Ebenen des Prozessmodells einordnen, sodass keine Entscheidung für oder gegen einen bestehenden Standard getroffen werden muss – daher die Bezeichnung des Modells als „methodenneutral“. [4]
Im Rahmen dieses Beitrags werden die Autoren die Anforderungen an ein Security-Domänenmodell, dessen Systemmodellierung sowie einen Ansatz für ein konkretes Modell für die erste Ebene des Turmes (FC) mit einer Bibliothek und Beispielen beschreiben. Die anderen Ebenen sind Gegenstand zukünftiger Arbeiten.

2 Anwendungsfälle für ein Security-Engineering-Domänenmodell

In diesem Kapitel werden vier Anwendungsfälle (Use Case, UC) für ein elektronisches, das heißt maschinenles- und verarbeitbares Security-Engineering-Domänenmodell beschrieben. Diese Anwendungsfälle stellen die Basis für die Anforderungsanalyse an das Domänenmodell dar.

UC1: Informationsaustausch zwischen security-relevanten Planungswerkzeugen
Security-Informationen finden sich keineswegs nur in Security-Werkzeugen. Vielmehr können eine große Zahl von Informationen und Werkzeugen als „security-relevant“ bezeichnet werden. Da Security ein interdisziplinäres Gebiet ist, das sich mit vielen anderen Disziplinen überschneidet oder diese tangiert, finden sich diese security-relevanten Informationen in vielen verschiedenen, meist untereinander inkompatiblen Entwicklungsphasen und Softwarewerkzeugen. Informationen, die eigentlich zentral gesucht, analysiert und korreliert werden sollten, sind somit über viele Datensilos verteilt. Security-relevante Informationen gibt es in IT-Administrationstools, wie Asset-Inventare, Konfigurationsmanagement- oder Versionierungstools, in dedizierten Security-Tools wie Anomalieerkennungs- oder Intrusion-Detection-Systemen, aber auch in Engineeringwerkzeugen, die Risikobetrachtungen oder architekturelle Entscheidungen enthalten.
Es ist unwahrscheinlich, dass diese verschiedenen Werkzeuge ihre Datenformate in absehbarer Zeit harmonisieren werden, weshalb ein neutrales Informationsmodell die pragmatischere Lösung zu sein scheint. Mit so einem neutralen Informationsmodell kann jedes beteiligte Werkzeug seine relevanten Informationen (einschließlich Identifikations-, Versions-, Semantik- und Typinformationen) exportieren, während seine interne Datenverarbeitung unverändert bleibt.
Genau das gleiche Problem, nur für Engineeringwerkzeuge für die Automatisierung und nicht für die Security, war der Grund, warum AutomationML als Datenformat für den Austausch von Engineering-Informationen entwickelt wurde. Damit ist es ein natürlicher Kandidat für die Modellierung und den Austausch auch von Security-Engineering-Informationen zwischen inkompatiblen Werkzeugen.
UC2: Aufrechterhaltung der Security während des Betriebs
Mit der Möglichkeit, Informationen zwischen security-relevanten Werkzeugen digital auszutauschen, besteht die Aussicht auf ein effizientes Security-Management im laufenden Betrieb einer Produktionsanlage. Mindestens zwei Teilanwendungsfälle sind relevant:

- **UC 2.1:** Effizienzgewinne im Betrieb von Security-Lösungen ergeben sich oft aus der Standardisierung von Komponenten und ihren Konfigurationen. Diese Standards müssen maschinenverarbeitbar gespeichert, gepflegt und verwaltet werden. Selten deckt ein Tool alle relevanten Informationen ab. Solche Standardkonfigurationen über viele Tools verteilt zu speichern und zu pflegen ist jedoch fehleranfällig und ineffizient.
- **UC 2.2:** Die Lebenszyklen von Security-Lösungen sind kürzer als die der meisten Produktionssysteme, denn neue Bedrohungen und Schwachstellen können in Abständen von Tagen oder Wochen auftreten. Daher ist es oft notwendig, die Security-Einstellungen während des Anlagenbetriebs an-

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

zupassen – unabhängig davon, ob die Komponenten standardisiert sind oder nicht. Security-Entscheidungen wie das Patchen einer Schwachstelle oder das Anwenden einer Alternativmaßnahme für Schwachstellen, für die kein Patch verfügbar ist, erfordern jedoch Kontextinformationen aus typischerweise verschiedenen Quellen. Relevant sind zum Beispiel der Schweregrad der Schwachstelle, die bestehenden Risiken und frühere Vorfälle für eine Komponente, die Kritikalität des Versagens oder der Manipulation der Komponente, die Netzwerkexposition der Komponente und die Kritikalität der daran angeschlossenen Komponenten. Diese Informationen sind jedoch wahrscheinlich an verschiedenen Orten gespeichert und müssten zeitaufwändig gesammelt und verarbeitet werden - sofern sie überhaupt verfügbar sind. Ein Informationsmodell hilft, alle security-relevanten Engineering-Informationen auch in der Betriebsphase noch parat zu haben.

UC3: Visualisierungen und modellbasiertes Security-Engineering

Dem Security-Engineering fehlen nicht nur ein Informationsmodell, das von Computern verarbeitet werden kann, sondern auch Diagramme und Visualisierungen, die Menschen helfen, die Security-Probleme des betrachteten Systems wirklich zu verstehen und die Lösungen systematisch zu durchdenken. Solche Visualisierungen sind notwendig, da für Security-Engineering Informationen aus einer Vielzahl von technischen Disziplinen verwendet werden, z. B. Netzwerkpläne, Gebäude- und Standortpläne, Analyseergebnisse der funktionalen Sicherheit oder Softwarespezifikationen für Kontrollsysteme – und diese Informationen müssen oft in Kombinationen oder Abstraktionsebenen dargestellt werden, die für andere Ingenieurdisziplinen nicht relevant sind.

Auch die Security fügt ihre eigenen Informationen hinzu. Ein Beispiel ist die Rolle des Menschen, die in anderen technischen Modellen selten dargestellt wird. Darunter fällt die Interaktion von Menschen mit Systemkomponenten und von Komponenten mit anderen Komponenten. All dies erfordert neu gestaltete Visualisierungen aus verschiedenen Perspektiven, die manuell nur mühsam zu erstellen wären, aber aus einem Informationsmodell, das alle Security-relevanten Informationen an einem Ort enthält, leicht zu generieren sind.

Der Mangel an effizienten Visualisierungen für Security-Engineering-Modelle ist nach Ansicht der Autoren einer der Hauptgründe, warum modellbasiertes Security-Engineering, das stark auf die Betrachtung verschiedener Perspektiven und Detaillierungsgrade von security-relevanten Informationen und deren Auswertung während des Security-Engineering-Prozesses angewiesen ist, derzeit schnell als „in der Praxis zu aufwendig“ gilt.

UC4: Integration von Security in den Prozess der Automatisierungstechnik - "Security by Design"

Es ist von Vorteil, bereits in der Engineering-Phase (und allen späteren Re-Engineering-Phasen) über ein Security-Engineering-Informationsmodell zu verfügen. Wie eingangs erwähnt, wird das Thema „Security“ bislang oft erst ganz am Ende des Engineering-Prozesses einer automatisierten Anlage betrachtet, nur für einzelne Teile der Anlage, oder sogar erst nach der Inbetriebnahme einer Anlage.

In jedem Fall hat Security-Engineering auf diese Weise keinen Einfluss auf allgemeine Konstruktionsentscheidungen und kann lediglich noch auf die Security-Risiken einer fertig entworfenen Anlage reagieren. Dies führt unweigerlich dazu, dass Security als schlechter Kompromiss im Nachhinein die Komplexität erhöht oder die Nutzbarkeit des Systems einschränkt, während wünschenswerte Security-Lösungen das Gegenteil bewirken würden.

Solche wünschenswerten Lösungen erfordern jedoch oft grundlegende Designänderungen, wie z. B. die Neugestaltung der Netzwerkarchitektur. Diese Änderungen sind nicht mehr durchführbar, wenn das Engineering einer Anlage bereits abgeschlossen ist. Security-Engineering beginnt auch deshalb zu spät im Automation-Engineering-Prozess, weil Security-Fachleute keine guten Antworten auf die Frage haben, welche Informationen sie von den anderen relevanten Ingenieurgewerken bei der Planung einer Anlage benötigen – also was eigentlich „security-relevante“ Informationen sind. Security-Ingenieure haben im Gegensatz zu vielen anderen Disziplinen bislang kein gemeinsames, bewährtes Modell, das ihnen beim Denken hilft [4] – und schon gar keine Visualisierung dessen (siehe UC3). Sie können nirgendwo alle Informationen speichern, die relevant sein könnten, diese mit ihren eigenen security-spezifischen Informationen ergänzen und diese als Grundlage für die frühzeitige Kommunikation von Security-Anforderungen an andere Gewerke nutzen.

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

3 Stand der Technik

Zur speicherbaren und elektronisch verarbeitbaren Beschreibung eines Security-Domänenmodells haben sich die Autoren für die standardisierte Beschreibungssprache **AutomationML (AML)** entschieden, da AutomationML seine Fähigkeit zur Beschreibung von Domänenmodellen bereits in verschiedenen industriellen Domänen nachgewiesen hat [5] [6]. Die Zielsetzung von AutomationML – ein einheitliches Informationsmodell für verschiedene Ingenieurdisziplinen bei der Entwicklung einer automatisierten Anlage – passt sehr gut zur Zielsetzung, Security-Engineering in die bestehenden Engineeringprozesse anderer Ingenieurdomänen zu integrieren und Interoperabilität der Security-Engineering-Informationen mit bestehenden Planungsdaten zu gewährleisten.
Zudem eignen sich AML-Modelle hervorragend als Teilmodell und somit **Datenlieferant für Verwaltungsschalen**. Die Verwaltungsschale ist eine digitale Repräsentation jedes industriellen Assets innerhalb eines „Industrie 4.0"-Netzes. Sie stellt ein standardisiertes, maschineninterpretierbares Informationsmodell eines Geräts, mit relevanten Parametern, Schnittstellen etc., dar [7]. Die Kompatibilität mit der Verwaltungsschale ist ein relevanter Aspekt für die Zukunftstauglichkeit des Security-Domänenmodells und für die langfristige Erfüllung der o.g. Anwendungsfälle ein.
In AML gibt es einige Ansätze, auf denen das neu zu entwickelnde Security-Domänenmodell aufbauen kann. AML besitzt bereits eine große Anzahl von Informationsmodellen für die **Modellierung von Teilaspekten automatisierter Systeme** wie Topologie, Geometrie, Dokumentation, Vernetzung, sogar Icons, elektrische/pneumatische/hydraulische Schnittstellen oder Logik. Sie können so detailliert sein, dass sie sich für die Modellierung elektronischer Produktkataloge eignen [8]. Für das Security-Domänenmodell ist hinsichtlich vieler Teilaspekte ein weitaus geringerer Detailgrad vonnöten.
Für Security besonders relevant ist allerdings die **Modellierung von Kommunikationsbeziehungen**. Es existieren bereits AML-Modellierungsempfehlungen für Kommunikationsnetzwerke [9], d.h. von Gerätesystemen und ihren physischen und logischen Verbindungen. Diese Aktivität befindet sich derzeit auf dem Weg zur Standardisierung als Teil 1 und 5 im Rahmen der AutomationML-Reihe IEC62714. Diese Ansätze zur Modellierung von Netzwerken sind vielversprechende Kandidaten für die Modellierung von Netzwerken aus Security-Perspektive. Bereits 2019 haben Fluchs et al. basierend auf dieser AML-Modellierung von Kommunikationsbeziehungen einen ersten Ansatz für ein **Security-Systemmodell in AML** vorgestellt und offene Modellierungsprobleme herausgearbeitet [10]. Eine Analyse, der für das Security-Engineering zu modellierenden Informationen und Vorschläge für ihre Abbildung in der Verwaltungsschale ist in [11] erfolgt.
Eine dieser offenen Modellierungsfragen ist die Beschreibung von Funktionen beziehungsweise von Interaktionen zwischen Systemkomponenten zur Erfüllung einer bestimmten Funktion. Dazu gibt es mit der **Modellierung von Produkt-, Prozess- und Ressourcendomänen („PPR-Konzept")** ein Konzept zur Erleichterung der Generierung von Prozessabläufen und Systemkonfigurationen [5].
Mit **AMLsec** existiert ein umfassendes AML-Modell, um eine **Risikobetrachtung nach ISA/IEC 62443-3-2** [12] durchzuführen, entwickelt von Eckhart et al. [13]. AMLsec erweitert existierende AML-Bibliotheken, sodass bestehende Engineering-Informationen durch security-relevante Informationen wie Security-Geräte und Security-Konfigurationen erweitert werden. Der Schwerpunkt des Modells liegt auf der Modellierung der Semantik ab dem Beginn der Risikoanalyse (Ebene 2 des Security-Engineering-Prozessmodells aus Kapitel 1), weniger auf der Modellierung des darunterliegenden Systems aus Security-Perspektive, die den Schwerpunkt des vorliegenden Beitrags bildet. Auch beinhaltet das AML Modell AMLsec sehr spezifische Konzepte der ISA/IEC 62443, beispielsweise „Zones und Conduits". Eine Security-Analyse mit anderen Methoden auf Basis des Modells erscheint möglich, würde aber einige Anpassungen erfordern.
Glawe et al. [14] nutzen das AML zugrundeliegende Datenformat CAEX, um **security-relevante Engineeringdaten** für die Nutzung in ihrer Security-Ontologie einzulesen. Die vorgeschlagene Ontologie für die Security-Domäne beinhaltet jedoch keine AML-Modellierung, wenngleich die Autoren einen Export ihrer OWL-basierten Ontologie in AML erwägen.

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

4 Konzept für ein Domänenmodell

Für die effiziente Integration von Security- und Automatisierungs-Engineering ist ein maschinenlesbarer Datenaustausch zwischen relevanten Werkzeugen erforderlich. Basierend auf Kapitel 2 und 3 stellen die Autoren in diesem Abschnitt eine Reihe von Anforderungen (A1 – A4) an das Security-Domänenmodell auf. Anschließend werden Ansätze zur Erfüllung dieser Anforderungen dargelegt.

4.1 Anforderungen an das Domänenmodell

A1 – objektorientierteres, interoperables Systemmodell:
Das Security-Domänenmodell soll ein objektorientiertes Systemmodell sein. Zugleich soll die Austauschbarkeit der Informationen mit anderen Domänen gewährleistet sein.
A2 – Abstraktionsgrad und Hierarchisierung:
Da so viele Informationen aus verschiedenen Domänen potenziell security-relevant sind, ist eine der wichtigsten Eigenschaften des Security-Domänenmodells die Komplexitätsreduktion. Damit das Modell aussagekräftig bleibt, muss es auf einem höheren Abstraktionsgrad angesiedelt sein als die Domänenmodelle, aus denen es Informationen bezieht. Gleichzeitig sollen Möglichkeiten zur Hierarchisierung gegeben sein, die „Drill-Downs“ auf niedrigere Abstraktionsebenen für Ausschnitte des Modells ermöglichen.
A3 - funktionaler Ansatz unter Einbeziehung des Menschen:
Security-Engineering erfordert zusätzliche Informationen zur Modellierung eines rein technischen Systems: Modellierung von Funktionen, bestehend aus Interaktionen und Kommunikation zwischen beteiligten menschlichen Rollen und IT/OT-Systemen oder IT/OT-Systemen untereinander, die zur Ausführung der Funktion erforderlich sind. Jede Funktion zeigt den Teil des Systems, der für die Erfüllung eines bestimmten Zwecks relevant ist. Damit bilden sie eine Einheit aus technischen Komponenten, Menschen, Interaktion und Kommunikationsverbindungen, die für weitere Security-Analysen gut geeignet ist [15]. Um Eigenschaften von Objekten in einer Funktion modellieren zu können, werden Attribute spezifiziert. In diesen kann bspw. eine Verbindung zum Risiko (Prozessmodell: RI) hergestellt werden, indem eine Beschreibung der Wahrscheinlichkeit und die Konsequenz der Bedrohung bzw. des Schadens aufgelistet wird. Zudem ist der Zielgruppe des Domänenmodells, Automatisierungsingenieuren in der Prozessindustrie, ein funktionsbasierter Ansatz vertraut – beispielsweise durch Funktionsblöcke in der Steuerungsprogrammierung oder Leitsystemparametrierung [16] oder durch Safety-Funktionen (SIFs) in der funktionalen Sicherheit [17].
A4 – vordefinierte Bibliotheken für Funktionen:
Im Sinne der Wiederverwendung kann eine zusätzliche Bibliothek für die wichtigsten Funktionen des Systems aufgebaut werden. Damit werden alle notwendigen Informationen wie betroffene Entitäten aus dem Netzwerk, Verantwortliche, Rollen sowie die Zugehörigkeit von Risikoszenarien (Hinführung zu der Ebene RI in Bild 1) für eine Funktion als Vorlage in AutomationML beschrieben. Zudem erscheint es sinnvoll, in solch einer Bibliothek bereits etablierte Funktionsvorschläge abzulegen.

4.2 AutomationML-Modellierungsansatz

Wie in Kapitel 3 beschrieben, kann mit AutomationML die Struktur oder Topologie eines Systems modelliert werden. Dazu gehört die Hierarchie von Objekten, die jeweils durch einzelne Datenobjekte dargestellt werden, sowie ihre Zusammenhänge bzw. Verbindungen. AutomationML bietet umfangreiche objektorientierte Modellierungskonzepte, die für die Beschreibung von Anlagenstrukturen verwendet werden: dies erfüllt die **Anforderung A1**. Um dies zu verdeutlichen, wird als Beispiel ein vereinfachtes Netzwerk (Bild 2) für die Anforderungen aufgeführt.

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

Bei der Modellierung kommt das von AutomationML empfohlene Konzept zur Modellierung von Kommunikationsnetzwerken zum Einsatz. Dafür stellt AutomationML Bibliotheken für Kommunikationsnetzwerke zur Verfügung. Mithilfe der Bibliotheken aus der IEC 62714-5 können physische sowie logische Geräte und Verbindungen dargestellt werden.
Die Rollenklassen aus der *CommunicationRoleClassLib* beschreiben abstrakte Objekte, ohne dabei deren technische Realisierung festzulegen – dies ist wichtig für die Erfüllung von **Anforderung A2**.
Physikalische/logische Netzwerke, Geräte sowie Verbindungen werden in der Bibliothek abgedeckt. Dennoch werden nicht alle Objekte aus Bild 2 beschrieben. Die Autoren schlagen eine neue Rolle „HumanRole“ vor, um das Beispiel modellieren zu können. Die *CommunicationInterfaceClassLib* bietet die Klassen für die Schnittstellen. Die Interfaceklasse beschreibt die abstrakte physische oder logische Relation zwischen zwei Elementen oder die Referenz auf eine Information. Somit können Kommunikationsgeräte über ihre Steuerungsanwendungen Protokolle oder Daten direkt miteinander austauschen, auch wenn diese nicht direkt physisch verbunden sind. Auf Basis dieser Technik kann ein System auf einer höheren Abstraktionsebene modelliert werden, was zur Erfüllung von **Anforderung A2** beiträgt. In Bild 3 wird das vereinfachte System in abstrakter Form dargestellt. Um die vorgestellten Vorschläge umzusetzen, werden spezialisierte Bibliotheken erstellt, die von der IEC 62714-5 abgeleitet sind. Bild 4 und 5 zeigen den aktuellen Stand.
Im vereinfachten Netzwerk aus Bild 2 kann eine Funktion abgeleitet werden, wie beispielsweise, dass das Personal über das tragbare Programmiergerät „Laptop“ das physikalische Gerät „Sensor“ auslesen kann. Bei der Strukturierung solcher Systeme hat sich in der Praxis der AutomationML die Dreiteilung der Daten in Ressourcen, Prozesse und Produkte bewährt, die auch als PPR-Konzept bezeichnet wird [6]. Dies ist eines der Konzepte, das Mittel zur Darstellung der Modellierung der Funktionen in **Anforderung A3** bietet.

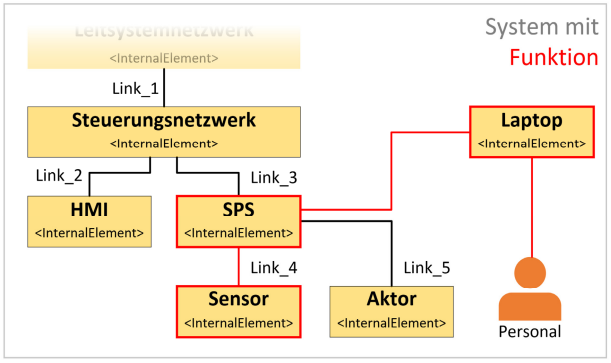


Bild 2: Darstellung eines vereinfachten Systems (vgl. [4])

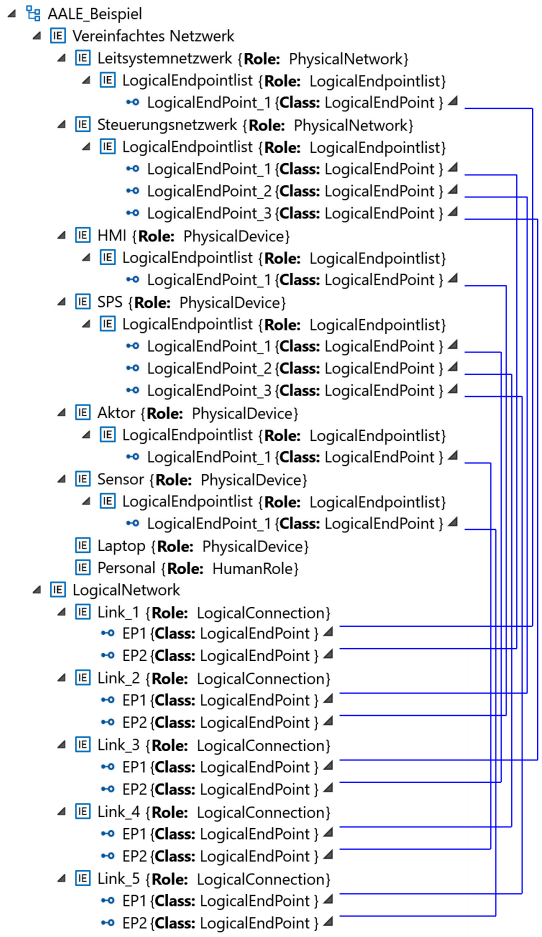


Bild 3: Abstrakte Darstellung des vereinfachten Systems

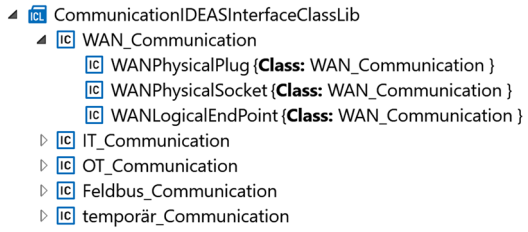


Bild 4: Abgeleitete Schnittstellenbibliothek

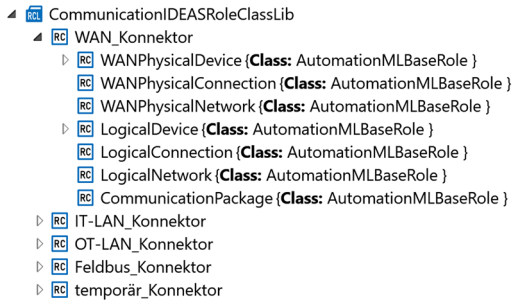


Bild 5: Abgeleitete Rollenbibliothek

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

Das klassische PPR-Konzept kann jedoch eine Funktion, die ausschließlich durch Maschine-zu-Maschine-Kommunikation aufgebaut ist, nicht darstellen. Folglich kann das PPR-Konzept Produkt sowie Ressource nicht unterscheiden. Daher schlagen die Autoren eine Erweiterung des PPR-Konzeptes aus der *AutomationMLBaseRoleClassLib* für das Security-Domänenmodell vor.
Folgende Rollen werden benötigt: Sender, Prozess und Receiver (siehe Bild 6) und die Schnittstelle: SPRConnector. Ein Sender führt einen Prozess am Receiver (Empfänger) durch – damit ergibt sich ein abgewandeltes „*SPR-Konzept*“.
Mit diesem Konzept können die Funktionen wie einfache Sätze gelesen werden: "Techniker liest Messwert von Sensor aus". Jeder Satz besteht aus einem „Interaktionsdreieck“ aus Sender (im Beispiel: Techniker), Prozess (liest Messwert aus) und Receiver (Sensor). Damit kann eine Funktion mit ihren Objekten und Rollen aus drei Blickrichtungen betrachtet werden. Jede Sicht kann dem Benutzer eine zugehörige Darstellung zeigen, wie die verknüpften „Interaktionsdreiecke“ aufgebaut sind. Mithilfe des Sequenzdiagramms in Bild 7 können die Elemente aus der Dreiteilung des SPR-Konzeptes für die Modellierung einer Funktion dargestellt werden. Ein Pfeil mit den jeweiligen zwei betroffenen Objekten stellt ein Dreieck (maximal sechs in Bild 7) aus dem SPR-Konzept dar. Die Sequenzdiagrammdarstellung bietet eine Alternative zur Netzmodelldarstellung in Bild 2. Im Gegensatz zu Bild 2 kann im Sequenzdiagramm die genaue Reihenfolge der Interaktionen abgebildet werden.

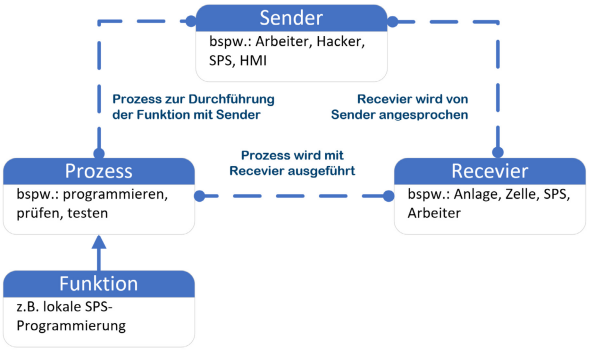


Bild 6: SPR-Konzept - Überblick über die Rollen: Sender, Prozess und Receiver

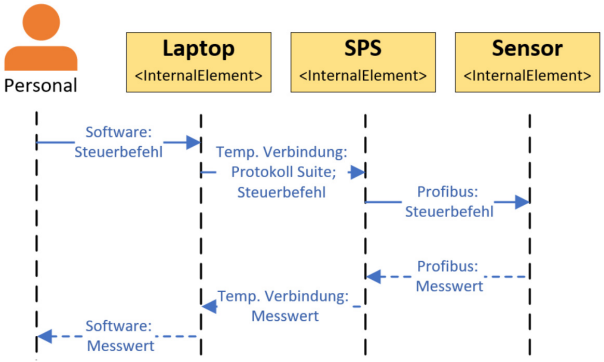


Bild 7: Sequenzdiagrammdarstellung einer Funktion

Die Modellierung der Reihenfolge der „Interaktionsdreiecke“ in AML wird mit der InterfaceClass „Order“ realisiert. Somit werden in der Funktion die Interaktion und Kommunikation zwischen allen beteiligten Entitäten aufgelistet, dass die **Anforderung A3** erfüllt. Dennoch ist bei der Darstellung des Sequenzdiagramms zu unterscheiden, ob die Modellierung aus der physischen oder logischen Ebene entnommen wird, da in der logischen Verbindung nicht alle Entitäten gelistet sind.
Um eine Basis für die Informationsmodellierung von Funktionen bereitstellen zu können, wird eine Bibliothek, wie in **Anforderung A4** aufgeführt, beschrieben. Diese Bibliothek enthält Funktionen, Entitäten (ggf. menschlich), Prozesse, Rollen sowie Attribute und stellen die Grundlage für die Modellierung des Systemmodells und der Funktionen dar. Ein Ausschnitt aus der Funktionsbibliothek kann aus Bild 8 entnommen werden. Eine Beschreibung sowie zusätzliche Informationen sind in den jeweiligen Funktionsobjekten enthalten. Darüber hinaus werden Attribute wie eine sprechende ID, Auswirkung bei Beeinträchtigung der Verfügbarkeit, Integrität oder Vertraulichkeit der Funktion, menschliche Interaktion und Information, in welcher Netzwerkebene sich das Objekt befindet, vergeben. Darüber hinaus werden in der Funktion alle betroffenen Objekte aufgelistet. Die verantwortliche Person für die Funktion wird unter „*Responsible*“ abgebildet.

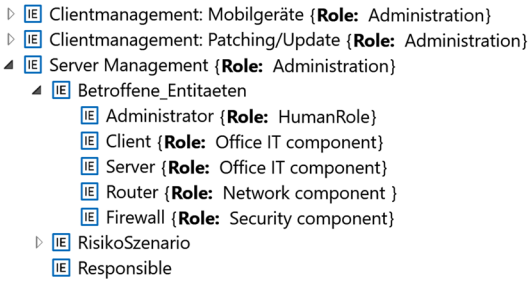


Bild 8: Ausschnitt - Funktionsbibliothek

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

Damit ein Übergang in die noch zu modellierende Risikoanalyse der Ebene RI des Security-Engineering-Prozessmodells (siehe Bild 1) gewährleistet werden kann, werden Risikoszenarien mit der Funktion durch InternalLinks verknüpft. Mittels des Konzeptes der Rollenbibliotheken kann einzelnen Objekten in der SystemUnitClassLibrary eine bestimmte Semantik zugeordnet werden. Hierfür wurde eine zusätzliche Rollenbibliothek erstellt, die in Bild 9 abgebildet ist. Mithilfe der Bibliothek kann der Abstraktionsgrad für **Anforderung A2** in weiteren Kategorien klassifiziert werden.

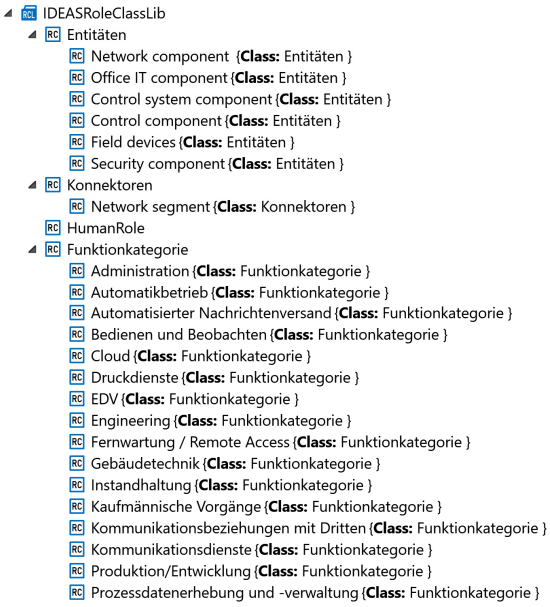


Bild 9: Zusätzliche Rollenbibliothek – Semantik für Entitäten im Modell sowie für Funktionen

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Ansätze verstehen sich als erster Schritt, um die Workflows von Security- und Automation-Engineering elektronisch zu verweben, indem die security-relevanten Informationen der zu schützenden Systeme in einem Informationsmodell abgebildet werden. Damit ist die Grundlage für die Durchführung einer Security-Analyse, also die Ableitung von Risiken, Security-Anforderungen und Security-Lösungen, modelliert. Dies ist der erste Schritt zu einem elektronischen Domänenmodell für das Security-Engineering. So ein Domänenmodell ist neu und ein schlagkräftiger digitaler Enabler für „Security by Design“. Ein elektronisches Denkmodell eröffnet umfassende Möglichkeiten des digitalen Security-Engineerings: digitaler Datenfluss zwischen security-relevanten Planungswerkzeugen, Änderungsmanagement, automatische Konflikterkennung und Konsistenzprüfung auch während des Betriebs, neuartige Assistenzsysteme für Security-Engineering, Impact-Analyse, Mustererkennung und Musterlösungen.

Die Integration von security-relevanten Informationen in maschinenlesbare, maschinenverarbeitbare und maschinen-verständliche Informationsmodelle wie AutomationML, die bereits im Bereich der Automatisierungstechnik verwendet werden, ist ein wichtiger Schritt zur Integration von Security in den gesamten Prozess der Automatisierungstechnik. AutomationML war bereits Grundlage für eine Vielzahl von Domänenmodellen in der Industrie und ist als Teilmodell der Industrie 4.0 Verwaltungsschale direkt im Fahrwasser der Engineering-Digitalisierung eingebettet. Allerdings sind noch diverse Probleme zu lösen:

- Bisher haben die Autoren Modellierungsempfehlungen (Basis für das Security-Modell) für das zu schützende System gemacht. Die Modellierung der nächsten Schritte im Security-Engineering-Prozess (Risiken, Anforderungen und Implementierung) bleibt ein offenes Thema, das unter Berücksichtigung bestehender Arbeiten zu diesem Thema als nächstes behandelt werden soll.
- Um das Security-Engineering wirklich in den Prozess des Automation-Engineering zu integrieren, müssen security-relevante Informationen und Entscheidungen im bestehenden Automation-Engineering-Prozess identifiziert und in das Security-Engineering-Modell aufgenommen werden. Diesbezügliche Forschung wird derzeit von den Autoren auf der Grundlage bestehender Arbeiten wie [18], von Vorgehensmodellen des Automation-Engineering wie [19] [20] sowie von den assoziierenden Partner INEOS Manufacturing Deutschland GmbH und der HIMA Paul Hildebrandt GmbH & Co KG durchgeführt.
- Das Informationsmodell, in diesem Beitrag in AutomationML modelliert, wird im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit dem NAMUR-Arbeitskreis 1.3 ebenfalls als UML-Modell modelliert. Als weiteres Ergebnis dieses Arbeitskreises wird ein Teilmodell der Verwaltungsschale für Security-Engineering definiert werden.

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

– Damit das Informationsmodell für Automatisierungsingenieure im Alltag nutzbar ist, werden grafische Notationen erstellt, die die Informationen effizient von Menschen verarbeitbar machen. Ein Software-Demonstrator wird das Befüllen und Pflegen des Datenmodells erleichtern.

Literatur

[1] BMWi, „Der IT-Sicherheitsmarkt in Deutschland: Grundstein für eine makroökonomische Erfassung der Branche.," 2013.

[2] K. Zetter, „Countdown to Zero Day: Stuxnet and the launch of the world's first digital weapon, First Edition," Crown Publishers, 2014.

[3] G. Ashton, „Maersk, me & notPetya," [Online]. Available: https://gvnshtn.com/maersk-me-notpetya/ (accessed 06.16.21).

[4] S. Fluchs und H. Rudolph, „Wie OT-Security-Engineering eine Ingenieurwissenschaft wird - Ein Denkmodell und ein Datenmodell," atp magazin, 2019.

[5] „DIN EN 62714-1: Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language - Teil 1: Architektur und allgemeine Festlegungen," 2018.

[6] R. Drath (Ed.), AutomationML – The Industrial Cookbook, Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2021.

[7] R. Drath, S. Malakuti, S. Grüner, J. Grothoff, C. Wagner, U. Epple und M. Hoffmeister, „Die Rolle der Industrie 4.0 „Verwaltungsschale" und des „digitalen Zwillings" im Lebenszyklus einer Anlage - Navigationshilfe, Begriffsbestimmung und Abgrenzung," VDI-Verlag - Tagungsband zur Automation 2017, Baden-Baden, 2017.

[8] M. Rentschler, R. Drath, J. Hinze und A. Gatterburg, „AutomationML als generische Beschreibungssprache für den Digitalen Zwilling," VDI-Verlag, Baden-Baden, 2019.

[9] „DIN EN 62714-5: Datenaustauschformat für Planungsdaten industrieller Automatisierungssysteme - Automation markup language - Teil 5: Kommunikation," 2020.

[10] S. Fluchs, N. Schmidt und A. Mendl-Heinisch, „Ein Systemmodell für Security-Engineering," TeSi, vol. 9, no. 11–12, 2019.

[11] S. Fluchs, „On Modelling for Security Engineering. fluchsfriction 37," 2021.

[12] „ISA/IEC 62443-3-2: Security for industrial automation and control systems - Part 3-2: Security risk assessment for system design," 2020.

[13] M. Eckhart, A. Ekelhart und E. R. Weippl, „Automated Security Risk Identification Using AutomationML-based Engineering Data," IEEE Trans. Dependable and Secure Comput., 2020.

[14] M. Glawe, C. Tebbe, A. Fay und K.-H. Niemann, „Knowledge-based Engineering of Automation Systems using Ontologies and Engineering Data," in: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management. Presented at the 7th International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development, SCITEPRESS, Lisbon, Portugal, 2015.

[15] S. Fluchs, „For security, think functions - not systems," 2020. [Online]. Available: https://fluchsfriction.medium.com/for-security-think-functions-not-systems-b0e08a9d89b6.

[16] „DIN EN 61131: Speicherprogrammierbare Steuerungen," Beuth Verlag GmbH, 2004.

[17] „DIN EN 61511: Funktionale Sicherheit - PLT-Sicherheitseinrichtungen für die Prozessindustrie," Beuth Verlag GmbH, 2019.

[18] C. Tebbe, K.-H. Niemann und A. Fay, „Ontology and life cycle of knowledge for ICS security assessments. Presented at the 4th International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research 2016," 2016.

[19] NAMUR (Ed.), „NA35: Engineering and execution of PCT projects in process industry," 2019.

[20] M. Hollender, „Collaborative process automation systems," ISA, Research Triangle Park, NC, 2010.

Open Access. © 2022 Emre Taştan, Sarah Fluchs, Rainer Drath
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. + BY-NC-SA

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Industrie 5.0 – Von der Vision des menschzentrierten Ansatzes zu sozio-cyberphysischen Produktionssystemen für die Praxis

N. Günther[1], B. Prell[1], J. Reiff-Stephan[1]

Zusammenfassung

Industrie 4.0 Ansätze haben sich in der fertigenden Industrie vielerorts etabliert. Big Data, IIoT und Künstliche Intelligenz (KI) ermöglichen neue Geschäftsmodelle und wirken sich dadurch auch verändernd auf Produktionssysteme aus. Mit dem Begriff der Industrie 5.0 formuliert sich ein menschzentrierter Ansatz. Die Praxisrelevanz dieser und ähnlicher Innovationen hängt maßgeblich davon ab, wie derartige Einsatzmöglichkeiten neuer, digitaler Technologien in die bestehenden Unternehmensstrukturen Einzug halten. Hierbei kommt es also auf Transfer und Akzeptanz neuer Technologien an. Digitalisierung gestaltet sich somit als sozio-technisches Problem. Dieser Beitrag gibt Einblick in aktuell verfolgte Transferansätze für Digitalisierung im Mittelstand und leistet einen Teil zu Theoriebildung, als dass er auch einen Ausblick auf weitere Aktivitäten in dem Umfeld liefert.

Stichwörter

Industrie 5.0, Transfer, Akzeptanzmodell, sozio-cyberphysische Produktionssysteme

1 Einleitung

Die wirtschaftliche Produktion von Gütern stellt Unternehmen im globalen Wettbewerb vor eine kontinuierliche Herausforderung. Der ungeheure, oft durch Digitalisierung getriebene, Fortschritt der Fertigungstechnologien zum einen, als auch das internationale Lohngefälle sind Motivation genug, die Effizienz der heimischen Wertschöpfung zu steigern. Die Technologie scheint jedoch aktuell weniger das vordrängliche Problem zu sein, als die Durchdringung und ihre Verbreitung in der Praxis. Somit wird deutlich, dass bei diesem, oft als rein technisches Problem behandelten, Komplex die sozio-technische Aspekte nicht vernachlässigbar sind.
Weiterhin deuten aktuelle Trends eher daraufhin, dass vermehrt auf bestehende oder gar neue Technologien zurückgegriffen werden muss, um den mit diesen Trends einhergehenden Herausforderungen gewachsen zu sein. Nicht umsonst wird Digitalisierung als eine der drei größten Herausforderung unserer Zeit gehandelt [1]. Sie gilt als Schlüssel zu Nachhaltigkeit, Resilienz, Flexibilität und langfristige Prosperität.

Im zweiten Abschnitt des vorliegenden Beitrags wird dieses Problemverständnis genauer herausgearbeitet und die Notwendigkeit aus aktuellem dem Stand von Umwelt, Technologie und Mensch hergeleitet. Die Vision der Industrie 5.0 wird skizziert wobei auf bisherigen Ansätzen, wie der Industrie 4.0 oder dem MTO-Konzept aufgebaut wird. Abschnitt 3 behandelt Ansätze, die dazu beitragen, dass die

[1] Technische Hochschule Wildau

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Vision der Industrie 5.0 Einzug in die Praxis hält und stellt ausgewählte Methoden vor, die diesen Praxistransfer unterstützen. Schließlich wird in Abschnitt 4 ein ortsflexibler Demonstrator für verschiedenste Digitalisierungsaspekte in der Fertigung vorgestellt und dieser mit Bezug auf die Vision der Industrie 5.0 erläutert. Abschließend wird der Beitrag zusammengefasst als auch ein Ausblick auf weitere Forschungsbedarfe und -ansätze gegeben.

2 Industrie 5.0

Anschließend an die ersten vier industriellen Paradigmenwechsel, der Mechanisierung, Elektrifizierung, Automatisierung und schließlich der Digitalisierung – auch Industrie 4.0 genannt - schließt sich die Humanisierung als Industrie 5.0 an [2]. Die Europäische Kommission beschreibt die Schwerpunkte der *Industrie 5.0* ihrem Verständnis nach als die verstärkte Betrachtung von Mitarbeitenden, Nachhaltigkeit und Resilienz [3]. Dem gegenüber steht die Vision der „vollständigen Integration der Führungskraft in die kybernetische Welt“ [4]. Bisher galt das Paradigma, dass sich der Mensch im Produktionsprozess der Technik unterzuordnen hat und als (Be-)Diener der Maschinen auftrat. Durch den sich verschärfenden Fachkräftemangel und die kürzeren Entwicklungszyklen steigt die physische und psychische Belastung der Mitarbeitenden. Neben dem Fachkräftemangel spiegelt sich in vielen Belegschaften auch der demografische Wandel wider. Ein Anstieg der Arbeitsunfähigkeitstage durch Überbelastung ist oft die Folge [5]. Sind bisher Produktionsmaschinen das knappe Gut der Produktion und

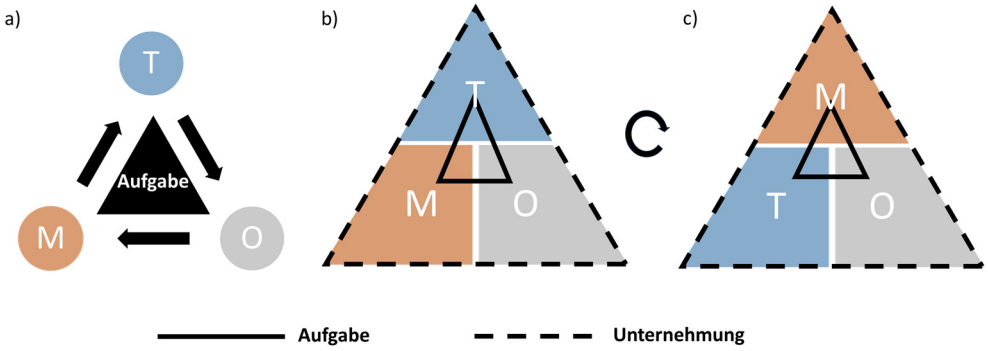


Abbildung 1: Das MTO-Konzept in der Industrie 5.0-Vision

somit durch Mensch und Organisation möglichst hoch auszulasten gewesen (vgl. Abbildung 1 b)), ist hier ein Wandel hin zum Menschen als dominante Ressource zu beobachten (vgl. Abbildung 1 c)).
Die Herausbildung der Industrie 5.0 kann somit einerseits auf die Erkenntnis zurückgeführt werden, dass die fehlende digitale Durchdringung vieler Produktionsbereiche meist nicht mit technischen Problemen zu begründen ist, sondern eher mit der Suboptimalität des bisher wenig beachteten Zusammenspiels von Mensch und Maschine. Dies spiegelt das Auslegungsproblem eines sozio-technischen Systems wider[6]. Um das bisher verwendete Mensch-Technik-Organisation-(MTO)-Konzept mit gängigen Modellierungen von sozio-technischen Systemen in Einklang zu bringen, regen die Autoren folgende Interpretation an: Nach dem MTO-Konzept wird wie in Abbildung 1 a) dargestellt, klassischerweise die Aufgabe als Schnittstelle verstanden: „[Sie] verknüpft einerseits das soziale mit dem technischen Teilsystem, sie verbindet andererseits den Menschen mit den organisationalen Strukturen“ [7]. Jedoch kann beobachtet werden, dass sich viele Unternehmungen meist nicht nur auf eine Aufgabe beschränken und Schnittstellen zwischen den MTO-Dimensionen aufgabenspezifisch geknüpft werden. Der kreative Prozess des Verknüpfens stellt die inhärente menschliche Begabung dar, die trotz aller Bemühungen weiterhin nur bedingt ersetzbar ist.

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Die Autoren plädieren daher dafür das MTO-Konzept dahingehend zu interpretieren, dass eine Unternehmung aus ihrem Bestand an technischen, menschlichen und organisatorischen Ressourcen besteht, die dazu geeignet sind, eine Schar an Aufgaben zu bewältigen. Eine Aufgabe stellt somit eine Instanz der MTO-Klasse dar, wie es mit Abbildung 1 b) verdeutlicht wird.
Es ist zu beachten, dass die Vision der Industrie 5.0 auf den Paradigmen der Industrie 4.0 aufsetzt. Hierbei sind insbesondere die datentechnische Anbindung der Produktionsmittel und die virtuelle Repräsentation durch Datenmodelle zu nennen die folglich in Dualität von cyber und physischen Produktionssystem, einem c*yberphysischen Produktionssystem* (CPS), einem etablierten Modell sozio-technischer Systeme mit Industrie 4.0-Hintergrund, mündet. Die Erweiterung um die hergeleitete soziotechnische Komponente führt zum sozio-cyberphysischen Produktionssystem (SCPPS), welches gute Chancen hat, sich als Standardmodell für die Industrie 5.0 durchzusetzen. Durch die Abkehr vom bestehenden objektorientierten und die Zuwendung zum subjektorientierten (menschzentrierter) Ansatz kann den Auswirkungen knapper menschlicher Ressourcen entgegengewirkt werden. Die Frage die sich nun hieraus aufdrängt lautet: Wie sind menschlich Ressourcen optimal auszulasten, so dass diese nachhaltig einen möglichst hohen Output erreichen, d.h. ohne dass Überlastung auftritt? Menschliche Bioparameter können als erweiterte Entität in bestehenden Systeme Berücksichtigung finden und aktiv zur Regulierung genutzt werden. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt die Konstellation eines SCPPS: Während in der physischen Umwelt das sozio-kognitive System bereits über entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstellen (MMIs) mit dem physischen System und den untergeordneten Arbeitssystemen direkt interagiert, wird die Cyber-Umwelt durch die physische Umwelt mittels bereitgestellter Informationen zu Interaktionsentscheidungen unterstützt. Das Modell zeigt dabei den bisherigen Interaktionsansatz von CPPS-Systemen auf: Prozessdaten wie bspw. Betriebsdaten aus dem physischen System und Systemdaten (bspw. von verschiedenen Anlagen) werden dem Cyber-System bereitgestellt. Diese Daten werden dann in einem virtuellen System analysiert. Die Resultate werden mit dem Cyber-System geteilt und bei Bedarf an das physische System zur Anpassung weitergeleite. Im Zuge der Erweiterung um den sozialen Raum spielt das sozio-kognitive System u.a. mit seinen kognitiven und mentalen Teilsystemen eine entscheidende Rolle. Durch die Interaktion der kognitiven

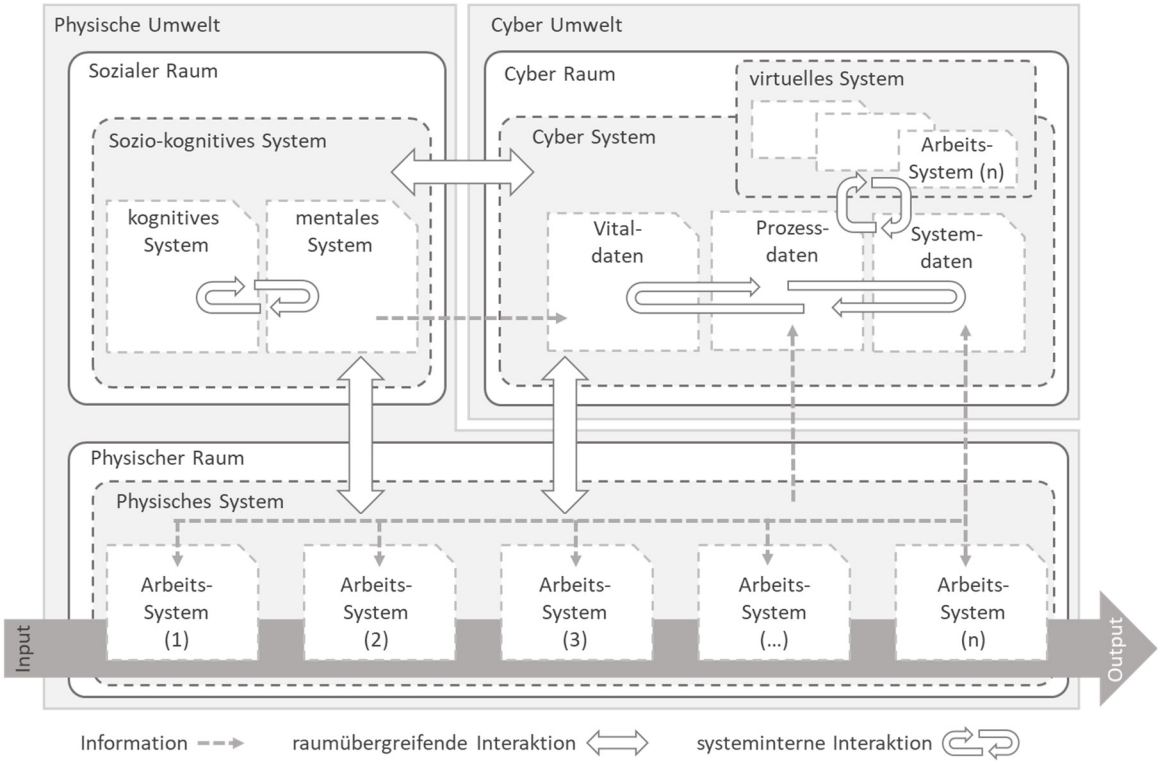


Abbildung 2: Modell für sozio-cyberphysische Produktionssysteme

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Fähigkeiten des Systems und der daraus entstehenden mentalen Belastungen können Vitaldaten bspw. ECG-Werte (Elektrocardiogramm), elektrodermale Aktivitäten (EDA-Werte) oder auch erfasste Emotionen in das Cyber-System eingebettet werden. Durch die Implementierung der Daten in die bestehende Datenstrukturen, kann eine subjektorientierte Steuerung für die Engpassregulierung umgesetzt werden. Das Cyber-System kann nur indirekt auf das sozio-kognitive System einwirken, wodurch es entsprechend der Reaktionen des mentalen Systems agieren und sich somit anpassen muss.

3 Kompatibilität, Change und Akzeptanz

Die Durchsetzungsfähigkeit von Technologien der Industrie 5.0 kann ebenfalls mit Hilfe der Dimensionen Mensch, Technik und Organisation analysiert werden: So kann sie sich technisch nur durchsetzen, was einen Beitrag im Sinne einer Verbesserung der Produktionsfunktion (d.h. in Bezug auf Zeit, Kosten oder Qualität) bewirkt. Weiterhin muss Technologie organisatorisch eingebunden werden und schließlich von den Bedienern, also Menschen, akzeptiert werden. Für jede der genannten Dimensionen wird im Folgenden ein ausgewählter etablierter Ansatz vorgestellt, wobei die Neuerung in der systematischen Kombination dieser dimensionsspezifischen Ansätze liegt. Entgegen der bisher gewählten Reihenfolgen, wird im Folgenden zunächst die Dimension Technik, dann die Organisation und schließlich die Dimension Mensch betrachtet, da dies der Argumentation dient.

Technik: Die Einführung von Technologien im betrieblichen Kontext sollte immer dann angestrebt werden, wenn sie sich positiv auf die Kriterien Kosten, Zeit oder Qualität auswirkt. D.h. wenn sich aus der Einführung eine Kostenreduktion, Qualitätssteigerung oder -stabilisierung erzielen lässt oder wenn sich Fertigungs- bzw. Durchlaufzeiten dadurch verkürzen. Dies entspricht dem Verständnis des Terms *Produktionstechnologie*, wie er in der Produktionswirtschaft, als Teil der Betriebswirtschaftslehre genutzt wird und eine funktionale Beziehung zwischen Input und Output herstellt [8]. Eine isolierte Abwägung ob dieses Kriterium erfüllt wird ist allerdings nicht zielführend. Vielmehr bedarf es einer integrierten Betrachtung, die bestehenden Systeme und die Kompatibilität, Weiterentwicklungspotentiale, Beherrschbarkeit und auch die Implementierungsgeschwindigkeit berücksichtigt. Die Technologie-Portfolio-Analyse (TPA) kann eine solche integrierte Betrachtung unterstützen. Ursprünglich zielt die TPA darauf ab, als Entscheidungshilfe für Entwicklungsinvestitionen für Technologien zu dienen – sprich die Frage zu beantworten: *In die Entwicklung welcher Produkt- oder Prozesstechnologien sollte investiert werden?*
Die Autoren teilen aber die Auffassung von Voigt, dass die TPA auch bei Investitionsentscheidungen, welche vorrangig durch Kauf- als durch Entwicklungsaspekte gekennzeichnet sind, hilfreich sein kann [9]. Im Zuge der TPA sind, wie in Abbildung 3 verdeutlicht, die Indikatoren der Technologieattraktivität als auch der Ressourcenstärke zu bewerten. Technologieattraktivität wird dabei zumeist mit den Unterindikatoren Weiterentwicklungspotential (Leistungssteigerung oder Kostenreduktion), Anwendungsbreite (Übertragbarkeit auf andere Anwendungsbereiche) und Kompatibilität untersetzt. Ressourcenstärke mit technisch-qualitativem Beherrschungsgrad (Know-How), Potentiale (finanzielle, personelle und sachliche Ressourcen zur Potentialausschöpfung) und (Re-)Aktionsgeschwindigkeit (Zeit bis zum Ausschöpfen des Potentials) [10]. Die qualitativ-grafische Analyse mittels Aufteilung des Zeichenbereichs ermöglicht eine managementgerechte Visualisierung wobei der Zielbereich erwartungsgemäß oben rechts verortet ist.

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

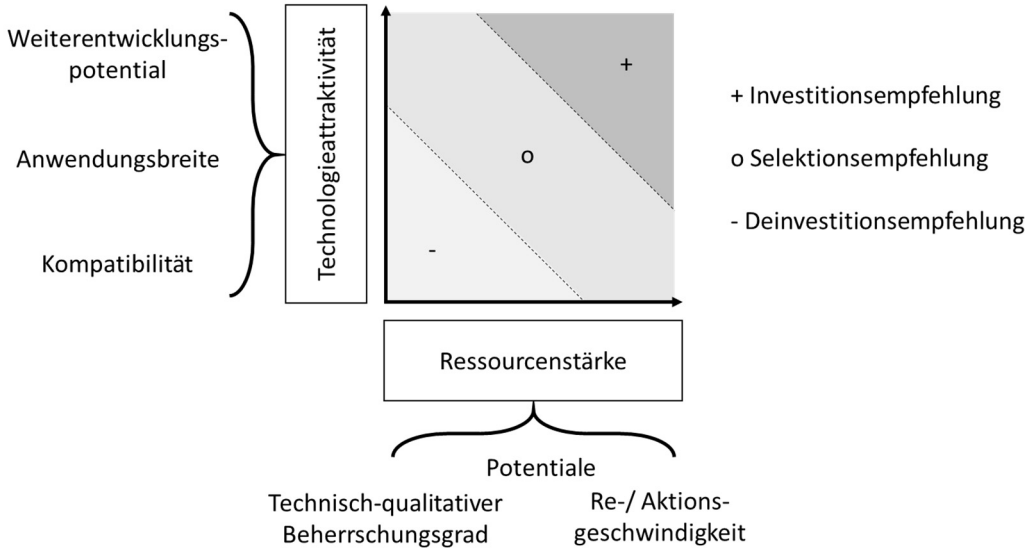


Abbildung 3: Technologie-Portfolio-Analyse nach [10]

Organisation: Wurde eine Technologie identifiziert, die sich bei erfolgreicher Implementierung als technisch vorteilhaft erweist, ist ebendieser Aspekt der erfolgreichen Implementierung zu betrachten. Im Bereich der Geschäftsmodellinnovation wird für die wirksame Änderungsmotivation auf das Ähnlichkeits- oder der Konfrontationsprinzip oder gar eine Kombination beider zurückgegriffen [11]. Die Entlehnung aus dem Bereich der Geschäftsmodelle erscheint umso sinnvoller, wenn Geschäftsmodelle als die Organisation der Wertschöpfung über Stakeholder hinweg verstanden wird. Beim Ähnlichkeitsprinzip werden analoge Branchen oder gar Technologieführer der eigenen Branche betrachtet, und ausgehend von der eigenen Organisation überlegt, wie dort erfolgreiche Innovationen – hier: Technologien der Industrie 5.0 – übertragen werden können. Verschiedene Umfragen insb. im Bereich der Mittelständler und des Handwerks zeigen, dass der Anwendererfahrung aus einer ähnlichen oder gar der gleichen Branche oder einer ähnlichen Unternehmensgröße viel Bedeutung beigemessen wird [[12], [13]].
Radikalere organisatorische Veränderungen bedürfen meist dem Konfrontationsprinzip, wobei ein möglichst unbequemer Konkurrent zu konstruieren ist, der dafür bekannt ist, Innovationen konsequent zu seinem Wettbewerbsvorteil zu implementieren. Die typische Konstruktionsfrage für diese Überlegung lautet: „Wie würde XY unser Geschäft führen?“[11] Die Auslassung XY ist dann wahlweise mit McDonalds, Dell, Aldi, Apple, Swatch, Ryanair, Nespresso, o.ä. zu füllen. Im Falle der Implementierung von Technologien der Industrie 5.0 kann die Konstruktionsfrage abgewandelt werden zu: „Welchen Produktionsprozess hätte XY an unserer Stelle?“ Da beide Prinzipien nicht dazu beitragen, Technologien zu identifizieren, erscheint es sinnvoll diesen Schritt nachgelagert nach der TPA auszuführen. Die Szenarien dienen der organisatorischen Integration und somit zum Erfolg der Implementierung vorausgewählter Technologien.

Mensch: Die tatsächliche Nutzung technischer Systeme hängt jedoch nicht allein vom technisch-wirtschaftlichen Mehrwert oder der organisatorischen Implementierung dieser ab, sondern auch davon, ob diese von den Bedienern wahr- und angenommen werden. Ursprünglich für die Bewertung von informationstechnischen Systemen entstanden, hat sich das Technologie-Akzeptanzmodell (TAM) bei der Anwendung in vielen anderen Bereichen als geeignet erwiesen, diese zu modellieren. So kann es auch einen Beitrag dazu leisten, das tatsächliche Nutzungsverhalten für Lösungen der Industrie 5.0 abzubilden und zur Auslegung dieser beitragen. Abbildung 4 zeigt eine Erweiterung, die allgemein als TAM2 bekannt ist, das Grundmodell TAM jedoch, wie markiert, weiterhin enthält [14]. Das Grundmodell besagt, dass das Nutzungsverhalten hauptsächlich von der Nutzungsabsicht abhängt. Diese Nutzungsabsicht wiederum ist ein Vorsatz, der sich aus der *wahrgenommenen Nützlichkeit* als auch der

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

wahrgenommenen Einfachheit der Nutzung zusammensetzt [15]. Diese latenten (nicht direkt messbaren) Variablen sind mit messbaren Indikatoren zu untersetzen, um eine valide Modellbildung sicherzustellen. Hierbei ist die Indikatorengruppe der sozialen und die der kognitiv-instrumentellen Prozessvariablen zu unterscheiden. Erstere umfasst Freiwilligkeit, Image und subjektive Normen, d.h., wie die Erwartungen der jeweiligen Peergroup die Verhaltensvorsätze beeinflussen. Es konnte nachgewiesen werden, dass dieser Einfluss mit steigender Nutzungserfahrung des technischen Systems sinkt [16].
Während bei der Freiwilligkeit bisher das Primat der Technik galt und der Mensch deren Bedienung zu erlernen hatte, ist aufgrund des in Absatz 2 dargestellten Paradigmenwechsels nun darauf zu achten, dass der Mensch Technik ohne große Anlernzeit intuitiv und intrinsisch motiviert bedient. Größere Unternehmen weisen meist eine Funktionstrennung zwischen den Beschäftigten auf, die Produktionssystemkomponenten auslegen, integrieren, beschaffen und somit um die Vorteile wissen und solchen die sie dann nutzen bzw. bedienen müssen, auch wenn sich ihnen der Nutzen nicht direkt erschließt. Dadurch sind vor allem größere Produktionsbetriebe darin geübt, Nutzungsobligationen, die über die Freiwilligkeit hinausgehen, durchzusetzen. Im Gegensatz dazu ist bspw. in Kleinstbetrieben, wie dem Handwerk die große Bedeutung der Freiwilligkeit augenfällig. Wer soll der Inhaberin und Meisterin eines Handwerksbetriebs eine Lösung überhelfen? Vielmehr kann hier eine starke Imagefokussierung beobachtet werden, wie sie die Werkzeughersteller, neben den Einschränkungen im Ökosystem (Kompatibilität bzgl. Akku,- Schienen-, Adapter-, Verstausysteme) mit ihren Marken pflegen. Eine gelungene Strategie der Akzeptanzbildung kann hierbei bspw. in der Spielzeugserie Bosch der Theo Klein GmbH gefunden werden [17].

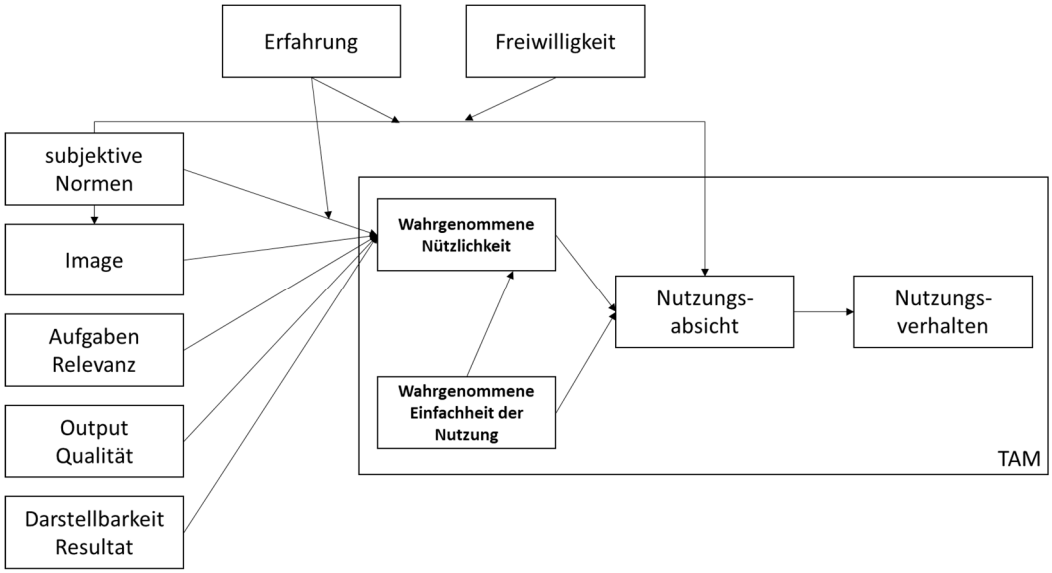


Abbildung 4: Technologieakzeptanzmodel – vgl. [14]

Die drei vorgestellten Modelle bzw. Methoden geben einen guten Überblick darüber, wie die MTO-Dimensionen im Sinne der Industrie 5.0 adressiert werden können. Gleichzeitig bildet die Reihenfolge auch ein methodisches Vorgehen ab, dass die Bewertung, Implementierung und Akzeptanz von einzuführenden Technologien umfasst. Die Validierung steht jedoch aus. Im folgenden Abschnitt wird ein Ansatz für die Akquise der, zur Validierung notwendige, Datengrundlage vorgestellt.

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Praxisansätze

Einen Ansatz zum Wissens- und Technologietransfer stellt die *Prescriptive Education* dar [2]. Dieser ist nicht nur auf die Lehre, sondern auch für das lebenslange Lernen in betrieblichen Projekten adaptierbar. Für die Empfehlungen durch den Lernpartner kann der Modellansatz der Prescriptive Education durch den Einsatz des Berliner Intelligenzstrukturmodells von Jäger zur Prüfung der normativen Wissensbestände als auch der bestehenden Kompetenzfelder herangezogen werden [18]. Der so erfasste Wissensstand hilft dem Lernpartner bei der Auswahl des jeweiligen Lehrpfades. Durch das *Elaboration Likelihood Modell* kann zudem auf den Aspekt der stärkeren Belastung des Arbeitsgedächtnis eingegangen werden [19]. So lässt sich nach Jipp und Steil festhalten, dass Menschen mit einer geringeren Arbeitsgedächtniskapazität kognitive Anstrengungen meiden und dabei eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeiten durch Heuristiken akzeptieren [20]. Dahingegen bauen sich Menschen mit einer höheren Arbeitsgedächtniskapazität sowie einer höheren Informationsverarbeitungskapazität mentale Modelle auf, wodurch diese eine geringere Fehlerwahrscheinlichkeit erreichen.
So muss im Ansatz der Prescriptive Education wie auch für zukünftiger SCPPS-Modelle eine Flexibilität des Lern-, Arbeits- und Belastungsumfangs bedacht werden, welcher sich individuell auf die kognitiven Fähigkeiten der sozio-kognitiven Systeme anpasst. Rein adaptierbare oder adaptive Systeme werden nur schwer die benötigte Akzeptanz für das benötigte lebenslange Lernen bieten. Es ist damit zu rechnen, dass die kognitiven Fähigkeiten sogar abnehmen werden. Lernende Systeme könnten das benötigte Potenzial besitzen, verlangen jedoch nach Alternativen, um sich an die Fähigkeiten und die Vitaldaten der sozio-kognitiven Systeme anpassen zu können. Ein Ansatz ist hier neben den Einsatz verschiedener Technologien auch die Stressbelastung zu beachten. Ein Beispiel für die Implementierung verschiedener Technologien bietet die Roadshow als mobile Demonstrationsplattform, wodurch Technologien erprobt und Ängste gegenüber neuen Kollaborationsmöglichkeiten abgebaut werden.

4.1 Demonstrationszentrum “Roadshow”

Zur Steigerung der Akzeptanz von bestehenden und neuen Technologien wurde im Rahmen der Mittelstand-Digital Initiative des BMWi eine Roadshow am Standort Wildau aufgebaut. Die Roadshow bildet über zehn vernetzte Stationen hinweg eine innerbetriebliche Wertschöpfungskette ab. Am Fallbeispiels eines Knobelspiels bzw. eines 3D-Puzzels, dem Teufelsknoten (s. Abbildung 6), wird der typische Weg durch ein Produktionssystem mit den entsprechenden Schnittstellen dargestellt und vielseitige Möglichkeiten zur Digitalisierung aufgezeigt. Die Roadshow umfasst zwei s.g. Wechselkoffer (s. Abbildung 5 a)) und kann mit nur einem Zugfahrzeug Transferideen dorthin bringen, wo sie benötigt werden. Bei einem Durchgang lernen die Teilnehmenden verschiedene Möglichkeiten der Rückverfolgbarkeit mittels NFC, QR- oder Barcode kennen; welche Möglichkeiten der 3D-Druck neben der klassischen Zerspannung bietet; wie mittels Cloud-Lösung und Robotic-Process-Automation (RPA) Daten transportiert werden können; wie verschiedene Assistenzsysteme Unternehmensprozesse, Montageprozess oder die Kommissionierung unterstützen können; wofür AR / VR / IIoT bei der Instandhaltung und Maschinenüberwachung eingesetzt werden können; oder wie KI und Robotik in der Qualitätssicherung sowie im Sortierprozess unterstützen kann. Der geneigte Leser kann sich gern selbst ein Bild von der Roadshow machen: Aktuelle Termine und Veranstaltungsorte sind unter www.kompetenzzentrum-cottbus.digital/Veranstaltungen zu finden. Im Rahmen dieses Beitrags soll lediglich die Montagestation detaillierter im nächsten Unterabschnitt dargestellt werden. Mit der ortsunabhängigen, praxisnahen und pragmatischen Demonstration kann der Transfer durch gesteigerte Bekanntheit und ein besseres Bewusstsein für derartige Technologien gestärkt werden. Zusätzlich wird die Innovationsstärke gefördert, indem Anstöße zur Weiterentwicklung für die eigene Nutzung gegeben werden und das Team des Kompetenzzentrum in s.g. Umsetzungsprojekten bei den ersten Schritten mit Expertise zur Seite steht.

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Abbildung 5: Die Roadshow - Digitalisierung on Tour

4.2 Montageanleitung

Im Rahmen der zehn Stationen befindet sich an der neunten Station ein Montageplatz. Am Beispiel dieser Montagestation werden, entsprechend der Abbildung 6, Systeme der klassischen schriftlichen Unterweisung mit Systemansätzen wie der Mixed und Augmented Reality (AR) oder Sprachsteuerung mit interaktiver Projektion gegenübergestellt. Weitere Szenarien und Anwendungsszenarien befinden sich in der Entwicklung. Am Beispiel der Station können neben der Erprobung der Technologien auch Untersuchungen zur Akzeptanzbildung, der Stressbelastungen sowie die daraus resultierenden Lernerfolge durchgeführt werden.
Um den Ansatz der Stressregulierung Rechnung zu tragen, wurde eine Proof-of-Concept Studie mittels Biosignalen zur Analyse der Stressbelastungen zwischen der klassischen schriftlichen Arbeitsanweisung und einer Mixed Reality Technologien durchgeführt. Ähnlich dem Ansatz des Elaboration Likelihood Modells konnten die Probanden zwischen den beiden Technologien wählen, dabei war es egal welchen Ausbildungsstand und welche kognitiven Fähigkeiten sie im Vorfeld aufwiesen. Mittels eines

Abbildung 6: Montageanleitung 5.0

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

dreiphasigen Ansatzes konnten die Herangehensweisen zwischen den Probandengruppen untersucht und analysiert werden. So konnte wiederholt in der Studie der heuristische Ansatz zur Montage der Baugruppe bei der schriftlichen Arbeitsanweisung beobachtet werden, bevor eine strukturierte Montage unter Zuhilfenahme der Vorlage erfolgte. Durch das starre System von digitalen Technologien und den darin vordefinierten Arbeitsanweisungen konnten die Probanden nur eine einzige strukturierte Montage vornehmen. Dies gilt Einerseits für die Montage wie auch für die Demontage zur Wiederholung der Schritte und zum Aufbau der mentalen Prozessmodelle.
Es zeigte sich, dass die subjektiven Einschätzungen im Studienverlauf nicht mit den erfassten Biosignalen übereinstimmen. Wodurch eine Erfassung u.a. von Vitalwerten für ein SCPPS-System relevant erscheint. Hierbei ist neben der Erfassung von Alter und Geschlecht, Qualifizierung wie auch des Arbeitsumfelds von entscheidender Bedeutung. Auch müssen die Parameter, von der individuellen Norm abweichend sind, im System erfasst werden. Das Arbeitsumfeld bestimmt dabei die Definition und Erfassung der entsprechenden Biosignale. Sitzende Aktivitäten lassen den Einsatz einzelner Vitalwerte relativ einfach zu. Dahingegen sind Aktivitäten im Bewegungsbereich, welche ein sozio-cyberphysisches Produktionssystem beinhaltet mit gekoppelten Systemansätzen notwendig, um entstehende Fragmente bei der Erfassung und Auswertung evaluieren und interpretieren zu können.
In den ersten Untersuchungen mittels ECG-Messungen konnte während der Montage bei den Probanden mit technischem Grundwissen eine leicht erhöhte Stressbelastung beim Einsatz analoger Hilfsmittel beobachtet werden. Bei den Probanden ohne technisches Grundwissen fiel die Analyse im Gegensatz dazu konträr aus, hier konnte ein Delta von 14% zwischen digitalem und analogem Hilfsmittel ermittelt werden. Durch die strukturierte Montage mittels digitaler Hilfsmittel ist jedoch die Stressbelastung im Nachgang durchschnittlich um 11% geringer ausgefallen. Zudem konnte die Montagezeit für den korrekten Zusammenbau durch den Einsatz digitaler Hilfsmittel gesenkt werden. Der Einsatz digitaler Hilfsmittel unterstreicht zwar eine temporäre Belastung im Lernprozess, jedoch erfolgt die Ausübung der Tätigkeit in der dritten Phase belastungsfreier, wie die Vitalwerte zeigten. Hierbei ist auch zu beachten, dass Emotionen in der Proof-of-Concept Studie nicht mit eingegangen sind, jedoch dessen Auslösung bspw. durch das versehentliche Fallenlassen oder eines fehlerhaften Montageschritts sich in den Vitalwerten widerspiegeln. Der Ausschnitt in Abbildung 7 zeigt den abnehmenden Belastungsfaktor über die Peak-Intervalle (RR-Intervalle) zwischen der ersten und dritten Phase beim Zusammenbau der Montagegruppe. Wodurch die Proof-of-Concept erbracht scheint.

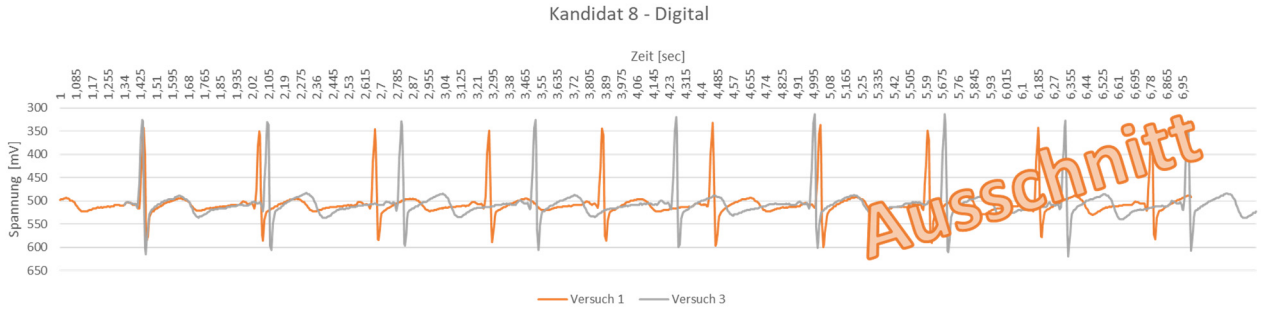


Abbildung 7: Ausschnitt einer ECG Messung im Rahmen der Proof-of-Concept-Studie

5 Diskussion und Ausblick

Zur Umsetzung einer menschzentrierten Industrie 5.0 bedarf es neben Nachhaltigkeitsaspekten auch ein Umdenken von bestehenden Ansätzen für zukünftige Produktionssysteme. Der Beitrag zeigt dabei auf, wie zukünftige Produktionssystem durch die Menschzentrierung für eine Industrie 5.0 umgesetzt werden können. Die drei Dimensionen Mensch, Technik, Organisation werden in ein dreiphasiges Vorgehen zur Unterstützung bei der Auswahl, organisatorischen Einbindung und Akzeptanzbildung aufgegriffen. Die Entwicklung der Ansätze für soziotechnische Systeme beschreibt einen Ansatz der Implementierung weißt entsprechend der Proof-of-Concept Studie verschiedene Stellhebel auf, welche

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

in nachfolgenden Untersuchungen näher betrachtet werden sollten. Gerade der dynamische Ansatz erfordert zusätzliche Anforderungen an die Systeme und die spätere Datenanalyse und steckt hierfür ein breites Forschungsgebiet für die Thematik ab. Bevor es jedoch langfristig in die Umsetzung von sozio-cyberphysischen Produktionssystemen geht, muss neben dem Ansatz der Prescriptive Education auch die Akzeptanz für zukünftige Technologien gesteigert werden. Das TAM bietet hierfür einen Ansatz, welcher für diesen Anwendungsfall näher betrachtet und verfeinert werden sollte. Gerade für kleinere Unternehmen bedeutet der Einsatz neuer Technologien hohe Investitionen, welche nur durch die Mitnahme der Mitarbeiter ihr volles Potential entfalten können. So sind die Anwendung und Validierung des Technologieakzeptanzmodells vor allem für mittlere und kleine Unternehmen bisher kaum bis gar nicht überliefert und bietet einen Ansatzpunkt für weitere Forschung in dem Umfeld.

6 Literatur

[1] A. Merkel, “Rede der Bundeskanzlerin zum großen Zapfenstreich,” *2.12.2021*. Berlin, Accessed: Dec. 5, 2021. [Online]. Available: https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/bulletin/rede-von-bundeskanzlerin-dr-angela-merkel-1987488.

[2] N. Günther and J. Reiff-Stephan, “Prescriptive Education im Zuge der Industrie 5.0,” in *AALE*, no. March, J. Jäkel and R. Thiel, Eds. Leipzig: VDE Verlag, 2020, pp. 315–320.

[3] The European Commission, *Industry 5.0 - Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*. 2021.

[4] A. Albrecht, “Ausblick: Leadership 4.0,” in *Zukunftsgerecht führen*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, pp. 225–233.

[5] T. Krankenkasse, “Gesundheitsreport Arbeitsunfähigkeit,” 2019.

[6] N. Günther and J. Reiff-Stephan, “Future Skills für die Produktion von Morgen,” in *AALE 2019*, 2019, no. February.

[7] E. Ulich and M. Wülser, *Gesundheitsmanagement in Unternehmen*. Wiesbaden: Springer, 2012.

[8] G. Fandel, *Produktion I*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

[9] K.-I. Voigt, *Industrielles Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

[10] W. Pfeiffer and R. Dögl, “Das Technologie-Portfolio-Konzept zur Beherrschung der Schnittstelle Technik und Unternehmensstrategie,” in *Strategische Unternehmungsplanung / Strategische Unternehmungsführung*, Physica-Verlag HD, 1990, pp. 254–282.

[11] O. Gassmann and M. Csik, “Change a Running System,” in *Die Kunst der Innovation*, P. Granig and E. Hartlieb, Eds. Wiesbaden: Springer, 2012, pp. 41–49.

[12] A. Owen, W. Plöger, G. Hiltner, and A. Reith, “Digitalisierungsbarometer für das Bau-und Ausbauhandwerk Kurzfassung Eine empirische 360° Analyse,” 2020. [Online]. Available: www.wirsindhandwerk.de.

[13] N. Veltkamp and K.-S. Schulte, “Digitalisierung des Handwerks,” 2020. [Online]. Available: https://www.zdh.de/fileadmin/user_upload/presse/Pressemeldungen/2020/200304_Praesentation_DigitalesHandwerk_V5.pdf.

[14] V. Venkatesh and F. D. Davis, “Theoretical extension of the Technology Acceptance Model: Four longitudinal field studies,” *Manage. Sci.*, vol. 46, no. 2, pp. 186–204, 2000, doi: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926.

[15] F. D. Davis, “A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems,” Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1986.

[16] M. Jockisch, “Das Technologieakzeptanzmodell,” *„Das ist gar kein Modell!“*. Gabler, pp. 233–254, 2010, doi: 10.1007/978-3-8349-8484-5_11.

[17] “Bosch Werkzeug - Klein Toys Shop.” https://www.klein-toys-shop.de/Produktgruppen/Werkzeug-oxid-1/Bosch-Werkzeug/ (accessed Dec. 7, 2021).

[18] A. O. Jäger, “Intelligenzstrukturforschung: Konkurrierende Modelle, neue Entwicklungen, Perspektiven. [Structural research on intelligence: Competing models, new developments, perspectives.],” *Psychol. Rundschau*, vol. 35, no. 1, pp. 21–35, 1984.

[19] R. E. Petty and J. T. Cacioppo, “The Elaboration Likelihood Model of Persuasion,” 1986, pp. 123–205.

[20] M. Jipp and J. Steil, “Steuern wir oder werden wir gesteuert? Chancen und Risiken von Mensch-Technik-Interaktion,” in *Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, pp. 17–34.

Open Access. © 2022 N. Günther, B. Prell1, J. Reiff-Stephan1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Remote-Engineering und bildgestützte Inbetriebnahme mit einer Web-SPS

M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter[1]

Zusammenfassung

Schwer zugängliche Anlagen müssen per Fernwartung projektiert und in Betrieb genommen werden. Während der Corona-Krise rückten die hierfür zugrundeliegenden Technologien auch in den Blickpunkt der Lehre, um Studierenden, die keinen Zugang zu den Versuchsaufbauten an der Hochschule hatten, die Interaktion mit realen Anlagen zu ermöglichen.
Deshalb wurde an der Hochschule Mannheim ein System entwickelt, das Kommunikationskonzepte der Industrie 4.0 zur Vernetzung von Steuerungen im Internet, das cloudbasierte Engineering sowie die bildgestützte Inbetriebnahme an einer realen Experimentieranlage veranschaulicht.
Eine automatische Bildauswertung soll die Anlage überwachen, um Störfälle, die etwa durch Programmierfehler eintreten könnten, zu vermeiden. Aber auch schlecht eingestellte Regler oder unzureichend kalibrierte Sensorik, was z.B. durch Alterung verursacht sein kann, soll durch die Bildverarbeitung automatisch erkannt werden. Die Bildverarbeitung dient somit zur automatisierten Erfolgskontrolle der entwickelten Software und der in Betrieb genommen Anlage.

Stichwörter

Remote-Engineering, Web-SPS, Bildverarbeitung, Inbetriebnahme, Erfolgskontrolle

1 Einleitung

Die Vernetzung und Cloud-Anbindung von Automatisierungssystemen steht gegenwärtig im Fokus der Industrie 4.0. SPSen mit Edge-Interfaces ermöglichen eine Cloud-Anbindung und den Zugriff von Remote-PCs aus dem Internet.
Dabei ist die zugrundeliegende Technologie schon lange bekannt [1,2]. Fast alle Automatisierungssysteme bieten heutzutage eine Webvisualisierung an [3], auch das Remote-Engineering mit Zugriff auf die Steuerungshardware über das Internet mit entsprechenden Sicherheitsmechanismen ist Stand der Technik [4,5]. SPSen oder mini-PCs wie der Raspberry-Pi werden heute oft als Edge-Gateways verwendet, um Sensordaten an die Cloud zu senden und von dort Befehle zu erhalten [6,7].
Für eine Remote-Inbetriebnahme können Webcams zur Beobachtung der Anlage eingesetzt werden [4]. Aber die Integration von Bildverarbeitungssystemen in heutige SPSen steht noch am Anfang [8,9].
In diesem Beitrag wird deshalb ein System vorgestellt, das mit Hilfe von Bildverarbeitung eine automatisierte Remote-Inbetriebnahme ermöglicht. Der Anwender kann die Anlage aus der Ferne über eine Webcam beobachten und wird durch eine automatisierte Bildauswertung bei der Inbetriebnahme unterstützt.
Die Bildverarbeitung dient dabei zur Anlagenüberwachung und kann auch während des Betriebs Störungen infolge schlecht kalibrierter Sensoren oder schlecht eingestellter Regler erkennen. Anhand des Experimentalaufbaus nach Bild 1 werden Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Bildverarbeitung beim Remote-Engineering und bei der Remote-Inbetriebnahme untersucht.

[1] Hochschule Mannheim, Institut für industrielle Automatisierungssysteme

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

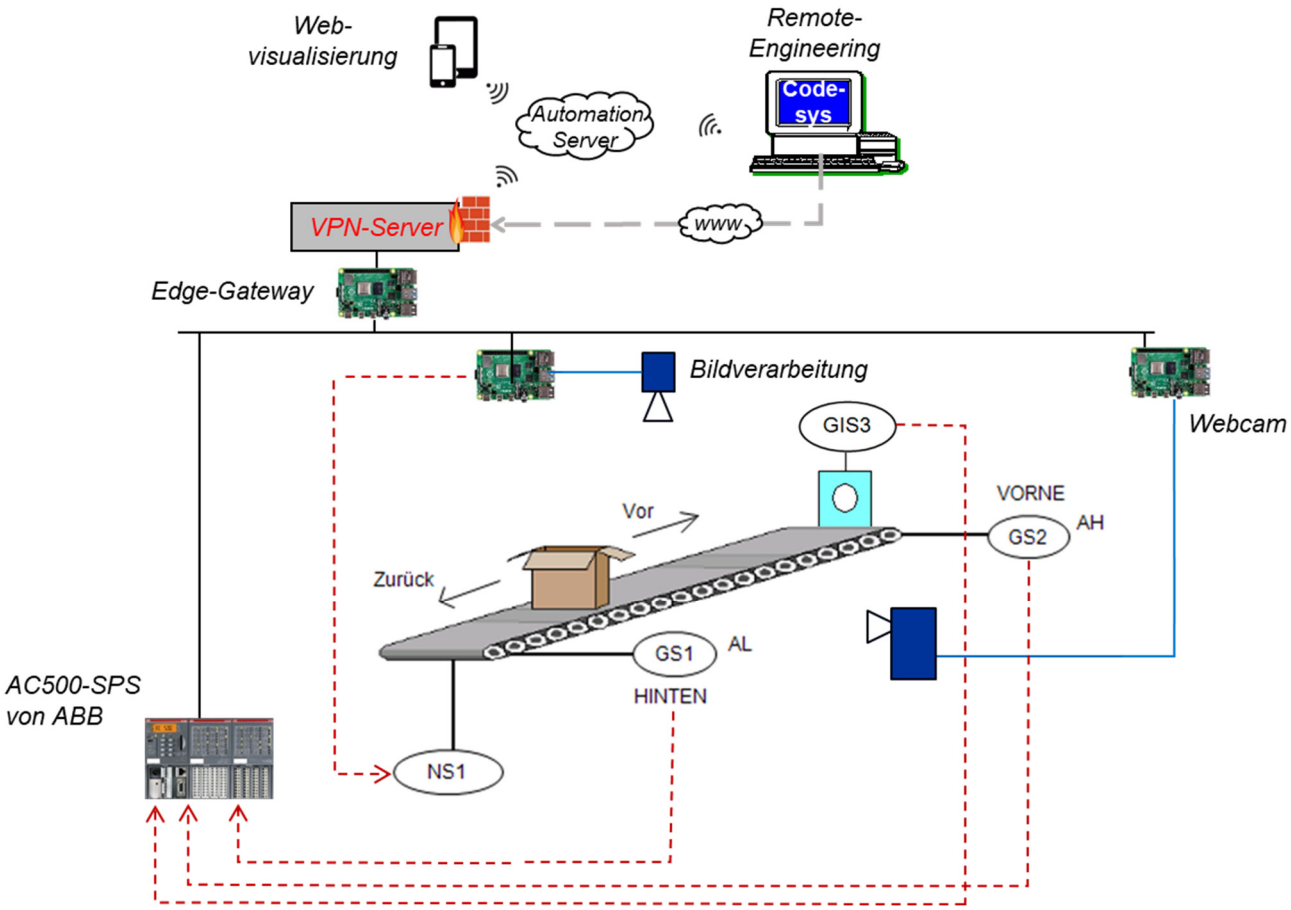


Bild 1: Aufbau des Experimentalsystems zum Remote Engineering. Das Förderband wird durch den Motor NS1 angetrieben, der wie die Endschalter GS1 und GS2 sowie der Ultraschallsensor GIS3 von einer SPS und einem Raspberry-Pi gesteuert werden

2 Remote-Engineering für vernetzte Automatisierungssysteme

Für ein Remote-Engineering gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die meisten SPSen wie die AC500 in Bild 1 ermöglichen die Ankopplung eines Engineering-PCs über eine LAN- bzw. WLAN-Verbindung, so dass grundsätzlich von jedem PC im Steuerungsnetzwerk auf die SPS zugegriffen werden könnte. Natürlich muss das Netzwerk dann durch Firewall, Virenscanner, Authentifizierung und andere Maßnahmen der IT-Security nach IEC 62433 geschützt sein [10]. Durch einen VPN-Server können auch Rechner aus dem Internet in das virtuelle private Netzwerk integriert werden und auf die SPSen zugreifen.

2.1 VPN-Server

Für den Internet-basierten Zugriff auf die Steuerung läuft der Web-Server in der SPS. Mit Routern wird ein sog. VPN-Tunnel aufgebaut, der die Internet-Verbindung gegen Fremdeinwirkung schützt. Dabei wird jeweils ein Router im Segment des Servers und im Segment des Clients eingesetzt. Der VPN-Client kann auch als Software auf dem Engineering-PC laufen, wobei das Sicherheitsrisiko bei einer Softwarelösung immer etwas höher ist als bei der Realisierung mit Hardware.
Die Router bieten Verschlüsselungssysteme für geschützte Verbindungen, wie das IPSec-Protokoll (Internet Protokoll Security). Mit dieser Verschlüsselung schafft man eine Verbindung, die von außen geschützt ist und intern die Möglichkeit gibt, alle Teilnehmer über lokale IP-Adresse anzusprechen [6].

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Nach der Konfiguration des VPN/IPSec-Tunnels ist das Handling genau so, als wären die Teilnehmer am Engineering-PC durch ein Netzwerkkabel mit den Steuerungen verbunden.

2.2 Web-SPS

Das Förderband in Bild 1 kann von einer AC500-SPS oder einem Raspberry-Pi angesteuert werden. Auf beiden Systemen läuft Codesys, jedoch im ABB Automation Builder in einer älteren Version. In diesem Beitrag soll die Sensorik von der SPS eingelesen werden, ein Raspberry-Pi, der mit Hilfe einer Bildverarbeitung die Position der Kisten auf dem Förderband ermittelt, steuert den Förderbandantrieb. Beide können aus der Ferne über VPN programmiert werden.
Ein weiterer Raspberry-Pi liefert mit Hilfe einer Webcam Live-Bilder der Szene, so dass der Entwickler die Auswirkungen seiner Programmierung bei der Remote-Inbetriebnahme beobachten kann.
Die Raspberry-Pis können in den Codesys Automation Server eingebunden werden, die AC500 jedoch nicht. Um die Sensordaten nutzen zu können, sollen sie als Netzwerkvariablen von der AC500 an ein Codesys-Projekt im Raspberry-Pi gesendet werden, der in den Automation Server eingebunden ist und ein Cloud-basiertes Engineering ermöglicht.
In unserem Experimentalaufbau laufen die Raspberry-Pis aber in einer neueren Version als im ABB Automation Builder der SPS, so dass der Datenaustausch über UDP-Netzwerkvariablen zwischen der AC500 und dem Raspberry-Pi leider nicht funktionierte. Deshalb wurden im Verlauf der Experimente auch die Sensoren von dem Raspberry-Pi eingelesen, der auch die Bildverarbeitung ausführt.
Zum Bedienen und Beobachten der Anlage wird eine Codesys-HMI auf dem Raspberry-Pi realisiert, die auch eine Webvisualisierung ermöglicht. Somit kann der Anwender aus dem Web-Browser heraus ohne die Codesys-Entwicklungsumgebung die Anlage bedienen und beobachten (vgl. Bilder 3 und 6).

2.3 Edge-Gateway und Cloud Engineering

In großen Anlagen arbeiten viele Ingenieure an einem Projekt, auch in unserem Beispiel arbeiten viele Studierende mit der Förderbandanlage. Ein Planungsdokument wird oft von mehreren bearbeitet und verändert. Dazu ist es notwendig, die Dokumente in der Cloud abzulegen, in verschiedenen Versionen zu verwalten und die Zugriffsrechte zu regeln. Durch die zentrale Datenverwaltung hat der Benutzer den Vorteil, sich nicht um die Speicherung und Sicherheit seiner Daten selbst kümmern zu müssen, denn dies übernehmen die Services der Cloud.
Der Codesys Automation Server ermöglicht das Engineering in der Cloud. Dazu werden die SPS-Softwareprojekte über ein Edge-Gateway in der Cloud gespeichert. Der Entwickler sieht wie in Bild 2 dargestellt die eingesetzten SPSen und deren Betriebszustand. Außerdem sieht er die auf den SPSen laufenden Applikationen, die er von seinem Remote-PC aus mit dem Programmiersystem öffnen, verändern und wieder in die SPS laden kann. Ein gemeinsamer Zugriff ist somit kollisionsfrei möglich, was beim einfachen Zugriff über VPN wie Abschnitt 2.1 und 2.2 beschrieben zu Problemen führen kann.
Durch ein Edge-Gateway stellt der Codesys Automation Server eine sichere Verbindung zwischen den SPSen und der Cloud her. Dabei werden die Daten verschlüsselt von den Steuerungen über ein Transport Layer Security (TLS-Protokoll) an die Cloud übertragen [4]. Dies ermöglicht wie in Bild 2 gezeigt die Verwaltung mehrerer Steuerungen und ihrer Software im Webbrowser auf PC, Tablet oder Smartphone.

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

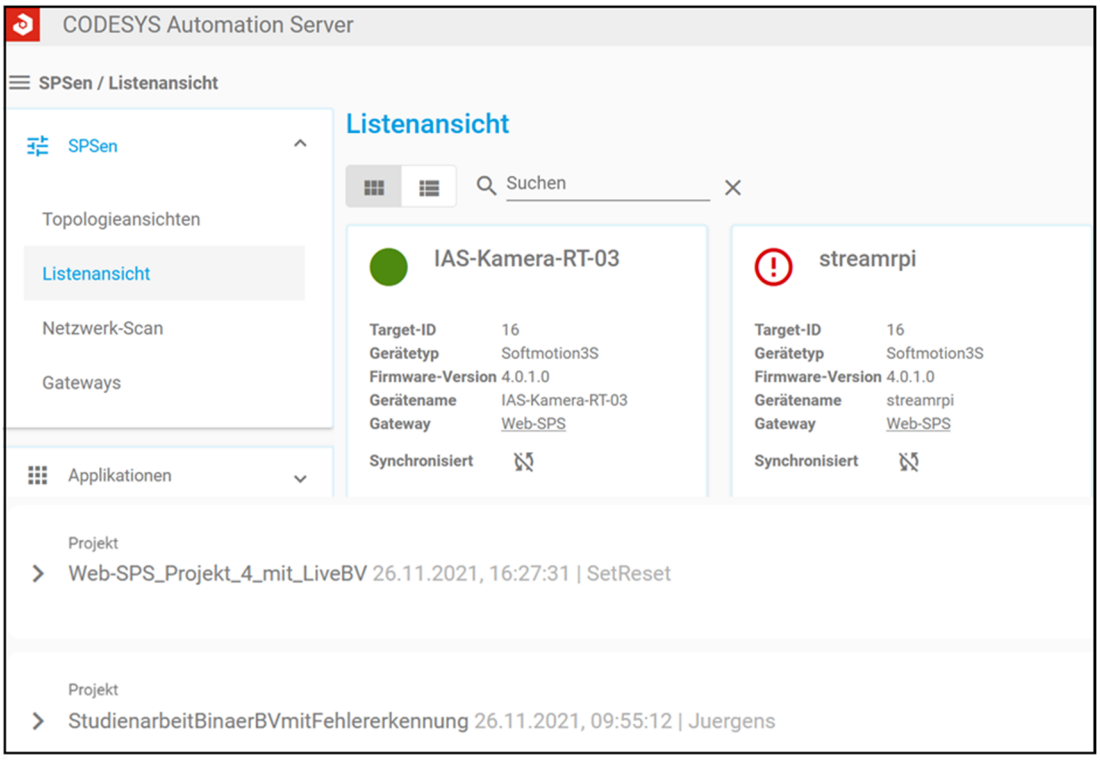


Bild 2: Cloud Engineering mit dem Codesys Automation Server, mit dem die Zustände der eingesetzten Hardwaremodule dargestellt und SPS-Projekte aus der Cloud geöffnet und bearbeitet werden können

3 Bildgestützte Inbetriebnahme

Eine Inbetriebnahme aus der Ferne benötigt Kameras, damit die Anwender die Bewegungen und Veränderungen in der Anlage beobachten können. Um nicht von der menschlichen Aufmerksamkeit abhängig zu sein, werden die Bilder automatisiert ausgewertet, so dass Fehler oder die erfolgreiche Ausführung der Automatisierung auch quantitativ bewertet werden.

3.1 Streaming in die Prozessvisualisierung

Handelsübliche Webcams liefern zwar Bilder als Live-Stream von der in der Ferne installierten Anlage, doch dazu ist meist eine mitgelieferte App erforderlich. Wünschenswert wäre die Einbindung des Live-Streams in die Prozessvisualisierung des Automatisierungssystems.
Mit einer am Raspberry-Pi angeschlossenen Webcam können Videostreams wie in Bild 3 veranschaulicht in der Webvisualisierung von Codesys dargestellt werden. Dazu wird der Videostream in eine html-Datei eingebunden. In der Visualisierung wird ein Webbrowser-Element angelegt und der Name der html-Datei sowie die IP-Adresse des Raspberry als URL spezifiziert.
Wenn das Programm ausgeführt wird, kann das Webbrowser-Element in Bild 3 als Webclient die URL beim Webserver anfordern. Dieser überträgt dann die html-Datei an die Webvisualisierung, die dann die Webseite mit dem Videostream anzeigt.
Als Webcam wird eine Weitwinkelkamera eingesetzt, die zwar einen großen Bildbereich zeigt, aber auch starke Linsenverzerrungen (Fischaugeneffekt) verursacht. Wenn Anlagen über große Strecken verteilt oder schlecht zugänglich sind, ist es sinnvoll, mit einer zweiten genaueren Kamera, eine automatisierte Bildverarbeitung zur Anlagenüberwachung durchzuführen.

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

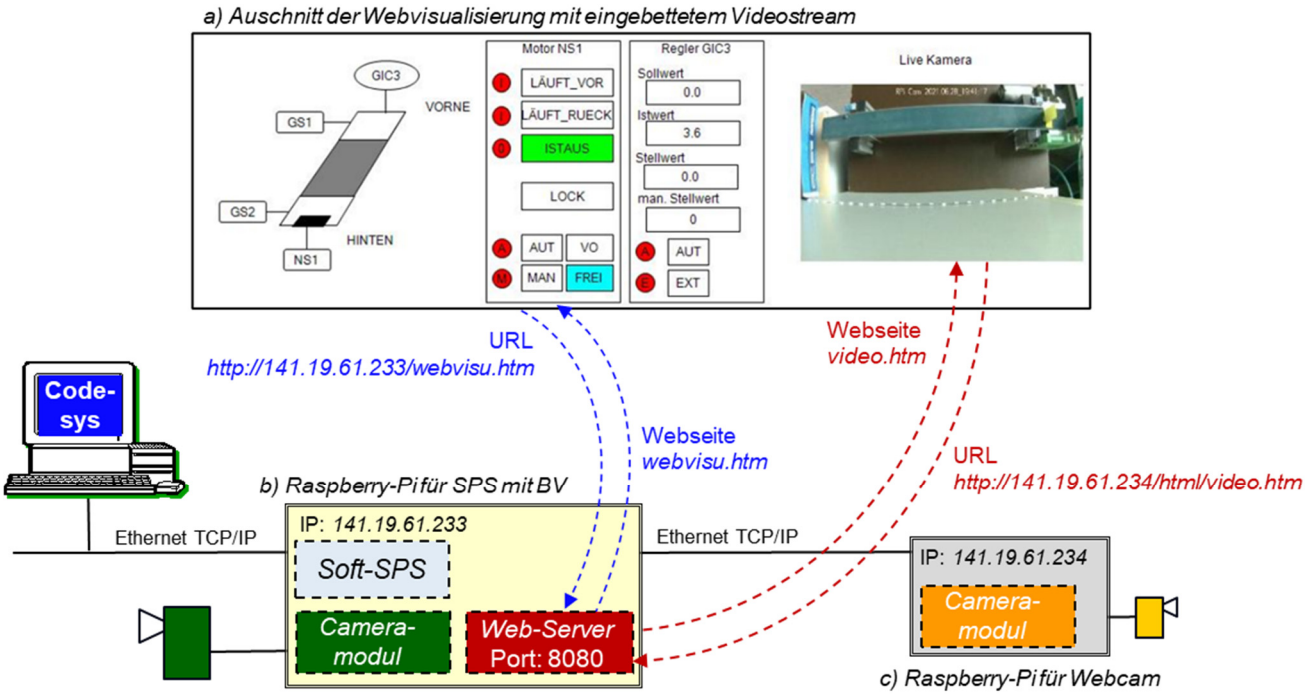


Bild 3: Anzeige- und Bedienoberfläche mit eingebettetem Video-Stream der Webcam

3.2 Bildverarbeitung zur Erfolgskontrolle

Zur Bildauswertung wird eine Kamera mit größerer Brennweite und entsprechend weniger Linsenverzerrungen eingesetzt. Diese kann z.B. analysieren, ob das transportierte Objekt die vorgegebene Sollposition erreicht hat oder ob der Antrieb an den Bandenden anhält, damit das Objekt nicht herunterfällt.

Da die zu überwachenden Positionen bekannt sind, wird die Bildverarbeitung wie in Bild 4 veranschaulicht quasi als Lichtschranke benutzt. Dabei wird ausgenutzt, dass sich auf dem dunklen Förderband vergleichsweise helle Objekte befinden. Dadurch kann in den relevanten Bildregionen die Anzahl heller Pixel gezählt werden, wodurch die Anwesenheit eines Objekts in einem Überwachungsbereich schnell erkannt wird.

Da in diesem Projekt eine Web-SPS eingesetzt wird und jeder Studierende seine Software aus der Ferne ausprobieren soll, kann kein reales Objekt auf dem Förderband transportiert werden, weil dies bei Programmierfehlern herunterfallen könnte und niemand vor Ort es wieder auf das Band setzen kann.

Deshalb wird ein flexibles Objekt aus Pappe auf das Band geklebt, so dass es auch über das Bandende hinaus und auf der Unterseite des Bandes wieder zurück auf die Oberseite fahren kann. Dieses Objekt berührt zwar nicht die Endschalter GS1 bzw. GS2 an den Bandenden, aber die Bildverarbeitung kann das erreichte Bandende erkennen und den Förderbandantrieb abschalten. Die Bildverarbeitung ersetzt somit die beiden Endschalter und kann auch den Ultraschall-Abstandssensor GIS3 ersetzen, indem sie an der vorgegebenen Sollposition die Anwesenheit des Objekts und damit das erfolgreiche Anfahren der vorgegebenen Sollposition erkennt.

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

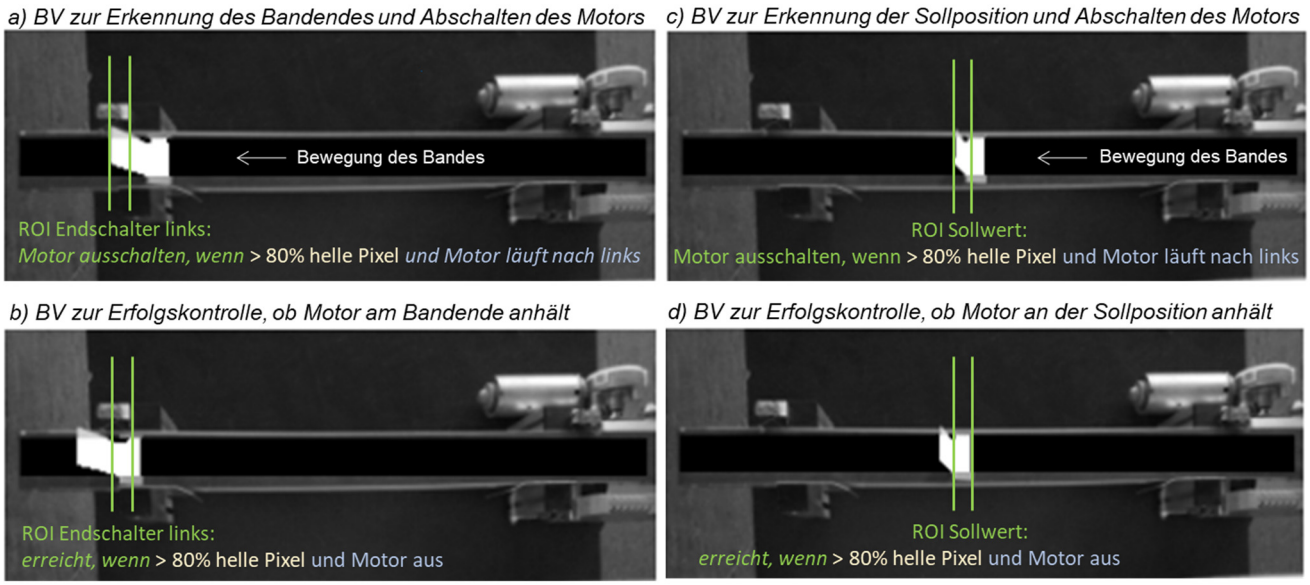


Bild 4: Überwachung der Position der beiden Endschalter sowie der Sollposition, die bei einer Positionsregelung vorgegeben wird

3.3 Erkennung von Störfällen durch Bildverarbeitung

Wenn Anwender aus der Ferne ihre Software in die Web-SPS spielen und ausprobieren, kann es passieren, dass Programmierfehler nicht gefunden und korrigiert werden und eine fehlerhafte Software in Betrieb bleibt. Oft werden beispielsweise z.B. die Endschalter verwechselt und die falsche Drehrichtung verriegelt. In der Webvisualisierung würde dann das vom Förderband bewegte Objekt über die Endschalter hinausfahren, was von der Bildverarbeitung erkannt und alarmiert wird.
Dazu ermittelt die Bildverarbeitung die 3D-Position des Objekts auf dem Band, indem Bildverarbeitungskette nach Bild 5 ausgeführt wird. Dabei werden die von der Kamera des Raspberry-Pi aufgenommenen Bilder in einer RAM-Disk gespeichert und mit dem Funktionsbaustein fb_ReadImage eingelesen und gefiltert. Dann werden die aufgenommenen Bilder innerhalb der Region of Interest (ROI) des Förderbandes binär ausgewertet. Mit Hilfe von geometrischen Merkmalen wird die Position der hellen Objekte auf dem dunklen Förderband ermittelt und nach Kalibrierung der Kamera dreidimensional skaliert.
In der HMI sind mehrere Parameter zur Konfigurierung der Bildverarbeitung einstellbar, durch die Studierende die Funktionalität der Bildverarbeitungsstufen erproben und verstehen können.
Wenn also die schnelle Kontrolle nach Bild 4 nicht erfolgreich war, erkennt die Bildverarbeitung durch den etwas langsameren Algorithmus nach Bild 5, dass das Objekt eine Position jenseits der Endschalter angefahren hat und kann dementsprechend das Förderband abschalten und eine Fehlermeldung in der HMI veranlassen.
Oft ist eine Positionsregelung notwendig, damit das Förderband z.B. eine Palette mit Werkstücken zu einer von einem Roboter vorgegebenen Position fährt und dieser die Werkstücke greifen und die Palette leerräumen kann. Hierzu kann die Positionsmessung der Bildverarbeitung genutzt und ein bildgestützter Regelkreis aufgebaut werden. Um die Totzeit infolge der zeitlichen Verzögerung der Bildauswertung zu kompensieren, wird mit Hilfe der bekannten Bandgeschwindigkeit die Position prädiziert.
Zusätzlich zu der in Bild 4d veranschaulichten Erfolgskontrolle wird durch Analyse der von der Bildverarbeitung gemessenen Position erkannt, wenn der Sollwert überschritten wird und z.B. durch schlechte Reglerparametrierung oder Störeinflüsse Überschwingungen auftreten.

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

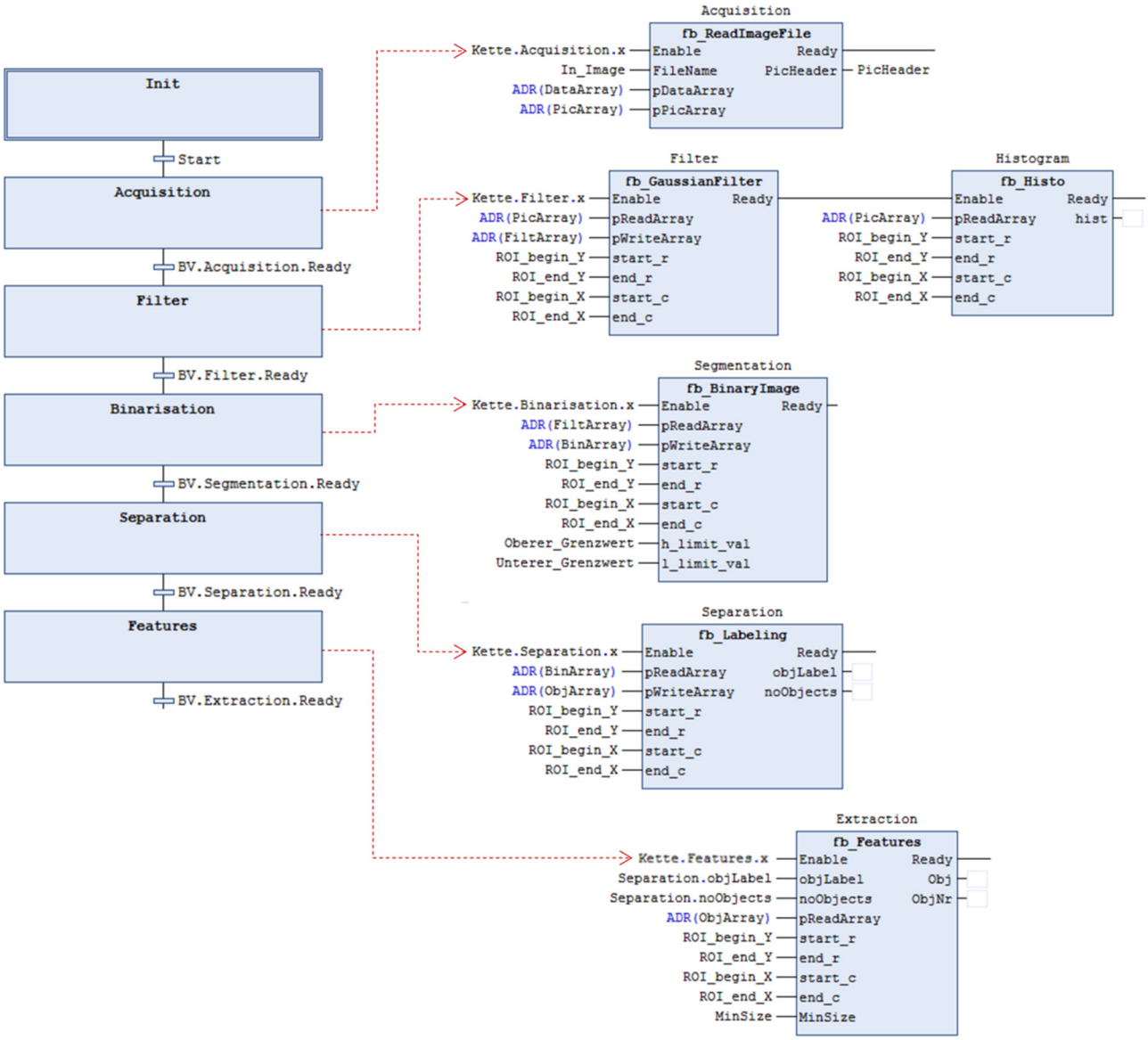


Bild 5: Bildauswertung durch Filterung, Segmentierung und Extraktion von Positionsmerkmalen

4 Experimentelle Ergebnisse

Früher wurde oft auf BV aus Kostengründen verzichtet. Stattdessen wurden einfachere Sensoren wie z.B. Ultraschall-Sensoren eingesetzt. Heute sind Kameras teilweise sogar günstiger als andere Sensoren. Die hier eingesetzten Kameras kosten um die 10 Euro, der Raspberry-Pi3 zur Auswertung der Bilder etwa 50 Eur. Doch Genauigkeit und Rechenaufwand sprechen oft gegen den Einsatz von Bildverarbeitung.

Deshalb wurde der Einfluss von Rechenzeitaufwand und Genauigkeit auf die bildgestützte Regelung analysiert. Die Rechenzeit für die Bildverarbeitung zur Positionsbestimmung nach Bild 5 bzw. 6b beträgt im Mittel 70 ms pro Bearbeitungszyklus. Dabei wurde mit Hilfe von SPS-Timer-Bausteinen die Zeit vom Start der Schrittkette in Bild 5 bis zum Ende der Merkmalsbestimmung gemessen. Die Bildverarbeitung zur Erfolgskontrolle quasi als Lichtschranke wie in Bild 4 dauert demnach im Mittel 20 ms pro Zyklus. Die Zykluszeit der Task im Raspberry-Pi wurde dabei auf 1 ms eingestellt.

Zusätzliche Rechenzeit beansprucht das Speichern und Anzeigen der Bilder in der Visualisierung, was aber der Anschaulichkeit der Bildverarbeitungsalgorithmen dient (s. Bild 6a). Da die Grenzwerte für

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

die Binärbilderzeugung sehr empfindlich gegenüber Helligkeitsschwankungen sind, wurde eine LED-Beleuchtung angebracht, so dass auch im Dunklen die Inbetriebnahme möglich ist.

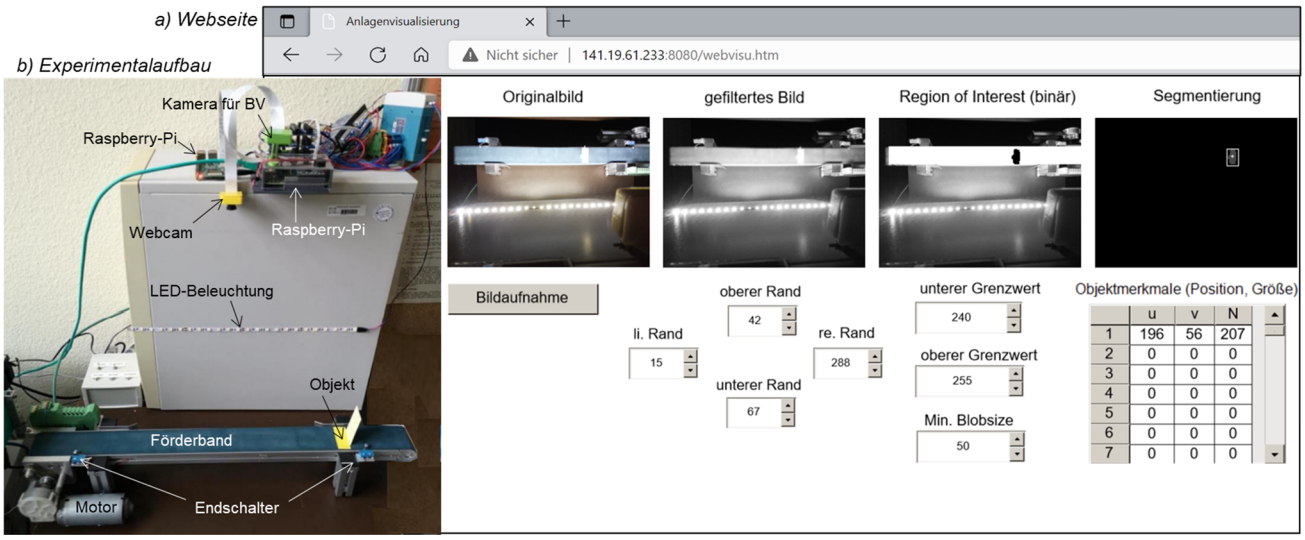


Bild 6: Experimentiersystem zur Bildüberwachung einer Förderbandanlage über das Internet

Detaillierte Aussagen zur Rechenzeit können mit dem Codesys Profiler getroffen werden, der Bestandteil des Professional Developer Pakets ist, aber 30 Tage kostenfrei getestet werden kann. Dabei zeigt sich, dass die Bildverarbeitungsbausteine in Bild 5 auch bei höherer Pixelzahl weniger als 1 ms beanspruchen. Problematisch kann jedoch die Bildaufnahme und das Einlesen der Bilder in Codesys sein, das in einzelnen Fällen max. 800 ms beansprucht hat. Vermutlich wird die Kamera dann gerade hinsichtlich Farbanpassung, Weißabgleich etc. intern kalibriert, was natürlich nicht in jedem Zyklus erforderlich ist.
Die Auswirkungen dieser Totzeiten auf die bildgestützte Positionsregelung des Objekts auf dem Band wurden durch Prädiktion der Objektposition anhand der bekannten Bandgeschwindigkeit kompensiert. Außerdem besteht noch Potenzial durch eine verbesserte Programmierung der Algorithmen, die Rechenzeiten noch weiter reduzieren zu können.
Auch die Genauigkeit der Positionsmessung durch Bildverarbeitung beeinflusst die Positionsregelung. Aufgrund der Parallaxe wird das Objekt am Rand des Gesichtsfeldes (s. Bild 4a+b) größer dargestellt als zentral unter der Kamera wie in Bild 4c+d. Zur Korrektur wurde die Objektfahne (s. Bild 6b), die zur Reflexion der Ultraschallwellen erforderlich ist, im Bild abgeschnitten. Weitere Ungenauigkeiten werden durch Auflösung und Linsenverzerrungen verursacht.
Tabelle 1 zeigt aber, dass die Abweichungen zwischen der Positionsmessung mit Bildverarbeitung und der Referenzmessung durch den Ultraschallsensor akzeptabel sind. Da die Objektfahne je nach Position unterschiedlich groß im Bild dargestellt wird, könnte eine positionsabhängige Korrektur der Parallaxe die Genauigkeit, z.B. am Endschalter links, noch weiter verbessern.

Tabelle 1: Genauigkeit der bildgestützten Regelung im Vergleich zur Ultraschallabstandsmessung

Sollposition	**Istposition durch BV ermittelt**	**Istposition durch Ultraschallsensor**
x = 200 mm (zentral unter Kamera)	197,2 mm	200,1 mm
x= 35 mm (Endschalter links)	31mm	35,2 mm
x= 470 mm (Endschalter rechts)	471 mm	470 mm

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

5 Schlussfolgerungen

Es wurde gezeigt, dass ein Remote-Engineering über das Internet sehr einfach über eine VPN-Verbindung der SPSen mit dem Programmiersystems möglich ist. Das Cloud-basierte Engineering mit dem Codesys Automation Server ist nur mit Codesys-Steuerungen möglich. SPS-Hersteller wie ABB haben ihre eigenen Cloudsysteme, die nicht ohne Weiters mit dem Automation Server kompatibel sind.
Zur automatisierten Erfolgskontrolle und Fehlererkennung wurden zwei Bildverarbeitungsmethoden eingesetzt. Zunächst erkennt die Bildverarbeitung in der Region of Interest die erreichte Position des Objekts, so dass der Förderbandantrieb automatisch angehalten werden kann. Wenn dies in Folge von Programmierfehlern oder Störungen nicht erfolgt, erkennt dies die Bildverarbeitung durch Messung der unerlaubten Objektposition. Außerdem wurde mit Hilfe der Bildverarbeitung die Positionsregelung des Objekts auf dem Förderband entwickelt. Dabei wird die Geschwindigkeit des Bandes reduziert je näher das Objekt an die Sollposition gelangt.
Studierende mit VPN-Zugang können somit an dieser Experimentieranlage programmieren und jederzeit ihre Software in die SPS laden und ausprobieren. Durch Kameras werden die Auswirkungen der entwickelten Programme beobachtet und analysiert. Diese Remote-Inbetriebnahme ermöglicht es, die Software so lange zu korrigieren, bis das gewünschte Verhalten erreicht wird.

6 Literatur

[1] Baker Jr., R. A. (2000). The Web PLC is here. In: Machine Design, https://www.machinedesign.com/mechanicalmotion-systems/controllers/article/21832452/the-web-plc-is-here
[2] Langmann, R. (2005). Web-based Remote Control by LiveConnect. International Journal of Online Engineering.
[3] Mühlbauer, A. (2019). Die HMI geht ans Netz. In: Industrial Production
[4] Codesys (2021). Automation Server - Die Industrie-4.0-Plattform. https://www.automation-server.com/de
[5] Goldstein, S. (2021): Engineering leicht gemacht – IoT-Konzepte für die Automatisierung mit TwinCAT Cloud Engineering, SPS-Magazin 11/2021
[6] Siemens (2021). Simatic IoT2050, https://new.siemens.com/de/de/produkte/automatisierung/pc-based/iot-gateways/simatic-iot2050.html
[7] Seitz, M. (2021) Speicherprogrammierbare Steuerungen in der Industrie 4.0, 5. Auflage, Hanser Verlag, München.
[8] Papenfort, J. (2017). Bildverarbeitung in der SPS TwinCAT Vision – Einfache Integration der Bildverarbeitung in die Automatisierungstechnik. PC-Control 04/2017
[9] B&R (2019). Integrierte Bildverarbeitung sichert Prozess- und Produktqualität. In: Automation 11.19
[10] Seitz, M. (2021). SPS-Lern-und-Übungsseite, www.seitz.et.hs-mannheim.de
[11] IEC 62433-4 (2018). Security for industrial automation and control systems, VDE-Verlag.
[12] Gottschalt, D., Peter, H., Seitz, M. (2016). SPS-integrierte Bildverarbeitung. In: A&D-Kompendium 2016/2017.

Open Access. © 2022 M. Seitz, M. Khushairi, A. Jürgens und H. Peter
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Rapid prototyping framework for automation applications based on IO-Link

V. Chavez[1], F. Cruz[2], M. Ruchay[3], J. Wollert[4]

Abstract

The development of protype applications with sensors and actuators in the automation industry requires tools that are independent of manufacturer, and are flexible enough to be modified or extended for any specific requirements. Currently, developing prototypes with industrial sensors and actuators is not straight forward. First of all, the exchange of information depends on the industrial protocol that these devices have. Second, a specific configuration and installation is done based on the hardware that is used, such as automation controllers or industrial gateways. This means that the development for a specific industrial protocol, highly depends on the hardware and the software that vendors provide. In this work we propose a rapid-prototyping framework based on Arduino to solve this problem. For this project we have focused to work with the IO-Link protocol. The framework consists of an Arduino shield that acts as the physical layer, and a software that implements the IO-Link Master protocol. The main advantage of such framework is that an application with industrial devices can be rapid-prototyped with ease as its vendor independent, open-source and can be ported easily to other Arduino compatible boards. In comparison, a typical approach requires proprietary hardware, is not easy to port to another system and is closed-source.

Keywords

Rapid-prototyping, Arduino, IO-Link, Industrial Communication

1 Introduction

Integrating industrial devices such as sensors and actuators in rapid-prototyping applications or proof-of-concepts is not always straight forward. These devices transmit data typically through an industrial communication protocol. To access the information of these protocols an automation controller or industrial gateway is normally required. Their use involves a specific hardware and software that is dependent on the vendor. For rapid-prototyping scenarios, this means that developing an application depends on the hardware that is used and cannot be replicated easily with another vendor. In addition, the hardware and software provided by these vendors is not always modifiable, and adding extra features is not possible.
In this paper, we present the development of a framework that intends to address these issues and provide a rapid-prototyping framework with industrial sensors and actuators. The scope of this work is oriented towards the development of rapid-prototyping applications with the IO-Link industrial

1 Fachhochschule Aachen
2 Fachhochschule Aachen
3 Fachhochschule Aachen
4 Fachhochschule Aachen

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

communication protocol. The frame of reference for this work is the Arduino platform which is oriented to rapid-prototyping and is vendor neutral. In the following sections the motivation for this work is explained, an Introduction to IO-Link is given and the design of the framework is explained. At the end our preliminary results are shown and a conclusion and future work is provided.

2 Motivation

Our interest in developing a rapid-prototyping framework for sensors and actuators based on IO-Link is two-fold. Firstly, at our university we develop low-cost mechatronic projects with students and we have noticed the lack of open-source tools to integrate industrial sensors and actuators easily without being dependent of a specific vendor solution. Secondly, we have hands-on experience with IO-Link from the development of an Arduino based IO-Link device framework [1], and are interested in expanding it to have a complete industrial prototyping ecosystem that is accessible, hackable and easy to use for students. In addition, we intend to work on this framework and adapt it for use with the ethernet 10BASE-T1L PHY layer as part of our research from [2].

3 Related work

As far as we know, there are two rapid-prototyping environments for industrial IO-Link devices available. There is a commercial evaluation board from STMicroelectronics, compatible with the STM32 nucleo microcontroller and the Arduino UNO. It consists of an IO-Link master transceiver board that includes a software demo evaluation, and a proprietary graphical user interface that can load an IO-Link description file and view the process data of an IO-Link device. This framework is suitable to learn in general how IO-Link. However, as it consists of a closed-source software, modifications and adaptions are not possible.

The second alternative is an open-source IO-Link Master shield/hat [3]. This project consists of an electronics board with an IO-Link Master transceiver compatible with Arduino and Raspberry Pi. It also includes a software that explores some of the features of the IO-Link protocol. This project seems promising as it's the only open-source project alternative for IO-Link but at the moment lacks IO-Link features such as parametrization of devices (on-request data) and diagnostics information (IO-Link events). From these two options we see that there still exists a gap in a framework that incorporates of all the main features of IO-Link, is open-source and can easily be adapted to any other development environment.

4 What is IO-Link?

IO-Link is a standardized single-drop digital communication interface technology (SDCI) for sensors and actuators, part of the IEC61131-9 specification [4]. IO-Link consists of at least two components, one IO-Link master and one or more IO-Link devices. The IO-Link master initiates the communication and configuration of any IO-Link device that is connected to it. In the other hand, an IO-Link device is considered the source of information about a process (e.g., sensors) or the end device to control a process (e.g., motor). The physical IO-Link interface consists of a three-wire signal consisting of two wires (L+, L-) for power supply and one wire (C/Q) for communication. The C/Q line transports information as a serial protocol that can communicate up to a speed of 230.4 kbit/s.

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

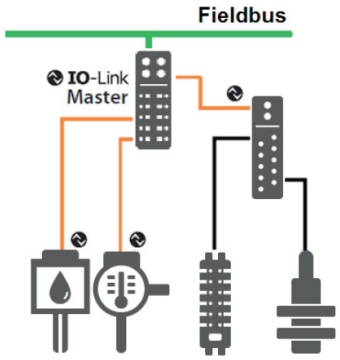


Figure 1 Typical IO-Link topology [5]

The main advantage of IO-Link is that it allows to connect sensors and actuators as plug-and-play devices. The exchange and management of information is done automatically by the IO-Link master and can be configured to download a configuration to the IO-Link device in case of replacement. The information and configuration of an IO-Link master can be accessed through its so-called Standardized Master Interface (SMI). This interface consists of a set of services that allow to control the IO-Link master, get information from the connected devices and configure it. Typically, this interface is internally built to connect over a fieldbus network or a proprietary protocol as part of a Programmable Logic Controller (PLC) module.

5 Framework

One of the most well-known prototyping frameworks for electronics and do-it-yourself projects is the Arduino open-source electronic prototyping platform [6]. Due to its compatibility with different microcontrollers, easy integration to different ecosystems and its constant development, we have chosen to develop this project based on this platform. In the following subsections, we present a view on the design process for the framework and the design requirements based on the IO-Link specification version 1.1.3 [7].

5.1 Hardware Requirements

The first step of the design process consists of identifying the hardware components that are needed to develop an IO-Link Master. One of the first, and most important components is the IO-Link Master transceiver. This transceiver acts as a bridge between the IO-Link physical layer and a microcontroller that implements the communication stack. For this prototype we selected an LTC2874 transceiver from Analog Devices. This transceiver supports communication up to four IO-Link devices, automatic generation of the wakeup signal, and configuration via a SPI interface [8].

Another part required according to the specification, is the use of 2048 bytes of non-volatile memory per IO-Link device for the so-called Data Storage (DS). For this part, we selected a 25AA128T EEPROM memory from Microchip with 16 KB of storage. The next part that is needed for the design is the microcontroller that will drive the communication logic and interact with the other components. Before discussing the selection of the microcontroller, we will discuss the hardware requirements that it needs to have according to the IO-Link specification.

The IO-Link communication relies on the principal of a universal asynchronous receiver-transmitter (UART). The maximum baud rate required for IO-Link communication is 230.4 Kb/s. The second hardware requirement is the use of timers to measure timeouts and events. Not all of the timers, are

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

used at the same time and an analysis was done to verify the maximum number of timers required per IO-Link device. The use of timers can be divided in two phases. Firstly, there is the initialization phase, which consists of detecting whether an IO-Link device is connected or not. Secondly, there is the communication phase which can be in one of the three IO-Link states known as startup, pre-operate and operate.

For the first phase, a total of four timers were identified, according to the specification these are Tren, Tdwu, Tdmt and Tsd. By checking their usage in a timeline, it was found that two of them run sequentially (Tren, Tdwu) and the two others run in parallel (Tdwu,Tsd). To minimize the number of timers required for this phase, it was found that Tren and Tdwu can be assigned to one timer, and Tdwu and Tsd to another (see Figure 2).

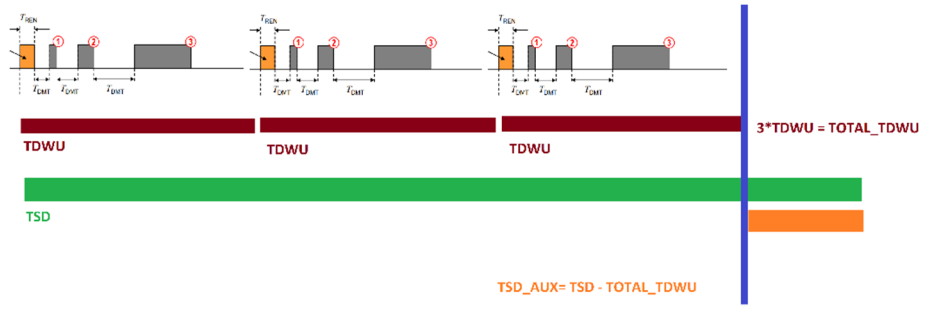


Figure 2 Visual representation of timers in the initialization phasee

The second phase, requires three timers: TMseq, Tcyc, and TIsdu. After analysing their usage in a timeline (see Figure 3), it was concluded that they have to be run in parallel. As both of these phases do not run in parallel, the maximum number of hardware timers needed is three.

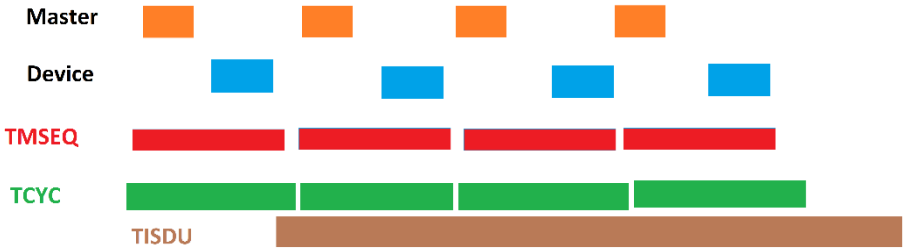


Figure 3 Visual representation of timers in the communication phasee

Based on the aforementioned hardware peripherals, the microcontroller could now be selected. As our focus is to work with the Arduino framework, the microcontroller has to be compatible with one of the available Arduino development boards. The main requirements for this board can now be discussed. The board should have four UARTs (four IO-Link devices) and three timers per IO-Link device. To the best of our knowledge one of the most suitable boards for this is the Arduino Due. The Arduino Due board has one UART, four USARTs, nine timers and a SPI peripheral. This board is based on the ATSAM3x8e microcontroller from Atmel (now Microchip), with an ARM Cortex-M3 CPU, a clock frequency of 84 MHz, 512 KB of flash memory, and 96 KB of SRAM.

5.2 Hardware development

The framework for this project involved the development of a custom board so-called Arduino shield that can be connected on top of the Arduino Due and provide access to the external hardware to

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

communicate via IO-Link. The main goal of the shield is to have access to the IO-Link Master transceiver, the non-volatile memory for DS and four IO-Link device ports with M12-4A female connectors. Additionally, we added an ethernet MAC-PHY interface ENC424J600 from Microchip for the future addition of ethernet connectivity.

IO-Link requires a 24V power supply for the transceiver and the IO-Link devices. As the Arduino Due only supports 12 volts maximum for voltage input, a 24V voltage regulator was included in the shield. A block diagram of the components that were integrated into this IO-Link Master shield is seen in Figure 4. The blocks colored with blue are the main hardware components of the shield, while the greeen blocks represent the communication interfaces that the shield provides for the Arduino Due, and the yellow blocks are the external communication interfaces. A preliminary view of the complete PCB assembly is seen in Figure 5. In this view we can see the addition of status LEDs, the positioning of the IO-Link Device connectors on the right side and the header for stacking the Arduino Due on the bottom side.

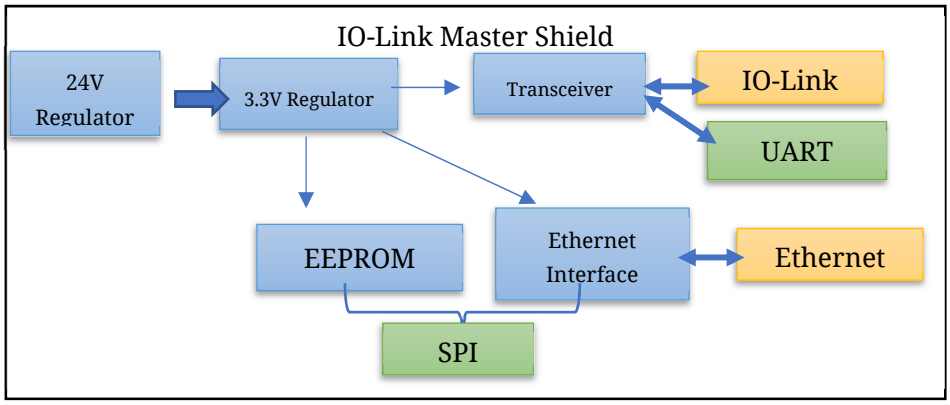


Figure 4 Block diagram view of IO-Link Master shield

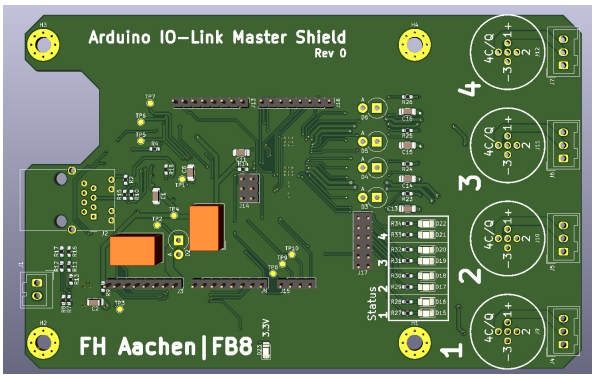


Figure 5D View of PCB Assembly

5.3 Software Design

The objective of the framework kept in mind compatibility with the Arduino Software Development Kit (SDK) and flexibility to extend it to other Arduino boards in the future. In this section the software design, its implementation and its focus for the Arduino platform are discussed. The main premise for the software design was that the framework is intended for rapid-prototyping applications and easy customization. For this reason, we followed a layered style architecture due to its simplicity and ease of development. The software implementation can be divided into three parts: the communication stack, the Hardware Abstraction Layer (HAL), and the Application Programming Interface (API).

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

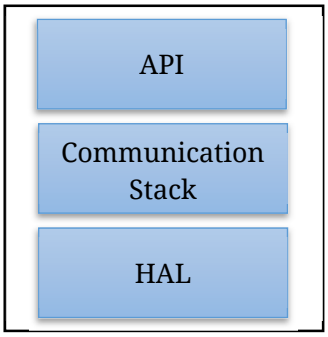


Figure 6 Overview of Software Architecture

The lowest layer in this design is the HAL. The purpose of the HAL is to access the hardware peripherals independent of the Arduino board that is used. The main components modelled for the HAL were the SPI, the UART, the EEPROM, the IO-Link Master transceiver and the timers. The HAL interacts directly with the communication stack, which requests access to the peripherals for the IO-Link communication.

The second layer consists of the communication stack. In this layer the communication layers from the IO-Link specification v1.1.3 were implemented. The hardware access is done as mentioned through the HAL and any events from the stack or requests are interchanged with the API layer.

The last layer is the API. In this layer the user can send requests to the API which will redirect them to the communication stack. In addition, confirmation of the requests and notifications from the communication stack are processed and sent to the user. The API is based on the IO-Link SMI, which represents a standard way of accessing the services of the IO-Link Master and its IO-Link device ports.

6 Preliminary results

For the first iteration of this project, we did not include the integration of the Arduino shield due to the current chip shortage problematic. Instead, we only tested the software and used a LTC2874 development board for the IO-Link communication. The tests for this first prototype included verifying that an IO-Link device could go into operate mode and exchange process data, reading its vendor name, and notification of IO-Link events.

For these tests we used two IO-Link devices: the first one is a O5D150 distance sensor from ifm Electronic, and a KI6000 capacitive sensor from the same company. The verification process consisted of using the API to send requests to set an IO-Link port in IO-Link mode and read its process data, serial number and produce an IO-Link event. The results of these operations were logged and sent through the serial monitor port of the Arduino IDE (see Figure 7)

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

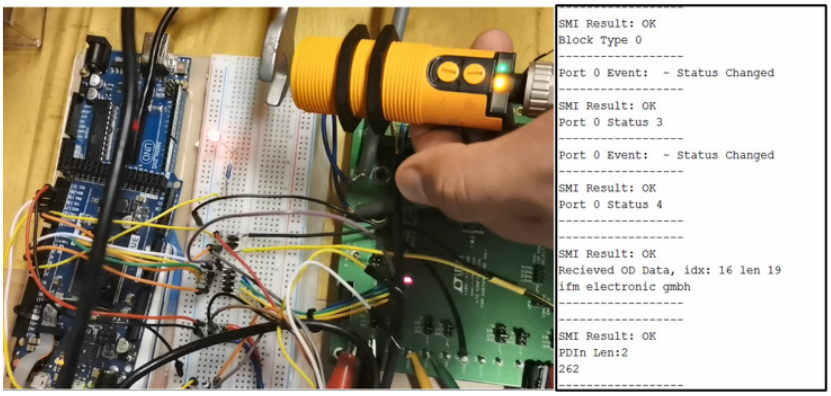


Figure 7 Tests with an IO-Link Device

Besides testing these features we also measured the average latency of the processing time of the communication stack and the reception of process data. For the average processing time with one port active it was found that in average it took 40 microseconds the execution of the stack. The reception of process data through the API starting from the reception of the IO-Link device data through the UART took about 130 microseconds. The asynchronous read request from the API to the communication stack was in average 100 microseconds.

7 Conclusions

The preliminary results of this work allowed us to show the feasibility of a rapid-prototyping framework for applications with industrial sensors and actuators. In particular, we decided to use as a reference frame the Arduino platform for our development. The advantage of this platform is that its open-source and there is support for wide variety of components that can be added to the Arduino framework such as data logging, wireless connectivity, and embedded sensors. In comparison with a traditional approach, were a PLC is required to get information from a sensor, the Arduino platform is neutral and compatible with development boards. In addition, configuring a project for a PLC, setting up the communication and extracting the information for a simple application is more cumbersome than just using an Arduino and loading a library. The main advantage here is that this approach can be deployed faster to test a prototype and integrate it with other components due to the flexibility that Arduino offers and its constant development.

It has to be noted that the framework is not optimized for performance and rather uses a more simplistic design for ease of use and portability with other Arduino development boards. The main reason for this is that the purpose of the work is for rapid prototyping and not for deployment as a commercial product where optimization and performance matter, such as by using an event-driven architecture and a real time operating system. The current implementation is not finished and will be further improved to test that it works with more than one IO-Link device and to fix any bugs in the software. In addition, tests with the IO-Link Arduino shield will be made.

8 References

[1] V. Chavez and J. Wollert, “Arduino based Framework for Rapid Application Development of a Generic IO-Link interface,” pp. 21–33, 2020.

[2] V. Chavez, P. Saurabh, and J. Wollert, “10BASE-T1L based connection for field devices in Cyber-Physical Systems: A Proof of Concept,” in *Embeddd World Conference*, 2021.

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

[3] T. Gammeter, J. Lehmann, P. Frei, and M. Gafner, “openiolink/io-link-master-shield-hat-sw Software for the IO-Link Master Shield/Hat for Arduino and Raspberry Pi.” [Online]. Available: https://github.com/openiolink/io-link-master-shield-hat-sw. [Accessed: 01-Oct-2021].
[4] International Electrotechnical Commission, “IEC 61131-9:2013.” [Online]. Available: https://webstore.iec.ch/publication/4558. [Accessed: 01-Jan-2021].
[5] IO-Link Community, “IO-Link System Description,” 2018.
[6] “Arduino.” [Online]. Available: https://www.arduino.cc/. [Accessed: 01-Oct-2021].
[7] IO-Link Community, “IO-Link Interface and System v1.1.3,” 2019.
[8] Analog Devices, “LTC2874 Datasheeet and Product Info.” [Online]. Available: https://www.analog.
com/en/products/ltc2874.html. [Accessed: 01-Oct-2021].

Open Access. © 2022 V. Chavez, F. Cruz, M. Ruchay, J. Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2021

Modulare Anlagenautomation – Monitoring und erweiterte Diagnosefunktionen von Modulen

J. John[1], Y. Pilous[2], N. Große[3]

Zusammenfassung

Der Einsatz modularer Anlagen wird in der Prozessindustrie immer beliebter. Da Modulhersteller ihre Applikationen weitestgehend kapseln, um ihr Know-How zu schützen, müssen Strukturen und Applikationen entwickelt werden, die das Monitoring und die Diagnose auch im Rahmen der vorausschauenden Instandhaltung dieser Module ermöglichen.

Die Implementierung solcher Funktionen in das übergeordnete Leitsystem der Gesamtanlage ist bei modularen Anlagen bislang ähnlich umständlich wie die Einbindung von Fremdkomponenten in ein Leitsystem. Um ein vollständiges modulares Anlagenkonzept erfolgreich zu etablieren, ist eine einfache Implementierung dieser Funktionalitäten somit unumgänglich.

Im Rahmen dieses Beitrags wird daher untersucht, wie Strukturen und Applikationen zum Monitoring und Diagnose einfach in übergeordnete Systeme implementiert werden können. Hier wird auch betrachtet, welche dieser Informationen für Anlagenfahrer relevant, welche Funktionalitäten auf externe Systeme (z. B. eine Cloud) ausgelagert werden sollten und wie diese optimal dargestellt werden. Weiterhin wird ein Konzept zur Modularisierung von Plant Asset Management Funktionen vorgestellt, anhand dessen eine Strukturierung des NAMUR Open Architecture (NOA)-Kanals vorgenommen wird.

Stichwörter

Modulare Anlagen, Diagnose, Monitoring, Predictive Maintenance, MTP

1 Motivation

Der Einsatz von modularen Anlagen in der Prozessindustrie erlaubt dem Anwender einen hohen Grad an Flexibilität. Darüber hinaus können Modulhersteller, die oft aus dem traditionellen Maschinenbau stammen, Alleinstellungsmerkale gegenüber konkurrierenden Maschinenbauern entwickeln, indem sie ihre Produkte mittels eigenen intelligenten Automatisierungslösungen als Package Unit anbieten.

Somit liegt es im Interesse des Modulherstellers, seine Automatisierungslösung zu kapseln, damit er sein Know-How und die entwickelten Alleinstellungsmerkmale schützen kann. Dies erschwert jedoch dem Anwender die Einsicht in den Zustand der Anlage, z. B. zur Fehlersuche oder Instandhaltung der

1 Jan Philipp John, B. Sc., Labor Prozessleittechnik, Technische Hochschule Köln
2 Yannick Pilous, B. Sc., Labor Prozessleittechnik, Technische Hochschule Köln
3 Prof. Dr.-Ing Norbert Große, Labor Prozessleittechnik, Technische Hochschule Köln

Open Access. © 2021
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Anlage. Aus diesem Grund ist es wichtig die Package Unit mit Monitoring- und Diagnosefunktionen auszustatten, damit dem Anwender keine Nachteile durch die Nutzung der Package Unit entstehen.

2 Einfaches Monitoring von Modularen Anlagen

Die Implementierung von Monitoring Funktionen von modularen Anlagen gestaltete sich bisher ähnlich umständlich wie die Einbindung in das Leitsystem der Gesamtanlage. Neben langen Parameterlisten, die für die Implementierung von Zustandsmeldungen und Alarmen benötigt werden, kommt erschwerend hinzu, dass die Daten des Moduls schwer aus der Kernautomatisierung herausgezogen werden konnten. Dies führte dazu, dass meist nur einfache Funktionen innerhalb der Kernautomatisierung implementiert wurden, um die Automatisierungshardware nicht zu überlasten.

In der Prozessindustrie hat sich in den letzten Jahren das „Module Type Package“ (MTP) entwickelt und etabliert, welches die Anbindung von Package Units an Leitsysteme der Gesamtanlage erleichtern soll. In dieser Arbeit werden die Aspekte Monitoring und Diagnose von Package Units genauer betrachtet. Hierzu wird oft die NAMUR Open Architecture (NOA) herangezogen, womit zwei „Pfade“ für Monitoring und Diagnose entstehen – der NOA-Kanal und der Weg durch die bestehende Automatisierungsstruktur.

Durch neue Automatisierungsstrukturen und die breite Verfügbarkeit von Edge-Geräten ist es möglich erweiterte Diagnose- und Monitoringfunktionen unabhängig von der Automatisierungshardware auszuführen und die aus der Kernautomatisierung erhobenen Daten weiterzuverarbeiten. Dieser Pfad wird in Kapitel 3 „Erweitertes Monitoring und Diagnose von modularen Anlagen“ genauer ausgeführt.

Der andere Pfad beinhaltet Monitoring- und Diagnosefunktionen, die für den Anlagenfahrer relevant sind und somit direkt an das übergeordnete Leitsystem übertragen werden sollten. Diese beinhalten neben Alarmen, die in Blatt 6 der MTP Richtlinie 2658 [1] behandelt werden, auch den Gesamtzustand des Moduls. Diese Funktionen liegen durch die starke Nähe zur Hardware und deren geringe Belastung weiterhin bei der Steuerung des Moduls. Dies beinhaltet Informationen, die auch für den Anlagenfahrer direkt relevant sind. Somit gehört zu der Kommunikation zwischen Modul und dem übergeordneten System die Übertragung dieser Informationen.

Die MTP-spezifischen Richtlinien zu Diagnose und Instandhaltungsaspekten befindet sich noch in der Entwicklung, dennoch lassen sich erste Ansätze erkennen. In der Richtlinie für die Datenobjekte werden sämtliche Schnittstellen der MTP-Funktionsbausteine definiert, wodurch sich hier hilfreiche Informationen zur Zustandsermittlung finden lassen. Eine solche Information ist in dem sogenannten „Worst Quality Code“ (WQC) hinterlegt, welcher den Zustand der einzelnen Funktionsbausteine in einem BYTE festhält. Dort werden also für jeden Prozesswert und jedes Steuersignal zusätzlich zu dem eigentlichen Wert Parameter zu den Bedingungen, unter denen der Wert erfasst wurde und ob dieser vertrauenswürdig ist, aufgezeichnet. Die genaue Spezifikation bestimmter WQCs wird in einem späteren Blatt der MTP-Richtlinienreihe ausgearbeitet [2].

Hier erscheint es sinnvoll, aus dem WQC Zustandsinformationen für das Bedienbild abzuleiten. Dies begründet sich daraus, dass alle Sensoren und Aktoren des Moduls über einen MTP-fähigen Funktionsbaustein verfügen und somit das WQC bereits eine Schnittstelle mit Zustandsinformationen zum übergeordneten Leitsystem bietet. Um bekannte Meldungen beizubehalten, ist ein sinnvoller Ansatz hier diese mit dem NE107 Status (siehe Bild 1) [3] zu verketten und im Bedienbild des Moduls an den einzelnen Elementen (siehe Bild 2) sowie in einer Modulübersicht als aggregierten Zustand (siehe Bild 3) visualisieren.

Open Access. © 2021 J. John, Y. Pilous, N. Große
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Bild 1: Statussymbole der NAMUR NE107 [3]

Die NAMUR Empfehlung 107 (NE 107) befasst sich mit der Darstellung von Diagnoseresultaten von Apparaten und Feldgeräten durch Verwendung von Statussignalen [3]. Da Module sich genau daraus zusammensetzen, lassen sich die Prinzipien leicht für modulare Anlagen übernehmen. Neben den Statussignalen aus Bild 1 stellt die NE 107 ebenfalls Symbolik für aktive und passive Diagnose zur Verfügung. Diese werden für die vorgeschlagene Darstellung bei modularen Anlagen ausgelassen, um in Anlehnung an den High-Performance HMI Ansatz den Anlagenfahrer nicht mit Informationen zu überfrachten.

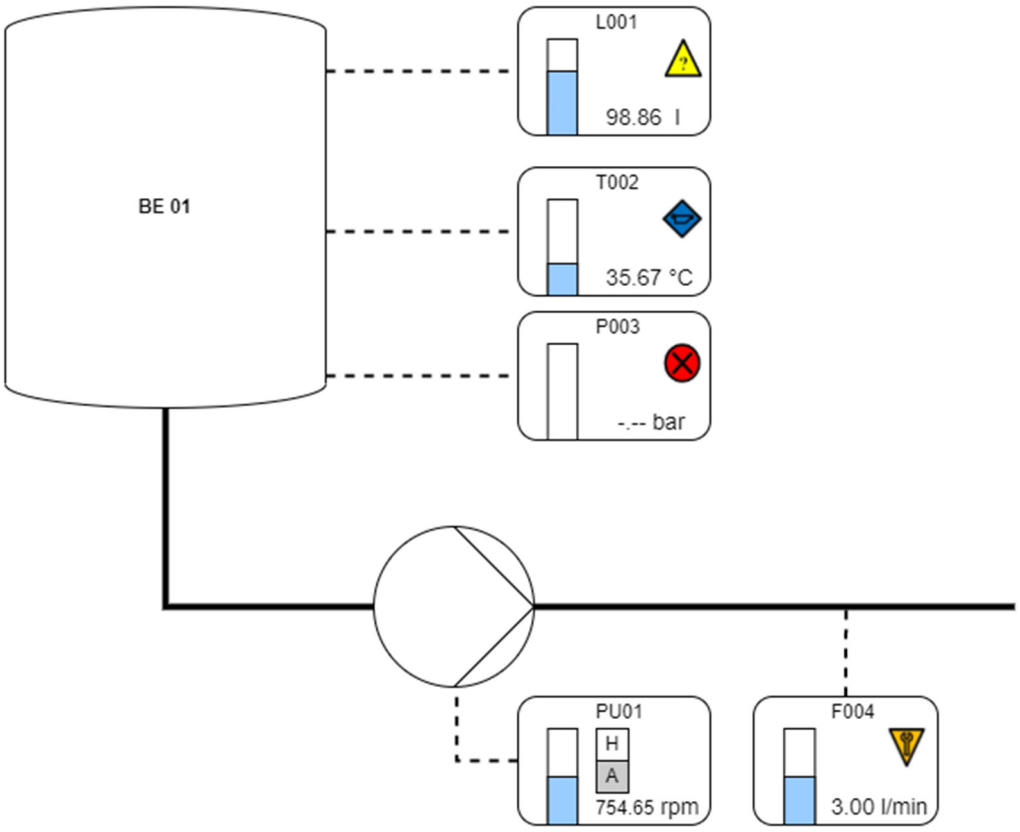


Bild 2: mögliche Darstellung der Statusinformationen im Bedienbild des Moduls

Bild 2 zeigt eine mögliche Art, die Statusinformationen für den Anlagenfahrer im Bedienbild zu visualisieren. Um den Blick auf die relevanten Informationen zu leiten, werden nur Statussignale angezeigt, die aktiv am Feldgerät anliegen, statt die inaktiven Symbole auszugrauen. So wird z. B. mit einem Blick auf das HMI klar, dass die Pumpe PU 01 in ihrem Gutzustand ist und man dem hier angezeigten Wert der Pumpendrehzahl vertrauen kann.

Open Access. © 2021 J. John, Y. Pilous, N. Große
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Die Temperaturmessung T002 hat einen Wartungsbedarf, ist aber noch vertrauenswürdig. Wenn dieser Wartungsbedarf längere Zeit ansteht, kann so das Anlagenpersonal gezielt Tickets an die Instandhaltung schreiben. Die angezeigte Funktionskontrolle bei F004 könnte darauf hinweisen, dass der gemessene Durchfluss momentan simuliert wird und sich beispielsweise an die aktuelle Pumpendrehzahl anpasst. Hier wäre also besonderes Augenmerk auf Behälter oder Ähnliches zu legen, in die das Medium gepumpt wird, um große Abweichungen auszuschließen.

Die Füllstandsmessung L001 wird als außerhalb der Spezifikation angezeigt, womit man dem Messwert nicht vertrauen sollte. Somit wäre in dem angezeigten Fall zu überprüfen, ob Trockenlauf der Pumpe oder ein Überfüllen des Behälters möglich sind, sofern es keine entsprechenden Schutzfunktionen gibt. Durch den Ausfall der Druckmessung P003 hat der Anlagenfahrer keine Informationen über die Druckverhältnisse im Behälter und sollte daher Prozesse, die zu einem Druckanstieg im Behälter führen, vermeiden und, sofern nicht bereits geschehen, die Instandhaltung informieren.

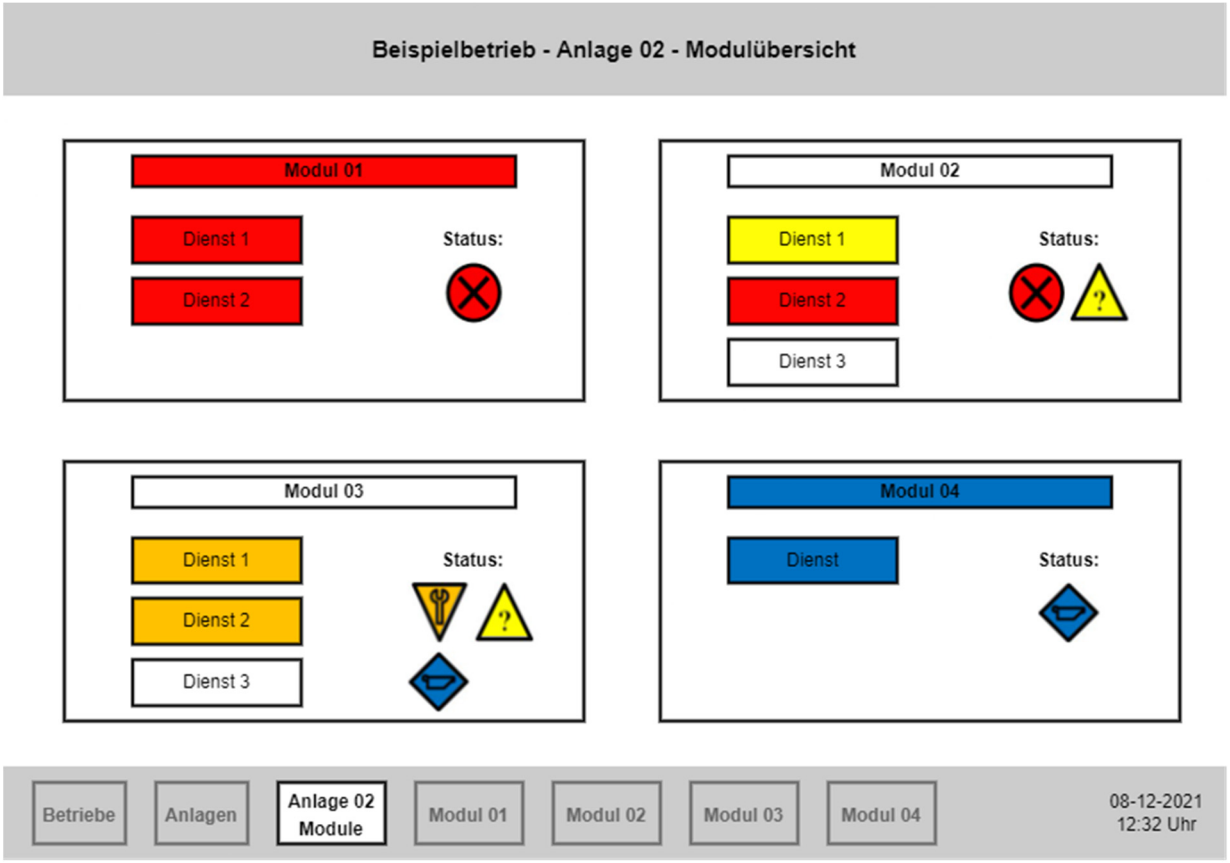


Bild 3: mögliche Darstellung von Statusinformationen in der Modulübersicht

Bild 3 zeigt eine mögliche schematische Darstellung von Statusinformationen in der Modulübersicht. Unter „Status“ werden hier die im Modul anliegenden Statussignale zusammengefasst, um einen Überblick über das Modul zu liefern. Für einen genauen Einblick, wie viele dieser Statussignale an welchen Feldgeräten und Apparaturen anliegen, kann über die Modulübersicht das Bedienbild des entsprechenden Moduls aufgerufen werden (siehe Bild 2). Moduldienste, die von einem Statussignal betroffen sind, werden in der Farbe des am höchsten priorisierten Statussignals hinterlegt. Sind alle Dienste des Moduls von einem Statussignal betroffen, so wird das Modul selbst (hier anhand des Modulnamens) farblich hinterlegt, um so z. B. einen vollständigen Ausfall des Moduls zu visualisieren.

Open Access. © 2021 J. John, Y. Pilous, N. Große
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3 Erweitertes Monitoring und Diagnose von modularen Anlagen

Der zweite „Pfad“ der NOA definiert einen horizontalen Datenabgriff aus der Struktur der traditionellen Automatisierungspyramide heraus. Innerhalb einer zusätzlichen Domäne für Monitoring und Optimierungsaufgaben (M+O) können Daten aus jeder Ebene der Automatisierungspyramide ausgelesen werden. Die Verarbeitung der Daten findet dann in der sogenannten M+O Domäne statt. Während die Domäne der Kernautomatisierung aus gehärteten, hoch verfügbaren Automatisierungskomponenten besteht, werden an die M+O Domäne weitaus geringe Anforderungen gestellt. Hier finden sich beispielsweise Edgegeräte oder Cloudservices. Dadurch wird es möglich, innovative Technologien im Bereich der Industrie 4.0 in die Anlage zu integrieren [4].

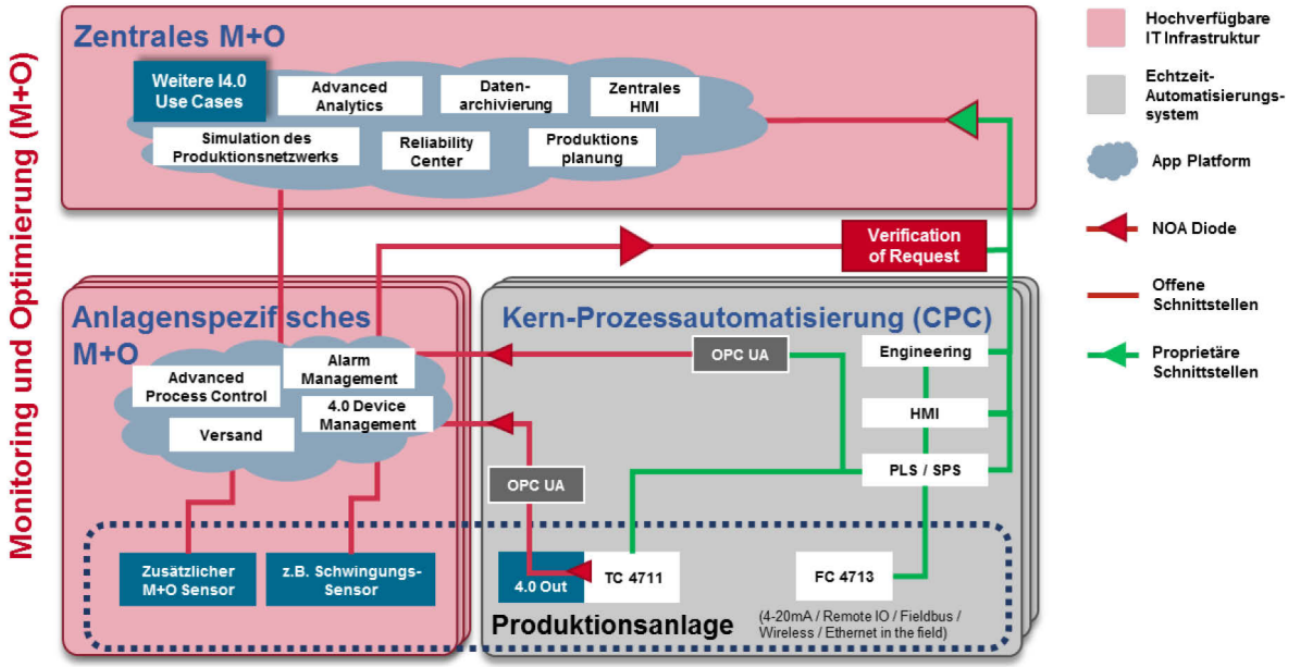


Bild 4: NAMUR Open Architecture [4]

Eine Ankopplung der M+O Domäne lässt sich jedoch nicht so einfach bewerkstelligen. Die Verfügbarkeit der Basisautomation, die in Bild 4 in grau dargestellt ist, gilt es unbedingt zu schützen. Damit dieses Schutzziel erreicht werden kann, müssen Rückwirkungen in den Bereich der Basisautomation verifiziert erfolgen. Das bedeutet, dass etwa Optimierungsvorschläge nicht ohne Freigabe durch eine Prüfinstanz zu einer Parameteränderung im Steuerungsprogramm führen dürfen. Weiterhin erhebt NOA den Anspruch, dass Daten des Automatisierungssystems offen lesbar sein sollen.

Der NOA-Seitenkanal auf anlagenspezifischer Ebene bietet durch seine explizit gewünschte Offenheit für Anwendungen der Industrie 4.0 eine Menge Freiheitsgrade bei der Auslegung von M+O Systemen. Sinnvollerweise sollte man Funktionalitäten innerhalb des Seitenkanals in irgendeiner Form strukturieren, damit einer wachsenden Komplexität aufgrund fehlender Rahmenbedingungen entgegengewirkt werden kann. Hierzu wird hier eine Hierarchie entworfen, die von ihrer funktionalen Betrachtung an die Automatisierungspyramide angelehnt ist. Die Ebenen unterteilen sich in M+O Feldebene, M+O Diagnoseebene und M+O Koordinationsebene. Diese bilden hinsichtlich ihrer Aufgaben das Informationsflussmodell zur Bewertung der Asset Gesundheit entsprechend der NE 129 ab.

Open Access. © 2021 J. John, Y. Pilous, N. Große
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

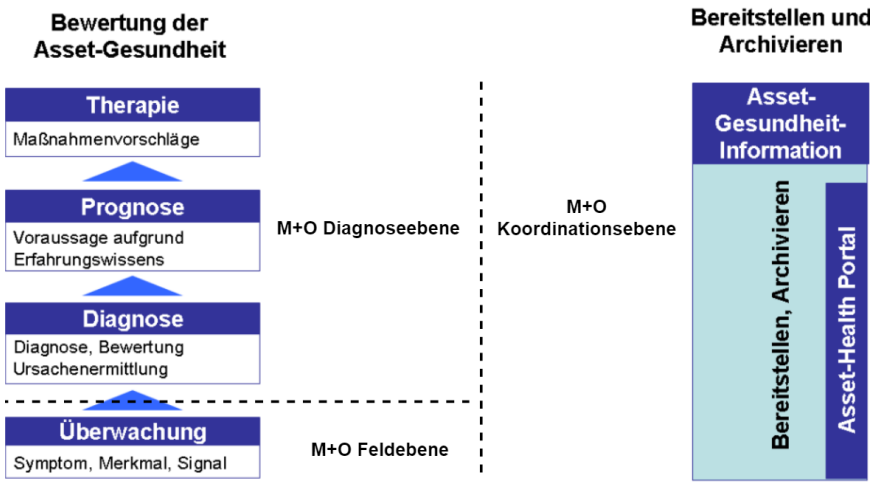


Bild 5: Einteilung des Informationsflussmodells zur Bewertung der Asset Gesundheit [5] in M+O Ebenen

Die hieraus resultierenden Datenflüsse sind in Bild 6 in grün dargestellt. Alle aus der Basisautomation entspringenden Daten laufen innerhalb der M+O Diagnoseebene, welche gleichzeitig die größte Ebene im M+O Bereich darstellt, zusammen. Hier finden sich Funktionen aller Art zur Diagnose, Prognose und zur Erstellung von Therapievorschlägen. Die M+O Feldebene kann hingegen sogar gänzlich entfallen. Hier können zusätzliche Prozessdaten anhand von additiver Sensorik erfasst werden. Dabei könnte es sich beispielsweise um eine Schwingungsmessung oder um ein 4.0 Out Gateway nach NE 175, welches insbesondere bei Brownfield-Anlagen Anwendung findet, handeln. Die M+O Koordinationsebene dient der aggregierten Darstellung der M+O Daten sowie deren Steuerung. Hier kann ein SCADA System laufen, das Verschleißzustände, die nächste Wartung oder Optimierungsvorschläge auflistet.

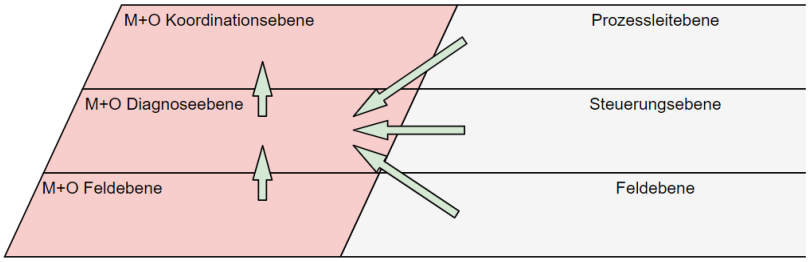


Bild 6: Datenflüsse in den M+O Ebenen

Im Rahmen von modularen Anlagen können solche erweiterten M+O Anwendungen in verschiedenen Formen auftreten. Anlagenmodule können bereits eigene Plant Asset Management (PAM) Funktionen in einer mitgelieferten M+O Domäne enthalten oder Hersteller bieten über das Internet Cloudservices zur Überwachung an. Die konkrete Umsetzung, Laufzeitumgebung und der Umfang solcher PAM-Funktionen bieten einen großen Gestaltungsspielraum. Zusätzlich zu von Herstellern mitgelieferten Funktionen soll es aber auch möglich sein, dass Anwender eigene PAM-Funktionen implementieren, die sich an dem Datenhaushalt der Anlagenmodule bedienen.

Um den Gestaltungsspielraum zu wahren und gleichzeitig eine strukturierte Integration zu ermöglichen, sollen PAM-Funktionen, ebenso wie Anlagenmodule selbst, auch als dienstbasierte Module der M+O Koordinationsebene zur Verfügung gestellt werden. Ein PAM-Modul könnte beispielsweise rein softwareseitig existieren und eine Laufzeitüberwachung für ein Ventil darstellen. Anhand von Prozedurparametern nach MTP-Standard kann diese Überwachung für verschiedene Ventile parametriert werden. Denkbar wäre auch ein eigener MTP-File für aufwendigere PAM-Funktionen. Dieser enthält neben einem PAM-bezogenen Bedienbild auch Alarme, die den Nutzer auf einen hohen Verschleiß

Open Access. © 2021 J. John, Y. Pilous, N. Große
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

oder eine bald notwendige Wartung hinweisen. PAM-Funktionalitäten jeder Art können auf diese Weise ohne großen Aufwand in die M+O Koordinationsebene integriert werden. Eine Beschreibung anhand eines MTP-Files erlaubt sogar die direkte Integration in ein Leitsystem, sodass PAM-Funktionen direkt von dort aus aufgerufen werden können und PAM-bezogene Alarme direkt im Leitsystem verarbeitet werden. Hierfür gilt es allerdings genaue Betrachtungen hinsichtlich des in der NOA definierten Verification of Request zu unternehmen, damit das Schutzziel der hohen Verfügbarkeit der Basisautomation gewährleistet bleibt.

Konkret bedeutet das im Zuge dieses Konzeptes, dass modulare Anlagen idealerweise selbst aus zwei Domänen bestehen: Der hochverfügbaren Basisautomation und einer M+O Domäne. Die Basisautomation wird anhand eines MTP-Files in das Leitsystem integriert. Einfache Monitoring-Funktionen werden im Leitsystem anhand des WQC realisiert und geben dem Nutzer einen simplen Überblick über den Zustand des Assets. Innerhalb der M+O Domäne sind erweiterte Monitoringfunktionen vorhanden, die selbst anhand eines MTP-files in ein zusätzliches M+O Koordinationssystem integriert werden. Im Gegensatz zu einem Leitsystem werden hier allerdings keine Rezepte orchestriert, sondern M+O Dienste manuell oder automatisch gestartet. Die M+O Domäne dient als sichere „Spielwiese“ für neue Technologien der Industrie 4.0, in der sichergestellt ist, dass die Basisautomation keine Beeinträchtigungen erfährt.

In dieser Form erreicht man eine klare Trennung der beiden Domänen, die jeweils verschiedene Ziele verfolgen. Die Domäne der Basisautomation erlaubt eine simple, anwenderfreundliche Steuerung der Anlage ohne den Nutzer mit Informationen zu überfrachten. Für detaillierte, erweiterte Informationen wird ein zusätzliches System genutzt, das insbesondere durch die Offenheit für neue Technologien Vorteile offenbart.

4 Anwendung in der Lehre

Das PLT-Labor der TH Köln befasst sich mit der Erforschung und Verifizierung solcher Strukturen. Der Nutzen von M+O Funktionen für Produktionsanlagen ist enorm, wenn es um die Reduktion von Instandhaltungskosten und die Steigerung der Verfügbarkeit geht. Mithilfe von Predictive Maintenance konnten beispielsweise nach Schätzungen Stillstandszeiten um bis zu 18% und Wartungskosten um bis zu 17% reduziert werden [6]. Aufgrund dieses enormen Nutzens ist daher zu erwarten, dass der Arbeitsmarkt insbesondere Absolventen in diesem Fachbereich benötigt. Die Lehre zur Umsetzung solcher Funktionalitäten und deren Anbindung an traditionelle Automatisierungsstrukturen ermöglicht Studierenden als Wegbereiter für Industrie 4.0 in der Prozessindustrie in Erscheinung zu treten.

Das PLT-Labor setzt bei der Ausbildung der Studierenden auf eine sehr praxisnahe Gestaltung. Anhand der mehr als 100 Feldgeräte und der vier Leitsysteme, die im Labor vorhanden sind, lassen sich NOA-Strukturen originalgetreu nachbauen und vermitteln so das Wissen auch abseits von Diagrammen und Zeichnungen. Funktionen, die vorher nur in Matlab oder Python simuliert wurden, können anhand von realen Nachbauten verifiziert werden. Die Studierenden des PLT-Labors entwickelten in Zusammenarbeit mit namhaften Herstellern bereits Diagnosefunktionen zum Beispiel für Exzenterschneckenpumpen oder städtische Abwasserbauwerke.

Open Access. © 2021 J. John, Y. Pilous, N. Große
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

5 Literatur

[1] VDI/VDE/NAMUR 2658-6, Konzept modulares Alarmmanagement, Entwurf, Januar 2021
[2] VDI/VDE/NAMUR 2658-3, Bibliothek für Datenobjekte, September 2020
[3] NAMUR Empfehlung NE 107, 10. April 2017
[4] NAMUR Empfehlung NE 175, 09. Juli 2020
[5] NAMUR Empfehlung NE 129, 12. Oktober 2009
[6] BearingPoint Predictive Maintenance Studie, 2021

Open Access. © 2021 J. John, Y. Pilous, N. Große
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03-11.03.2022

Entwicklung eines Werkzeugs und des Prozesses für das automatisierte Schaben von Metalloberflächen

Simon Eberle[1], Kai Oßwald[2]

Zusammenfassung

Das Schaben ist ein Verfahren zur Bearbeitung metallischer Oberflächen und wird bislang ausschließlich manuell angewendet. Der Beitrag handelt von der Entwicklung eines Werkzeugs und des Prozesses für das Schaben von Metalloberflächen. Das im Rahmen eines Forschungsprojekts entwickelte Vorsatzwerkzeug zum Anbau an eine standardisierte CNC-Fräsmaschine bietet unter der Verwendung eines ebenfalls entwickelten Softwaretools die Möglichkeit das Verfahren unabhängig von spezialisierten Fachkräften durchführen zu können. Des Weiteren kann durch die Automation des Verfahrens eine höhere Produktivität realisiert werden. Der Beitrag geht neben dem aktuellen Stand der Technik intensiv auf die Eigenschaften des Vorsatzwerkzeugs, die Entwicklung eines notwendigen spezifischen Softwaretools sowie auf die Qualifizierung des Systems ein. Abschließend werden die gewonnen Ergebnisse in die Thematik eingeordnet und weiteres Forschungspotential ausgewiesen.

Stichwörter

Schaben, automatisiertes Schaben, Oberflächenfinish, CNC-Technik

1 Einleitung

In der Herstellung von Maschinenkomponenten sind neben der Erfüllung von geometrischen Anforderungen auch die Eigenschaften der entsprechenden Werkstückoberfläche relevant. Da diese in der technischen Anwendung häufig entscheidend für deren Funktion sind, werden Oberflächen häufig durch industrielle spanende Finishingverfahren, wie das Schleifen oder das Honen, nachbearbeitet.
Darüber hinaus gibt es jedoch weiterhin handwerkliche Verfahren zur Optimierung metallischer Werkstückoberflächen, wie das Schaben, welches bereits seit Jahrhunderten eingesetzt wird. Neben der Erzeugung von ebenen Bauteiloberflächen zeichnet sich das Verfahren durch die besondere Oberflächenstruktur und dadurch entstehende sehr gute tribologische Eigenschaften aus. Des Weiteren generiert das Schaben bei der Erzeugung des Spanabtrags im Vergleich zu anderen abtragenden Verfahren nur einen sehr geringen Wärmeeintrag in die Oberfläche, sodass die Oberflächeneigenschaften des Werkstückes hierdurch nicht nachteilig beeinflusst werden. Diese Vorteile führen unter anderem dazu, dass das Verfahren – trotz der damit verbundenen hohen Personalkosten – bis heute im Bereich von Maschinenführungen und Lagern im Einsatz ist.

1 Simon Eberle, M.Sc., Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien, Hochschule Pforzheim
2 Prof. Dr. Kai Oßwald, Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien, Hochschule Pforzheim

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2 Technologien zur Erzeugung geschabter Oberflächen

Das Schaben ist nach DIN 8589-9, das „Spanen mit einem Spanwerkzeug (Schaber) zur Veränderung der Werkstückoberfläche, wobei der Schaber entlang dieser Oberfläche geführt und die Spanungsdicke durch die Anpresskraft gesteuert wird." Darüber hinaus definiert die zurückgezogene VDI Richtlinie 3220 das Verfahren wie folgt: „Schaben ist das Spanen mit vorzugsweise einschneidigem, nicht ständig im Eingriff stehendem, in einer Hauptrichtung bewegtem Werkzeug zur Verbesserung von Form, Maß, Lage und Oberfläche vorgearbeiteter Werkstücke." Infolge der Bearbeitung entstehen unregelmäßig gekreuzte Bearbeitungsspuren, welche eine geschabte Oberfläche auch in Bezug zu den resultierenden Eigenschaften auszeichnen. Die Erzeugung geschabter Oberflächen erfolgt in der Praxis bislang ausschließlich durch handgeführte Systeme.

– Handgeführte Systeme

Die Bearbeitung einer Werkstückoberfläche durch handgeführte Systeme kann hierbei auf zwei unterschiedliche Weisen erfolgen. Dies sind einerseits das ursprüngliche Handschaben und andererseits das Schaben mit Hilfe eines Elektrowerkzeugs. Beim Verfahren des Handschabens wird neben der richtigen Positionierung des Werkzeugs in Ort und Winkellage die Vorschub- und Schnittbewegung durch körperliche Betätigung des Werkers durchgeführt. Infolgedessen wird sowohl die Schnittkraft als auch die Passivkraft durch den Werker aufgebracht, welche zu einer hohen körperlichen Anstrengung führen. Unsere Arbeitsgruppe befasste sich bereits in der Vergangenheit mit den Besonderheiten des Verfahrens und führte Forschungen hinsichtlich der auftretenden Prozessparameter [4], der angewendeten Schabstrategien und der resultierenden Oberflächeneigenschaften [5] durch.
Eine Alternative zu der körperlich anstrengenden Methode des Handschabens stellt das „maschinelle" Schaben mittels Elektrowerkzeug dar. Hierbei erzeugt ein Elektromotor über ein Getriebe eine oszillierende translatorische Bewegung, welche der Schnittbewegung entspricht. Auf Basis dieser Grundbewegung führt nun der Werker die Vorschubbewegung bzw. die Positionierung in Ort und Lage weiterhin durch. Die Nutzung des Elektrowerkzeuges ermöglicht eine höhere Produktivität und wird zumeist für die Schruppbearbeitung großflächiger Bauteile eingesetzt. Darüber hinaus kann das Elektrowerkzeug bei geeigneter Anwendung auch für Schlichtoperationen eingesetzt werden.
Da die Anwendung des Verfahrens jedoch speziell qualifizierte Fachkräfte erfordert, hat seine Anwendung aufgrund der hohen Personalkosten des Gewerks und des Mangels an entsprechend ausgebildeten Mitarbeitern trotz der Verfahrensvorteile in den letzten Jahrzehnten stark abgenommen. Infolgedessen haben sich bereits unterschiedliche Forschergruppen damit beschäftigt, die Technologie des Schabens auf Basis unterschiedlicher Automatisierungsansätze zu realisieren.

– Automatisierungsansätze

Bisherige Konzepte zur Automatisierung des Schabprozesses eint, dass sie auf eigenständigen, autarken Maschinen beruhen. Tong et al. [6] stellen ein System in Anlehnung an eine Werkzeugmaschine vor. Der Aufbau verfügt über drei translatorische Achsen zur Positionierung im Raum und eine Drehachse zur Ausrichtung des Werkstücks in der X-/Y- Ebene. Die Schabbewegung wird hierbei durch einen Pneumatikzylinder realisiert. Ein weiteres System wurde von Tsutsumi et al. [7] entwickelt. Hierbei wird ein federvorgespannter Schabmeißel über einseitig gelagerte, auskragende Maschinenachsen bewegt. Infolgedessen müssen bei dieser Bauweise die Achsen zur Positionierung auch die Schnitt- und Passivkraft für den Schabprozess aufbringen. Der großflächige Maschinentisch dieses Prototyps ermöglicht die Befestigung und Bearbeitung großer Bauteile. Um die Bearbeitung von großflächigen Bauteilen zu erleichtern und die Bindung an die Einschränkungen durch die Maschine zu reduzieren, entwickelten Lin et al. [8] ein mobiles System in Gantrybauweise bzw. Tsai et al. [9] ein System basierend auf einem starren Portal. Die von Lin et al. [8] entwickelte Methode ermöglicht eine höhere Flexibilität, da der Aufbau mit einem geringen Eigengewicht von rund 30 kg um das zu bearbeitende Werkstück platziert werden kann. Alternativ hierzu vereinigt die Portalbauweise von Tsai et

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

al. [9] die gesamte Bewegungseinheit kompakt in einer Baugruppe. Dies führt dazu, dass große Bauteile mit einem eingeschränkten Bearbeitungsbereich bearbeitet werden können. Darüber hinaus haben sich die bereits erwähnten Forschergruppen auch mit der Erfassung der Oberfläche mittels CCD (Charge-Coupled Device)-Zeilenkamera oder Lasertriangulation und der Implementierung der daraus gewonnenen Erkenntnisse in den jeweiligen Maschinencode befasst (bspw. in [10]). Diese Maßnahme ermöglicht die Bereiche, welcher eine Überarbeitung bedürfen zu identifizieren und gezielt zu bearbeiten. Dennoch liegen derzeit keine Informationen über ein kommerziell verfügbares automatisiertes System zur Herstellung geschabter Oberflächen vor.

3 Entwicklung eines Vorsatzwerkzeuges für eine CNC-Fräsmaschine

Um einen reproduzierbaren und produktiven Schabprozess zu ermöglichen, entwickelt die Hochschule Pforzheim zusammen mit dem Kooperationspartner ROMAI Robert Maier GmbH, Vaihingen/Enz-Horrheim eine Methode mit der Intention das Verfahren zu modernisieren und an die aktuellen Randbedingungen der Wirtschaftlichkeit und des bestehenden Personalangebotes anzupassen. Im Fokus steht daher die Entwicklung einer automatisierten Lösung zur Bearbeitung der Bauteile, sodass das Verfahren in einem weiten Einsatzgebiet unabhängig von speziell geschultem Personal Anwendung finden kann. Damit das neue System einfach in bestehende Fertigungsabläufe integriert werden kann, erfolgte nach Abwägung verschiedener Lösungsvarianten die Entscheidung die Automatisierung mittels eines Vorsatzwerkzeuges auf bestehende Maschinen umzusetzen. Die Basis des automatisierten Prozesses stellt hierbei eine handelsübliche drei- oder fünfachsige CNC-Fräsmaschine mit einem von ROMAI entwickelten und gefertigten Vorsatzwerkzeug dar. In der Folge erprobt die Hochschule Pforzheim das Werkzeug und entwickelt einen entsprechenden Fertigungsprozess.
Das Werkzeug, welches in Bild 1 schematisch dargestellt ist, wird an die Spindeleinheit der Fräsmaschine angebaut und mittels einer Standardschnittstelle angetrieben. Das im Werkzeug verbaute Spezialgetriebe wandelt hierbei die eingeleitete senkrechte Rotationsbewegung über verschiedene Zwischenstufen in eine oszillierende translatorische Bewegung um. Der Bewegungsablauf kann der Detailansicht in Bild 1 entnommen werden.

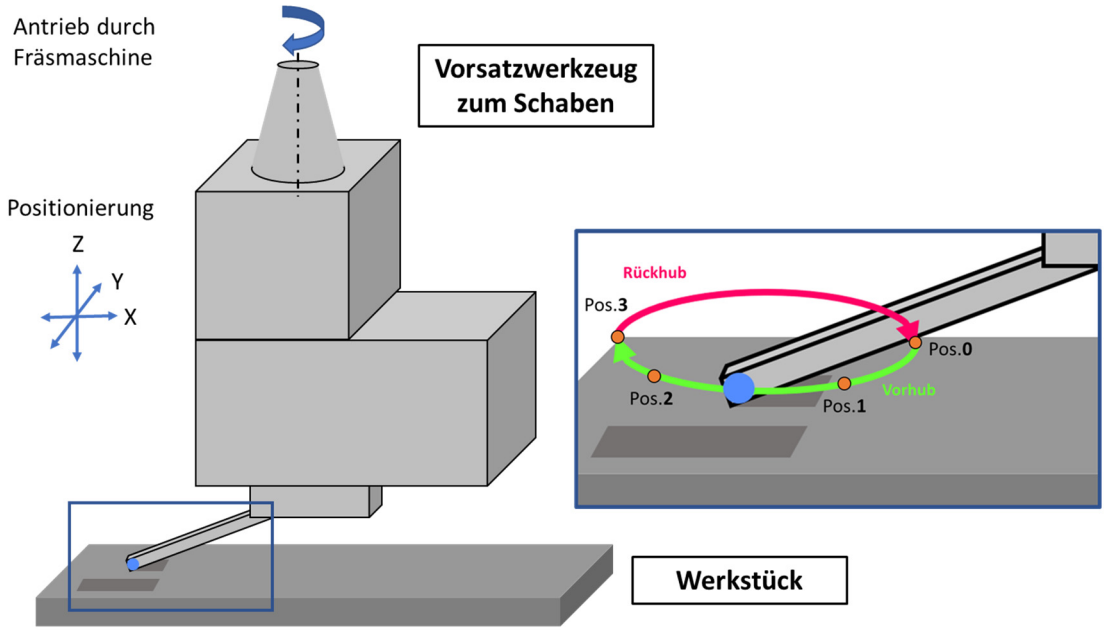


Bild 1: Schematische Darstellung des Schabwerkzeugs

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Eine Besonderheit ist, dass die Schneide des Meißels abweichend von den bisher bekannten Schabverfahren eine elliptische Bewegungskurve verfolgt und daher aufgrund des integrierten Abhebehubes in Z-Richtung den Rückhub ohne eine Werkstückberührung vornimmt. Somit entsteht ein Bewegungsablauf des Schabmeißels, welcher vier wesentliche Zwischenpositionen durchläuft. Diese Positionen sind in auch in der Detailansicht der schematischen Abbildung dargestellt. Der immer wiederholende Bewegungsablauf startet mit dem Beginn des Vorhubs in der Pos.0. In Abhängigkeit der gewählten Parameter erfolgt darauf hin bei Pos.1 der Eintritt des Meißels in den Werkstoff und bei Pos. 2 der Austritt aus dem Werkstoff. In Folge ist die Erstellung der einzelnen Schabfurche beendet und der Schabmeißel startet in Pos.3 den Rückhub, um wieder zum Ausgangspunkt des Zyklus zu gelangen. Die Ausprägung der Bewegungskurve kann durch eine Modifikation im Werkzeug verändert werden. Darüber hinaus kann die Länge des Schabhubes sowie die Winkelorientierung des Werkzeuges gegenüber dem Werkstück am Werkzeug selbst eingestellt werden. Im Rahmen der Schabbearbeitung wird das Werkzeug mittels der drei Koordinatenachsen der Fräsmaschine in X-, Y- und Z- Richtung positioniert, wodurch die Bearbeitungsstrategie der zu bearbeitenden Fläche auf Grundlage eines zuvor übermittelten NC- Programmes abgearbeitet wird.

4 Entwicklung eines Softwaretools zur automatisierten Erzeugung von NC-Programmen

Die Entwicklung des Vorsatzwerkzeugs stellt in Bezug zu einer Komplettlösung für das automatisierte Schaben nur einen Bestandteil dar. Daher wurde für die Automatisierung des Prozesses ein Softwaretool entwickelt, sodass der Anwender eine einfache Umsetzung des automatisierten Schabens ohne spezielle Vorkenntnisse vornehmen kann. Das Tool kann auf Basis der im Interface eingegebenen Daten ein an die Bearbeitungsfläche angepasstes NC- Programm im „G-Code“ nach DIN 66025/ISO 6983 erstellen. Diese Aufgabe übernimmt in konventionellen Prozessen normalerweise eine CAM-Software (Computer Aided Manufacturing). Da das Schaben (bspw. im Vergleich zum Fräsen) eine ganze Reihe von Besonderheiten aufweist, werden diese im eigens erstellten Softwaretool berücksichtigt und entsprechend umgesetzt.

4.1 Programmstruktur

Das Softwaretool (mit dem internen Namen „G-Code Generator“) ist eine WPF (Windows Presentation Foundation)-Anwendung, welche in der Softwareumgebung von Visual Studio, Microsoft entwickelt wurde. Hierbei ist für das User Interface die Programmiersprache XAML (Extensible Application Markup Language) und für das Backend die Programmiersprache VBA (Visual Basic for Application) verwendet worden. Die Programmstruktur des Softwaretools, welche auch in Bild 2 dargestellt ist, beginnt mit dem Öffnen der Anwendung in der Windowsumgebung. Ein User- Interface wird geöffnet und der Anwender kann seine Daten für das automatisierte Schaben eingeben. Hierbei sind die eingegeben Daten in zwei Kategorien gegliedert: in die zwingend erforderlichen und die optionalen Daten. Zu den zwingend erforderlichen Daten gehören beispielweise Daten zum Werkstück, wie die Maße der Bearbeitungsfläche, die Schabtiefe und die Schabhubdichte sowie Werkzeug- und Maschinendaten, wie der Richtungswinkel, die Schabhublänge und die Hubfrequenz. Darüber hinaus können die optionalen Daten in einem separaten Fenster eingegeben werden und beinhalten Daten, welche vom Standard abweichen. Hierzu zählen beispielsweise Inhalte zu den Maschinengrenzwerten, zu der eingesetzten Maschine, zu den Nullpunkten oder zur Wahl der Bearbeitungsrichtung. Nach Abschluss der Eingabe werden die Parameter nach den festgesetzten Anforderungen geprüft und die Vorschubgeschwindigkeit berechnet. Im Falle von Unstimmigkeiten fordert eine Warnmeldung den Anwender zur Korrektur der Daten auf. Sofern bei der Berechnung der Vorschubgeschwindigkeit keine Maschinengrenzwerte überschritten worden sind, kann nun der Button „Code generieren“ aktiviert und die

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Berechnung des G-Code angefordert werden. Da die Berechnung in Abhängigkeit verschiedener Auswahlmöglichkeiten erfolgt, führt das Programm verschiedene Abfragen durch. Die hierfür notwendigen Abfragen sind in Bild 2 mittig in hellblau dargestellt und beziehen sich auf zuvor festgelegte Auswahlen. Diese betreffen Aspekte zur Maschinensteuerung, zu einer möglichen Nullpunktverschiebung, zur Bauart der Fräsmaschine (3- oder 5-achsig) und zur Festlegung des Werkzeugnullpunkts sowie zur gewählten Bearbeitungsrichtung (Gleichlauf/Gegenlauf). Nach abgeschlossener Berechnung wird nun der Code zur Durchsicht angezeigt und kann nach Festlegung des Dateipfads per Click exportiert werden. Abschließend kann die Export-Datei weiter an die Steuerung der Fräsmaschine übermittelt und die Bearbeitung initiiert werden.

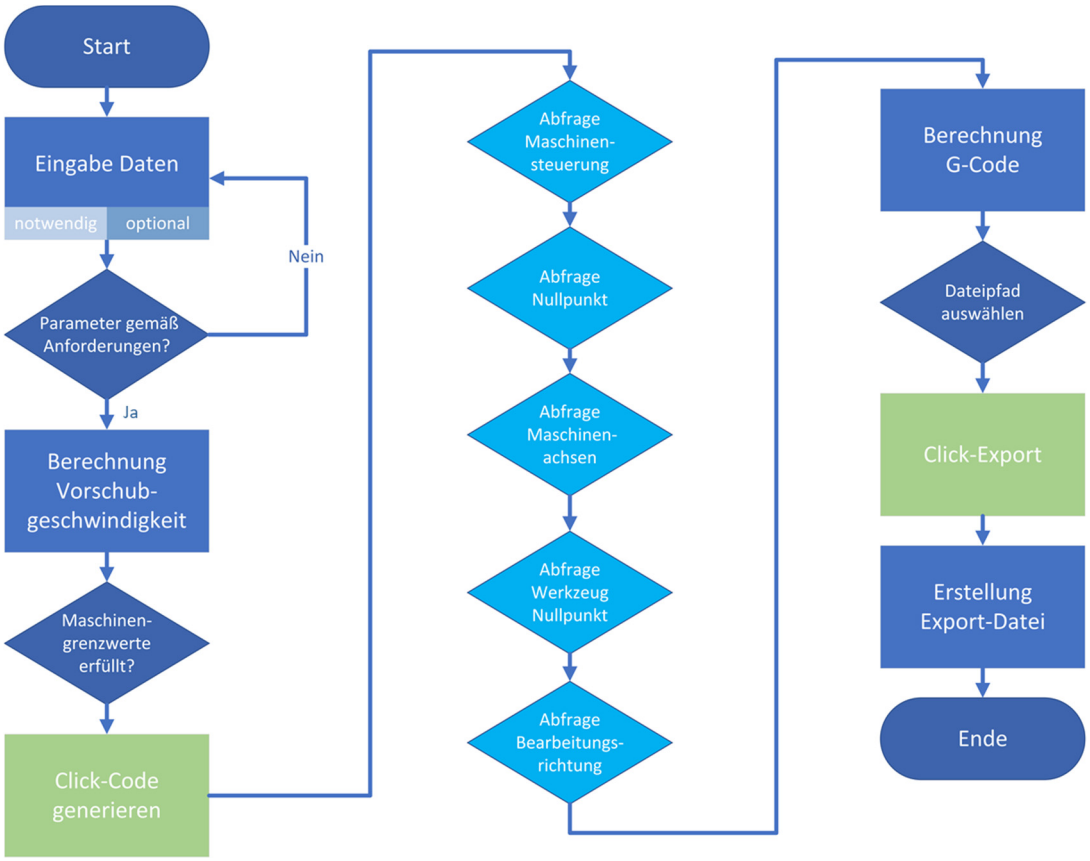


Bild 2: Programmstruktur Softwaretool

4.2 Software Kompensationen

Im Rahmen der G-Code-Berechnung führt die Software zur Berücksichtigung der schabspezifischen Besonderheiten verschiedene Kompensationen durch. Sie sind in zwei Kategorien gegliedert. Dies sind einerseits die Kompensationen mit dem Bezug zum Werkzeug und andererseits die Ausgleichsmaßnahmen, welche in Verbindung mit der Bewegung stehen. Die werkzeugspezifischen Aspekte betreffen hierbei sowohl die Positionierung in der X-/Y-Ebene, als auch die Zustellung in Z-Richtung. In Abhängigkeit der verwendeten Meißellänge und des gewählten Richtungswinkels des Werkzeugs muss die Abstandsänderung in X- und Y-Richtung zwischen der Meißelspitze und der Spindelmitte des Werkzeugs, welche den Referenzpunkt bildet, zur richtigen Positionierung des Werkzeugs berücksichtigt werden. Da darüber hinaus das Werkzeug im Bearbeitungsprozess eine Nachgiebigkeit aufweist, muss diese in der Zustellung in Z-Richtung durch eine entsprechende Federkonstante ebenfalls berücksichtigt werden. Des Weiteren sind durch die systembedingten Bewegungsabläufe weitere Maßnahmen notwendig. Durch die Überlagerung der Schabhubgeschwindigkeit v_t mit der Verfahrgeschwindigkeit v_f des Werkzeugs entstehen Auswirkungen auf die Länge und den Richtungswinkel der

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Schabfurche, welche in Bild 3 dargestellt sind. Im Fall einer positiven Verfahrgeschwindigkeit erfolgt die Bearbeitung im Gleichlauf. Hierdurch ergibt sich ein größerer effektiverer Richtungswinkel ρ sowie eine erhöhte Länge der Schabfurche (rote Schraffierung). Bei umgekehrter Verfahrrichtung des Werkzeugs (Gegenlauf) entsteht ein geringerer effektiver Richtungswinkel ρ sowie eine geringere Länge der Schabfurche (orange Schraffierung). Um diesen Effekt zu eliminieren muss die Software in Abhängigkeit des Verhältnisses der Drehzahl zu der Verfahrgeschwindigkeit den Einstellrichtungswinkel φ berechnen und in den Code implementieren.

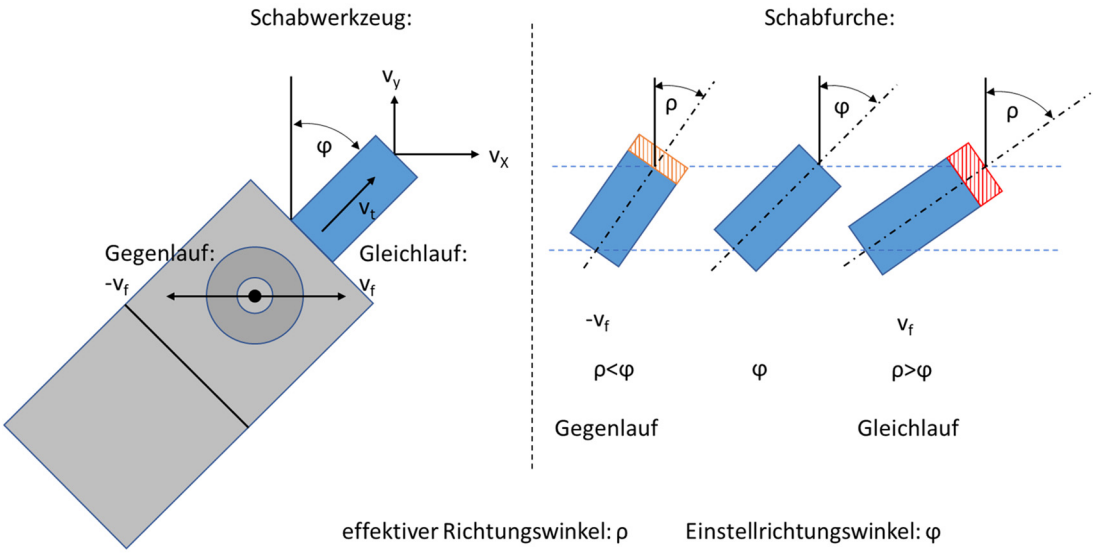


Bild 3: Kompensationen im Kontext zur Bewegung

4.3 Beispielprogramm

Im Folgenden wird exemplarisch der “G-Code” für die Ansteuerung einer CNC-Fräsmaschine nach DIN 66025/ISO 6983 zum automatisierten Schaben vorgestellt. Hierbei umfasst der Code, welcher auszugweise in Bild 4 dargestellt ist, eine flächige Überschabung des Bauteils mit einem Durchgang unter dem Winkel von +45° und einem weiteren Durchgang in einem Winkel von -45°. Der Rahmen eines entsprechenden NC- Programmes wird durch die Anfangs- und Schlusssätze, welche in grau eingefärbt sind, verkörpert. Hierbei wird zu Beginn ein entsprechendes Programm benannt und grundlegende Definitionen zu den Maßeinheiten, zur Wahl des Koordinatensystems oder zur Aufhebung von bestehenden Kompensationen getroffen. Im darauffolgenden Teil (grüne Kennzeichnung) werden dem Bediener nochmals die wesentlichen Prozessparameter, wie zum Beispiel Informationen über die beabsichtigte Hubfrequenz, die Vorschubgeschwindigkeit oder die tatsächliche Schabhubdichte in Form von Kommentaren mitgeteilt. Da dieses Beispielprogramm für die Nutzung an einer 3-Achs-Maschine vorgesehen ist, muss der Bediener am programmierten Halt (rote Kennzeichnung) den Winkel des ersten Durchgangs der Überschabung händisch am Werkzeug einstellen. Nach Abschluss dieser Maßnahme kann das Programm fortgesetzt und die Maschinenspindel mit der gewünschten Drehzahl und dem gewünschten Vorschub im Rechtslauf (gelbe Kennzeichnung) angewählt werden. Im Folgenden wird die Fläche des Bauteils nun reihenweise bearbeitet. Hierbei wird der Schabmeißel an die jeweilige Startposition der Reihe in der X-/Y- Ebene positioniert, die Zustellung in Z-Richtung vorgenommen, die Schabung der Reihe durchgeführt und abschließend der Meißel wieder von der Werkstückoberfläche abgehoben. Dieser Vorgang (blaue Kennzeichnung) wird nun bis zur vollständigen Bearbeitung des Bauteils wiederholt. Nach Abschluss des ersten Durchgangs wird das Werkzeug nun zu einem Werkzeugwechselpunkt gefahren (violette Kennzeichnung) und ein programmierter Halt (rote Kennzeichnung) vorgenommen. Nun kann der Bediener ähnlich wie zu Beginn des Programmes den

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Richtungswinkel am Werkzeug für den zweiten Durchgang einstellen. Im Falle, dass eine 5-Achs-Maschine für die Bearbeitung verwendet wird, kann auf die programmierte Halte verzichtet und stattdessen die Winkeländerung mit Hilfe der Maschinen C-Achse durchgeführt werden. Im weiteren Verlauf kann nun der zweite Teil der Überschabung vergleichbar zum ersten Teil mit abschließender Positionierung zum Werkzeugwechselpunkt und Beendigung des Programmes vorgenommen werden.

```
%Schabprogramm G71
N10 G90 G17 G40
N20 ;Drehzahl=100 1/min, Hubfrequenz=100 1/min, Vorschubgeschwindigkeit=471 mm/min
N30 ;Schabhubdichte tatsaechlich=300 1/dm²
N40 ;Werkzeugwechselpunkt absolut X=300 Y=100 Z=25
N50 M0 ;programmierter Halt - Werkzeugkopf bitte auf Winkeleinstellung 45° verstellen. Danach Start betaetigen
N60 M3 S100 F471
N70 G00 X-53.387 Y46.613 Z10
N80 G01 Z-0,02
N90 G01 X58,684
N100 G01 Z10
...
N670 G00 X300 Y100 Z25
N680 M0 ;programmierter Halt - Werkzeugkopf bitte auf Winkeleinstellung 315° verstellen. Danach Start betaetigen
N685 M3
N690 G00 X158.387 Y46.613 Z10
N700 G01 Z-0,02
N710 G01 X46.316
N720 G01 Z10
...
N1290 G00 X300 Y100 Z25
N1300 M30
N99999999 %Schabprogramm G71
```

Bild 4: Beispielprogramm

5 Qualifizierung des Systemverhaltens

Um abschließend die Einsatzfähigkeit und die Eignung des automatisierten Systems für die industrielle Schabbearbeitung nachzuweisen, werden mittels eines Prüfstandes verschiedene Kenngrößen erfasst. Diese umfassen die auftretenden Kräfte, die Bearbeitungstiefen, die Bewegungsabläufe und die erzeugten Oberflächen, welche analysiert, ausgewertet und mit den Daten des bisher bekannten Handschabens bzw. Elektroschabens verglichen werden. Hierzu ist geeignete Messtechnik notwendig, welche im Folgenden näher vorgestellt wird. Auf dieser Basis können der automatisierte Prozess sowie der Prototyp des Schabwerkzeugs in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner intensiv untersucht, kontinuierlich optimiert und mögliche Anwendungsbereiche ermittelt werden.

5.1 Messtechnik

Die Messtechnik zur Untersuchung der unterschiedlichen Prozessparameter besteht aus verschiedenen Sensoren sowie Hardware und Software zur Erfassung der Daten. Zum Einsatz kommen hierbei zwei taktile Wegmesssensoren, ein Drehwinkelsensor, eine Kraftmessdose sowie ein Schaltkontakt. Die Sensoren sind mittels 3-D gedruckter Vorrichtungen an das Werkzeug selbst oder auf den Maschinentisch der CNC- Fräsmaschine appliziert. Eine Übersicht über die Messtechnik ist dem Bild 5 zu entnehmen. Hierbei ermöglichen die zwei taktilen Messtaster des Herstellers Keyence (Typ GT2- H12 / GT2-H32) eine Erfassung des Abhebehubs in Z- Richtung bzw. die Erfassung der Schabhublänge, sodass der reale Bewegungsablauf des Schabmeißels erfasst werden kann. Des Weiteren wird mit einem Positionssensor des Herstellers Honeywell (Typ RTY360HVEAX) die Position des Drehwinkels in Bezug zum Schabhub erfasst. Hierzu ist die Antriebswelle des Sensors formschlüssig mit einer Zwischenwelle

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

des Werkzeugs verbunden. Um darüber hinaus eine Aussage über die Berührung des Schabmeißels mit der Werkstückoberfläche treffen zu können, ist in den Messaufbau ein Kontaktstromkreis mit Kontroll–LED eingerichtet worden, welcher bei Berührung des Schabmeißels auf der Werkstückoberfläche geschlossen wird. Infolge kann über den Spannungsabfall die entsprechende Kontaktierung ausgewertet werden. Abschließend werden noch die entstehenden Prozesskräfte mittels einer Kraftmessplattform in allen drei Raumrichtungen erfasst. Der hierfür verwendete Sensor, ist ein Dynamometer des Herstellers ME-Systeme (Typ K3D120) und besitzt einen Messbereich von ±500N. Die zu erfassenden Messdaten werden auf Basis eines LabVIEW-Programmes und der dazu notwendigen Hardware des Herstellers NI erfasst und in entsprechende Datenfiles zur weiteren Auswertung abgespeichert.

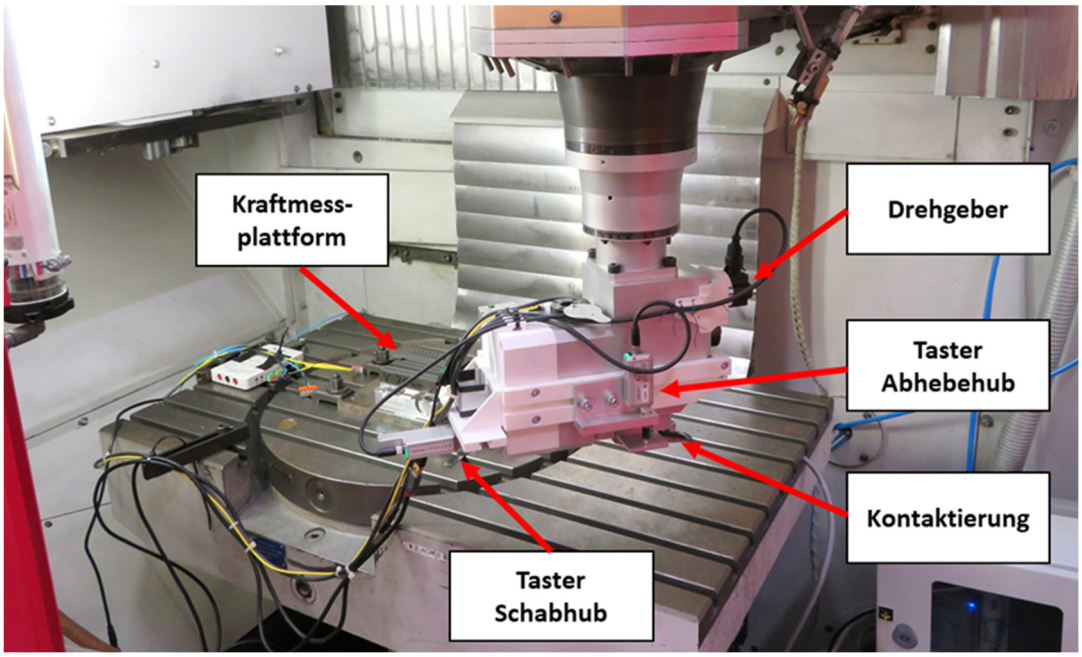


Bild 5: Messtechnik zur Systemqualifizierung

5.2 Analyse der Versuchsreihen

Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen können verschiedene Prozessparameter, wie zum Beispiel die Drehzahl, der Vorschub, die Zustelltiefe oder die Bewegungsart variiert und deren Auswirkungen ermittelt werden. Somit kann durch die bereits vorgestellte Messtechnik eine detaillierte Betrachtung zwischen den Prozesseingangs- und Ausgangsgrößen erfolgen und Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten zwischen den eingestellten Größen und den resultierenden Größen können festgestellt werden. Im Folgenden werden nun exemplarisch verschiedene Ergebnisse der Versuchsreihen vorgestellt und deren Erkenntnisse erläutert.
Das Bild 6 zeigt den realen Bewegungsablauf des Schabmeißels in der aktuellen Konfiguration des Werkzeugs im Bewegungsmodus „Gegenlauf“. Hierbei werden die erfassten Messdaten der Schabhublänge auf der X-Achse und des Abhebehubs in Z-Richtung auf der Y-Achse über mehrere Zyklen hinweg in Form eines X-/Y- Diagrammes aufgetragen und qualitativ dargestellt. Dabei ist zuerkennen, dass die Bewegungskurve von einer elliptischen Bahn abweicht und stattdessen im Bereich des Vorhubs eine eher geradlinige aufsteigende Bewegung aufweist. Darüber hinaus sind auch deutliche Unterschiede im Verlauf zwischen dem Bewegungsablauf mit Werkstückkontakt (blaue Kurven) und dem Bewegungsablauf ohne Werkstückkontakt (orange Kurven) festzustellen. Im Falle einer Materialbearbeitung steigt der Verlauf des Abhebehubs mit Beginn des Vorhubs kontinuierlich an und nähert sich erst nach dem Materialaustritt wieder der unbelasteten Bewegungskurve an. Infolge ist die Einfederung des Systems bei der Wahl der Zustelltiefe zu beachten.

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

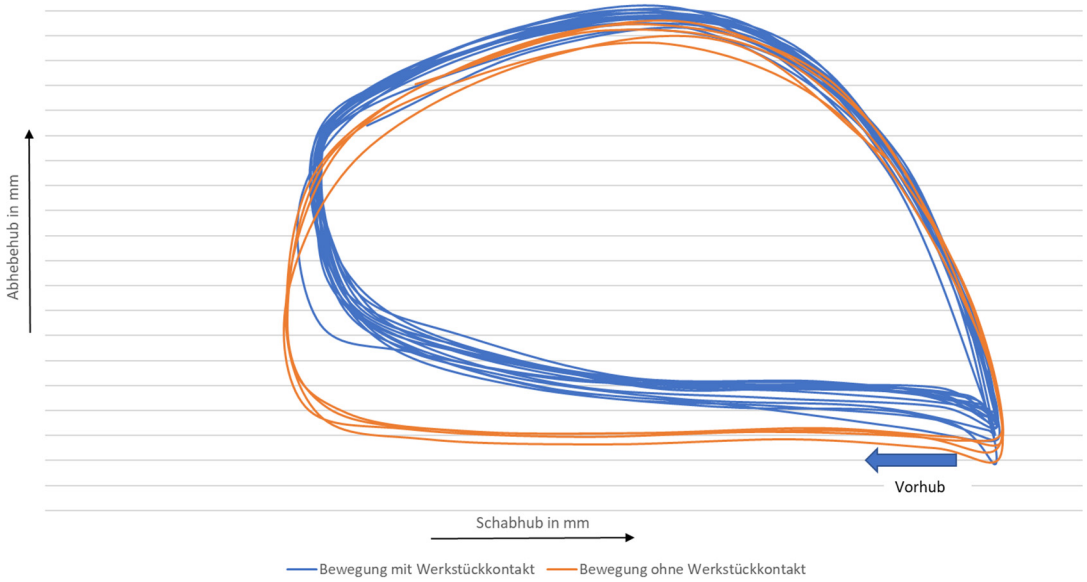


Bild 6: Bewegungsablauf Schabmeißel

Über den Bewegungsablauf hinaus ist auch eine Betrachtung der Prozesskräfte von hoher Bedeutung. Das nachfolgende Bild 7 stellt die resultierende Schnittkraft F_c (orange) und die Passivkraft F_p (blau) über der Zeit für eine Schabreihe dar. Hierbei können dem Diagramm die Kräfte jedes einzelnen Schabhubs entnommen werden. Die Daten entstammen einer Versuchsreihe, bei welcher die Messdaten bei einem Hub von 15 mm und einer Zustelltiefe von 0,04 mm erfasst wurden. Die Abweichungen in der Schnittkraft sowie in der Passivkraft gegen Ende der Schabreihe können durch einen geringeren Materialabtrag aufgrund von Unebenheiten des Werkstücks erklärt werden. Die Auswertung zeigt somit eine plausible Größenordnung der Schnitt- und Passivkräfte für eine Schruppbearbeitung.

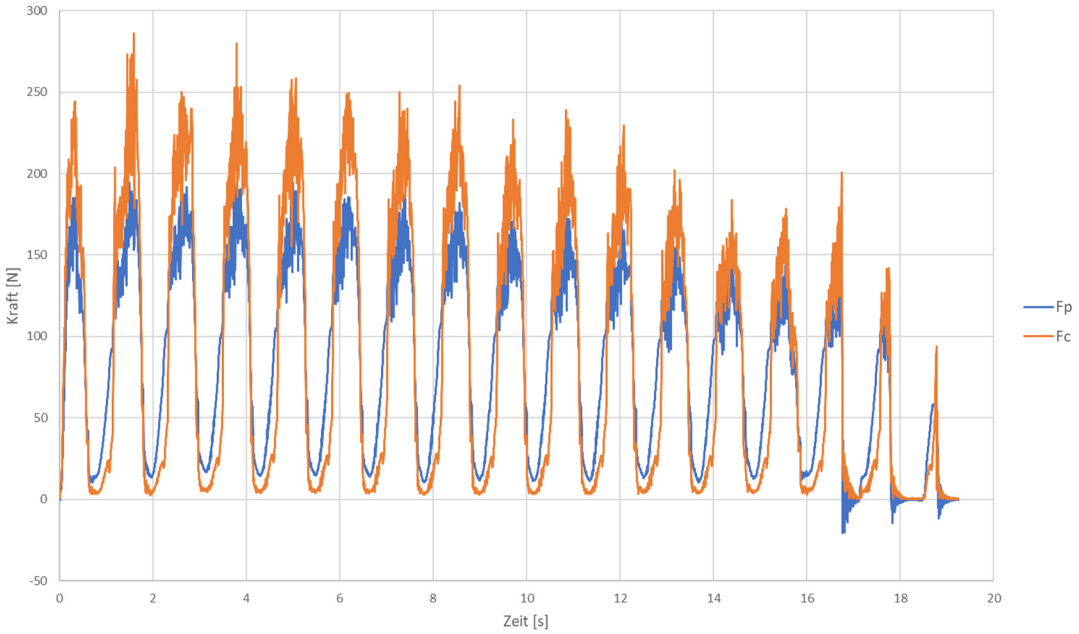


Bild 7: Kraftverlauf einer Schabreihe

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

6 Fazit und Ausblick

Unsere Forschungen zum automatisierten Schaben haben gezeigt, dass das bislang handwerkliche Fertigungsverfahren des Schabens prinzipiell automatisierbar ist. Das aktuelle System ist bereits in der Lage, erfolgreich Bauteile zu bearbeiten und somit geschabte Strukturen auf Werkstücke aufzubringen. Hierbei liegt derzeit der aktuelle Schwerpunkt primär auf der Schruppbearbeitung. Da die Schabbearbeitung durch einen Facharbeiter einen iterativen Prozess darstellt, nähert dieser sich schrittweise an die gewünschten Anforderungen hinsichtlich der Ebenheit und Lage. Diesen Prozess bilden wir derzeit noch nicht ab und sind infolgedessen auf die Genauigkeit unserer Basismaschine angewiesen. Dennoch stellt die Automatisierung auf Basis einer CNC-Fräsmaschine eine geeignete Lösung dar. Somit kann der Prozess des Schabens ohne große Investitionen mit Hilfe des entwickelten Vorsatzwerkzeugs und des Softwaretools anwenderfreundlich in bestehende Fertigungsabläufe integriert werden.
Um das System weiter zu entwickeln, sollte sich zukünftige Forschungsarbeit auf die Erzeugung geschabter Flächen auf Ebenheit und Lage fokussieren. Darüber hinaus weist auch die Untersuchung der tribologischen Eigenschaften von geschabten Oberflächen im Vergleich zu anderen Finishingverfahren weiteres Forschungspotenzial auf. Infolgedessen können die Verfahrensvorteile des Schabens detaillierter evaluiert und in der Praxis gezielter zum Einsatz gebracht werden.

7 Literatur

[1] DIN 8589-9:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen –
Teil 9: Schaben, Meißeln – Einordnung, Unterteilung, Begriffe
[2] VDI 3220:1960-03, Gliederung und Begriffsbestimmungen der Fertigungsverfahren, insbesondere für die Feinbearbeitung
[3] Schmid,W. Schaben. in Günter Spur – Handbuch Spanen (2014); Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG: München, Germany, 2014
[4] Oßwald, K., Lochmahr, I., Bagci, Y., & Saile, P. (2018). Investigation into Hand Scraping: A Microanalysis. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2(4), 76.
[5] Oßwald, K., Gissel, J. C., & Lochmahr, I. (2020). Macroanalysis of Hand Scraping. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 4(3), 90.
[6] Tong, H. F., Liu, W., Chi, Y., & Wang, W. (2014). Design of automatic scraping system. In Advanced Materials Research (Vol. 853, pp. 625-630). Trans Tech Publications.
[7] Tsutsumi, H., Yamada, R., Kyusojin, A., & Nakamura, T. (2007). Development of an Automatic Scraping Machine with Recognition for Bearing of Scraped Surfaces – Construction of Automatic Scraping Machine –. In Towards Synthesis of Micro-/Nano-systems (pp. 355-356). Springer, London.
[8] Lin, Y., Yeh, C. Y., Shiu, S. C., Lan, P. S. & Lin, S. C. (2018). The design and feasibility test of a mobile semi-auto scraping system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer, London.
[9] Tsai, Y. C., Li, J. H., Lee, J. N., & Jywe, W. Y. (2012). Development and implementation of automatic scraping mechanism. Advanced Science Letters, 8(1), 211-215.
[10] Hsieh, T. H., Jywe, W. Y., Huang, H. L., & Chen, S. L. (2011). Development of a laser-based measurement system for evaluation of the scraping workpiece quality. Optics and Lasers in Engineering, 49(8), 1045-1053.

Open Access. © 2022 Simon Eberle, Kai Oßwald
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Decentralized safety architecture for cyber-physical production systems

C. Faller[1] , A. Schwoll [1]

Summary

In the context of the paper, a research work is shown to implement a networked decentralized safety architecture that replaces the central architecture. Thus, the safety system fits better into the rest of the automation structure. On the one hand, this is done by a clearer hardware structure, as there is now one safety controller per decentralized unit, which, analogous to the distributed automation system, communicates with the other stations via an Ethernet-based bus system, thus greatly reducing the wiring and commissioning effort. On the other hand, the decentralized processing allows a local shutdown of the safety-relevant components and an escalation of the emergency shutdown to other areas, depending on the emergency stop situation. This means that in the event of a safety-critical situation, the shutdown is reduced to what is necessary from a safety point of view, which increases system availability.

Keywords

Industry 4.0, cyber-physical production systems, safety technology

1 Introduction

In order to enable an Industry 4.0 research infrastructure on the one hand and a practical training of students as well as a further training opportunity for employees of regional SMEs in the key region Velbert/Heiligenhaus on the other hand, an Industry 4.0 learning factory was launched on the Campus Velbert / Heiligenhaus (CVH) of the Bochum University of Applied Sciences, which represents a holistic image of a production company. The learning factory consists of a holistic model of a manufacturing company, from the ERP (or enterprise) level to the automation level. The represented process includes a raw parts warehouse, a testing facility, an assembly cell with robot, a shipping robot, connected with corresponding conveyor technology. The individual stations of the production plant each comprise a PLC, which is the heart of the decentralized automation. However, contrary to the plant's decentralized automation concept, the previous safety architecture consisted of a central safety PLC that can shut down the plant centrally. In the context of the paper, a research work is shown to implement a networked decentralized safety architecture that replaces the central architecture. Thus, the safety system fits better into the rest of the automation structure. On the one hand, this is done by a clearer hardware structure, as there is now one safety controller per decentralized unit, which, analogous to the distributed automation system, communicates with the other stations via an Ethernet-based bus system, thus greatly reducing the wiring and commissioning effort. On the other hand, the decentralized processing allows a local shutdown of the safety-relevant components and an escalation of the emergency shutdown to other areas, depending on the emergency stop situation. This means that in the event of a safety-critical situation, the shutdown is reduced to what is necessary from a safety point of view, which increases system availability.

[1] Bochum University of Applied Sciences

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

2 Initial situation in the CVH learning factory

As a research environment, and in order to provide practical training for students on the one hand and further training for employees of regional SMEs on the other, an Industry 4.0 learning factory was set up on the Velbert / Heiligenhaus campus (CVH) of Bochum University of Applied Sciences, which represents a holistic image of a production operation [1].

The learning factory consists of a holistic model of a manufacturing company, from the ERP level - pot floor - to the field level - the shop floor. SAP is the ERP system, the MES from MPDV, SCADA and energy monitoring from Schneider Electric are available. A transfer line from Festo Didaktik is available as a realistic production environment. This is originally from the year 2000 and is successively migrated in student projects to a contemporary automation technology with current PLCs (Siemens S7-1500, Beckhoff CX5120, Schneider-Electric M340) HMIs and communication systems (ProfiNet, ModbusTCP, EtherCat, OPC-UA). The depicted process includes a raw parts warehouse, a testing facility, an assembly cell with robot, a shipping robot, connected with corresponding conveyor technology. A CNC control (Siemens 840 D sl) for a (simulated) prefabrication completes the process. By integrating the plant into visualization systems, MES, ERP and simulation tools, the physical plant is mapped virtually throughout and thus represents a cyber-physical production system [2].

For the students, the contents of the learning factory are used in the courses of study Fundamentals of Automation, Specialization in Automation, Industrial Management (Bachelor) and IT Systems in Production and Automation (Master). Since the dual students are already working in projects at the regional SMEs, the knowledge acquired in this way is transferred directly to the regional companies. In addition to the practice-oriented use in the named lectures, the partner companies in the entrepreneur network "The Key Region" are offered the possibility of further training in the areas of automation technology, industrial communication technology and energy efficiency in the learning factory.

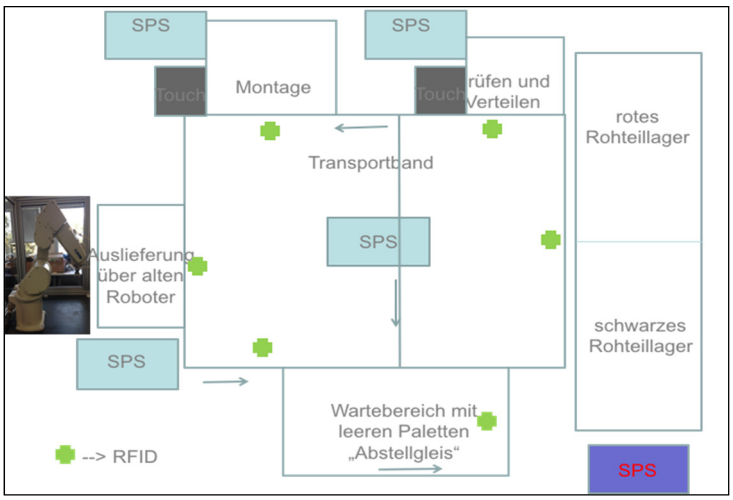


Figure 1: Structure of the CVH Learning Factory

The plant described above has a modular structure. There is no hierarchical communication but a flat architecture in which the individual plant components communicate with each other via OPC-UA and exchange the required information. Since many of the PLCs only have an OPC server, the data is orchestrated by a Node-Red application [3].

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Only the safety architecture is still centralized. The information from the individual stations and safety devices is combined and evaluated in a programmable safety relay. In the event that the safe state must be assumed, the corresponding outputs are set by the relay and drives are switched off or pneumatic actuators are depressurized. This architectural principle contradicts the decentralized approach of non-safe automation systems since there is no flexibility with respect to the safe state of the plant [4]. No matter in which area the emergency stop occurs, the consequence is always the same. In order to be able to make a more individual fault assessment here, a decentralized concept was developed in which an individual safety assessment and thus individual shutdowns are possible.

3 Risk assessment of the installation

The safety of a machine cannot be designed arbitrarily, but a designer is obliged to deal with the defined machine guideline and to design the system on the basis of the guideline. The aim of the Machinery Directive is to minimize the risk to people and the immediate environment by means of measures and constructive technical equipment. The protection of people and the environment is to be standardized to the same extent in all countries by means of international common guidelines. At the same time, distortion of competition due to differing safety requirements in the machinery trade is to be avoided. The new revised Machinery Directive 2006/42/EC, the first version of which was issued in 1989, came into force in 2009 [5].

The dangerous situations in different active life phases of the plant would be summarized as:

- Risk of impact due to uncontrolled movements of the bearing system
- Crushing of limbs by pneumatically driven machine parts
- Gripping robots can perform unpredictable movements due to incorrectly entered coordinates and thus endanger their environment.
- Moving merchandise supports or the belt itself can pinch or pull in limbs, long hair, or items of clothing.

To prevent these situations, an appropriate safety system in the form of emergency stop switches, door monitoring sensor and a light barrier is required. From here on, the safety functions are implemented by means of a control system. For this reason, the DIN ISO 13849 standard is used as described in the fundamentals. The risk assessment according to DIN ISO 13849 shows that the required performance level of the safety solution for this type of hazard corresponds to the PL d classification.

After the activation of an emergency stop element, the emergency stop program is triggered. Due to the fact that all emergency stop elements are interconnected and have equal functionality, the entire system is safely shut down. The following steps would then be to completely clear the emergency situation and reset the emergency stop switches to their default settings. However, the system must not be immediately integrated into normal operation. An integration that is not carried out consciously can lead to dangerous situations. An example of this is the light barrier. If the light barrier is triggered and the line of sight between the transmitter and receiver is re-established, the system must not be reintegrated into normal operation immediately afterwards. It is not clear whether the emergency situation has been completely eliminated. The light barrier is not able to determine in which direction the person has left the light beam. For this reason, there may still be persons in the danger zone. For this reason, every emergency stop that is triggered must be acknowledged by pressing a release button after the fault has been rectified, whereupon the system can be resumed in normal operation. The risk assessment according to DIN ISO 13849 shows that the required performance level of the safety solution for this type of hazard corresponds to the PLr a classification. The low classification is justified as follows. Even if an acknowledgement button sticks or fails completely, the system cannot be started. A

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

short positive edge is necessary for an acknowledgement; if the signal is positive for more than one second, no acknowledgement process is started. Without an acknowledgement option, the system can be accidentally reset to normal operation after resetting the emergency stop switch and thus harm persons who may still be in the danger zone.

4 Conception and realization

The goal is to convert the entire plant to the new decentralized safety solution. It must be designed in such a way that a single emergency stop safely shuts down and switches off all hazardous components of the plant.

IP67 IO modules from Turck are used as safety components. As decentralized intelligence, these enable the implementation of a safety application for the respective station of the plant. Via the ProfiNet interface, they allow communication with a higher-level controller, which should be safety-oriented (Siemens F-CPU). By means of the superordinate control it is possible to send safety-related messages to the other decentralized intelligences, so that these, if necessary for the occurred state, the respective local safe state can be assumed. In the future, it is planned to be able to do without the higher-level controller for cross-communication between the decentralized intelligences. Currently you need the following elements for the realized application:

- Hardware
  - Turck safety module TBPN-1L-FDIO-2IOL
  - Emergency stop switch
  - Acknowledge button
  - SIMATIC ET200SP with F-CPU 1512SP F-1PN

- Software
  - Turck Service Tool V3.2.2
  - Turck Safety Configurator V3.2.2.3
  - Siemens TIA Portal V16 + license for the F-modules

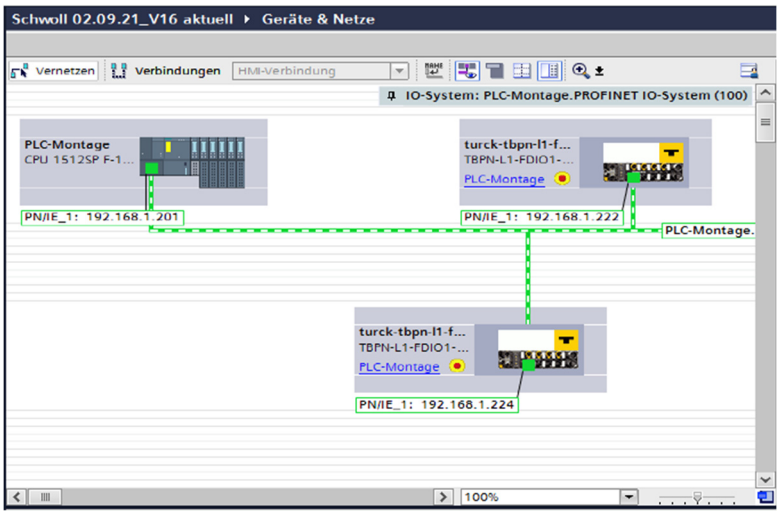


Figure 2: SIEMENS TIA Portal with higher-level and decentralized controls

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

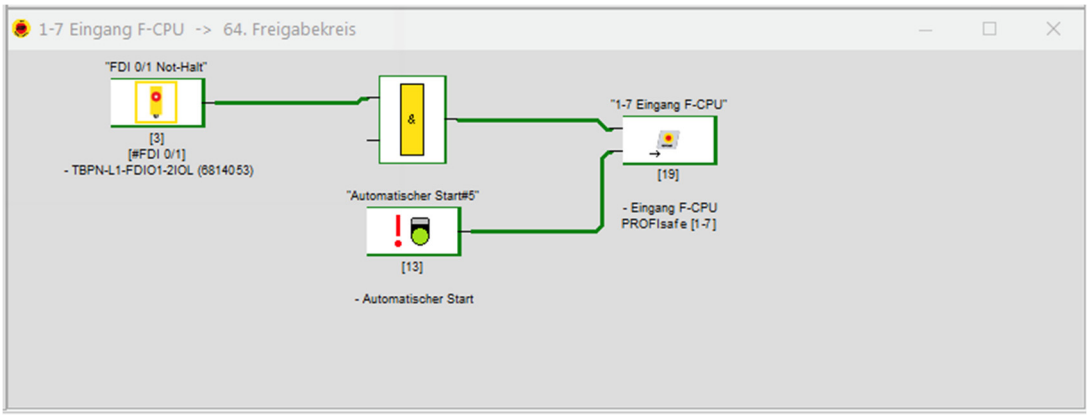


Figure 3: Decentralized application in the TURCK system

The F-CPU and the I/O modules are connected to each other via the central Ethernet switch of the system. For the recognition of the I/O modules in the network, each module requires its own IP address. This address can be identified and, if necessary, reassigned using the "Service Tool V 3.2.2" software developed by Turck. The safety program of the I/O modules is created using "Turck Safety Configurator V3.2.2.3" and transferred to the modules. During the initial setup of an I/O module, the Turck software first creates a standard configuration of the inputs and outputs. This configuration is then adapted to the situation and requirements. The aim of the initial setup is to control the defined safe outputs of all I/O modules via a safe input of an I/O module and to switch them on and off safely. For the linking of two I/O modules, it is still necessary to implement this via a higher-level controller. The Siemens TIA Portal has the possibility to connect the I/O modules from Turck with the F-CPU. For the integration, the TIA Portal requires a GSDML file of the Turck modules. This file contains all the relevant information required for the configuration and signal transmission of the devices. After this GSDML file has been entered in the TIA Portal, the I/O modules are available in the selection and can be integrated into the F-CPU.

Figure 4 shows a program flow chart for controlling the I/O module outputs. This program flow chart only roughly describes the overview of the structure. This structure can be applied to one, two or all I/O modules in the system. If the system is started up and the system is ready to start, the reintegration of all I/O modules must first be carried out. This condition ensures a monitored start. This is done via an input bit of any I/O module in the system, which must be set briefly by a pushbutton. This in turn activates an output bit of the F-CPU for all I/O modules. A monitoring module in the Turck configuration therefore enables the outputs and normal operation is now active. Normal operation can be disturbed by three different causes. One is a faulty emergency stop switch. This can be triggered, for example, by a defective NC contact, line break or cross-circuit of the adjacent contacts. On the other hand, by an error in the communication between the I/O modules and the F-CPU.

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

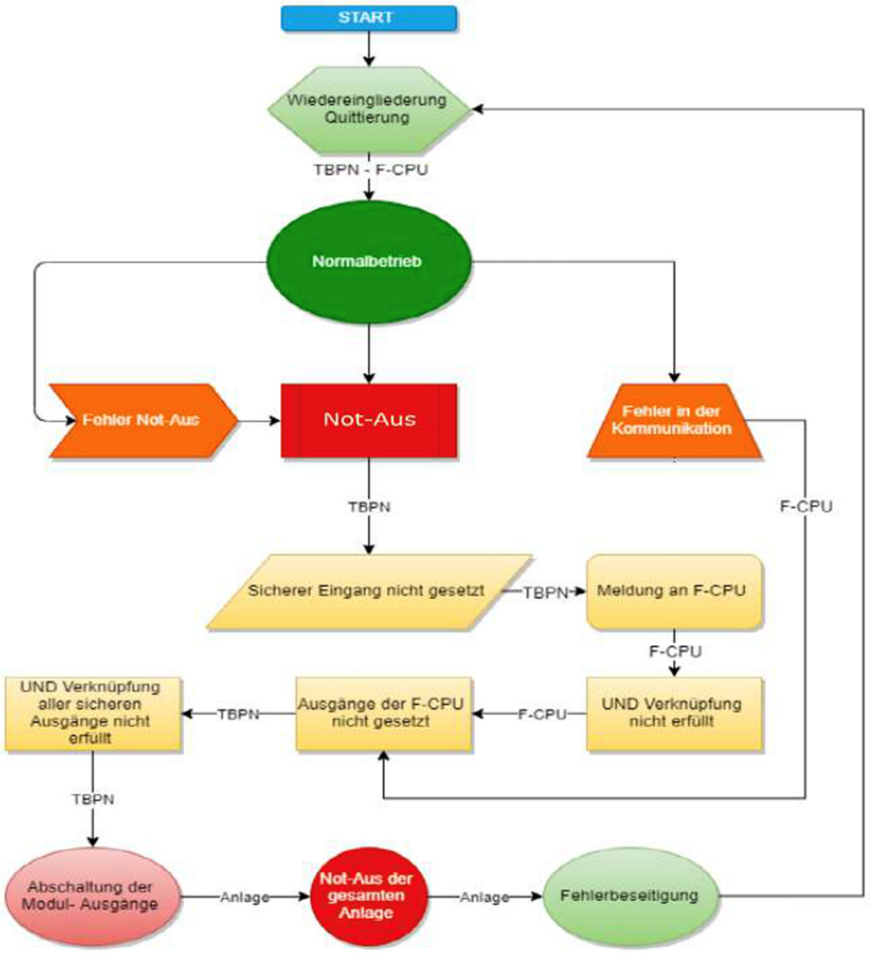


Figure 4: Structure of the safety application

This can be caused, for example, by a break in the Ethernet line, faulty communication protocols, exceeding the monitoring time or a power failure of the individual I/O modules.

As a rule, however, normal operation is interrupted by an emergency stop switch. If an emergency stop is actuated, a normally closed contact opens. The I/O module registers an input that is not set and immediately reports the new status to the F-CPU via ProfiNet. In the F-CPU, a simple program is written, which controls all input signals of the I/O modules that are linked with an AND function block. If all emergency stop switches are deactivated, the AND operation is fulfilled, and the bits of the F-CPU outputs are set. Otherwise, one or more bits are set to 0, depending on how many emergency stop elements have been activated. In case of the latter, it results in the AND operation not being satisfied, and the F-CPU outputs being disabled. Consequently, the linkage of the internally written program of the I/O modules is not fulfilled. The logic operation consists of the output bit of the F-CPU and the input signal of the connected emergency stop switch. The result is the shutdown of all module outputs and thus all connected actuators whose F-CPU bit has not been set. After the cause has been located and eliminated, the outputs of the I/O modules can be acknowledged, and the actuators reintegrated. The local architecture for the bearing station is shown in Figure 5.

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

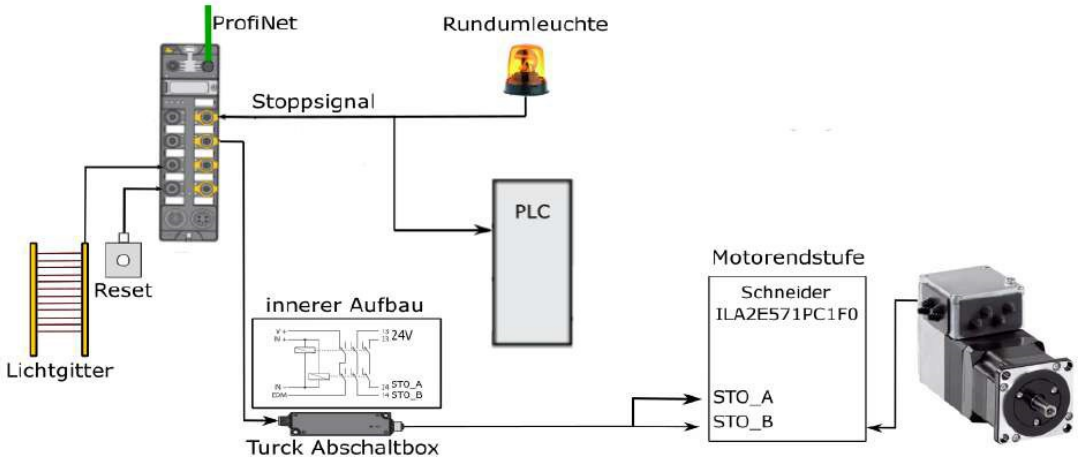


Figure 5: Decentralized safety architecture

5 Validation

The SISTEMA Safety of Machine Controls software wizard provides assistance in validating and evaluating the safety of control systems within the scope of DIN EN ISO 13849-1. The tool extracts safety-related characteristic values of the control parts from the manufacturer's VDMA files on the basis of the standard certification and calculates reliability values at various levels of detail, including the performance level (PL) achieved. The created sub-system is compiled, and the entire parameterization of the complete system is displayed. The result can then be printed out as a report for documentation.

The aim is to safely shut down the entire system after activation of any emergency stop element. For this reason, all emergency stop elements are combined into one sub-system. However, a total of two sub-systems are required. The first sub-system is responsible for the emergency stop of the entire system. This consists of a total of seven system components:

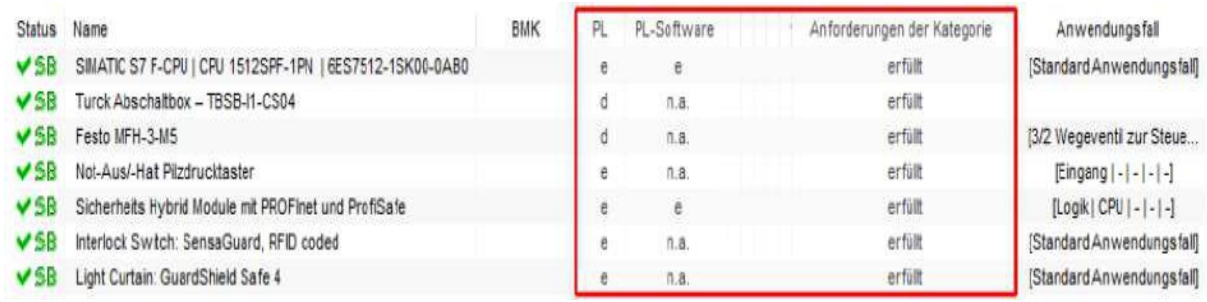
- SPS SIMATIC S7 F-CPU
- Turck safety hybrid modules
- Door monitoring Interlock Switch: SensaGuard
- Light Curtain: GuardShield Safe 4
- 2 channel emergency stop/stop push button latching
- Turck switch-off box - TBSB-I1-CS04
- MFH-3-M5 Pressure valve

As can be seen from the chapter on risk assessment, the required performance level for the emergency stop system has been assigned to level d. The achieved performance level must at least correspond to this level. The performance level achieved must at least correspond to this level. After entering all system components for the emergency stop in the Sistema tool, a positive result is obtained, which is satisfactory for the required level d. All components meet PL level d, i.e., the required performance level for the emergency stop system. All components meet PL level d, the second highest safety level. These components for the safe emergency stop can therefore be used without any loss of safety.

The second subsystem is necessary for acknowledging the system for reintegration after a restart or an emergency stop situation. It essentially consists of three components. On the one hand the acknowledgement button itself and on the other hand the ProfiSafe truck safety module. For the networking of all Turck modules the SIMATIC S7 F-CPU is required. If the three components are entered into the

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

SISTEMA Assistant and considered as a single sub-system, the result is satisfactory. All components meet at least the required level PL a. For this reason, the system can be used in this form without hesitation.



Status	Name	BMK	PL	PL-Software	Anforderungen der Kategorie	Anwendungsfall
✔SB	SIMATIC S7 F-CPU | CPU 1512SPF-1PN | 6ES7512-1SK00-0AB0		e	e	erfüllt	[Standard Anwendungsfall]
✔SB	Turck Abschaltbox – TBSB-I1-CS04		d	n.a.	erfüllt	
✔SB	Festo MFH-3-M5		d	n.a.	erfüllt	[3/2 Wegeventil zur Steue...
✔SB	Not-Aus/-Hat Pilzdrucktaster		e	n.a.	erfüllt	[Eingang | - | - | - | -]
✔SB	Sicherheits Hybrid Module mit PROFInet und ProfiSafe		e	e	erfüllt	[Logik | CPU | - | - | -]
✔SB	Interlock Switch: SensaGuard, RFID coded		e	n.a.	erfüllt	[Standard Anwendungsfall]
✔SB	Light Curtain: GuardShield Safe 4		e	n.a.	erfüllt	[Standard Anwendungsfall]

Figure 6: Validation with SISTEMA software

6 Conclusion

The goals defined in the task, to develop a safe modular safety solution and to integrate it into the existing laboratory facility of the university, were achieved. The facility now has a modern decentralized emergency stop system. With regard to the risk analysis carried out and the subsequent evaluation performed with the aid of the SISTEMA software, the emergency stop system achieves the PL d classification, which corresponds to the second highest classification according to EN ISO 13849. Due to decentralization, the amount of wiring required has been reduced many times over. In addition, the wiring structure has become clearer, making it easier to locate and eliminate faults and to adapt the system to new requirements. The safety application can now be further modularized in a targeted manner, so that shutdowns in the event of a critical state are minimized. This increases the overall availability of the system.

7 Literature

[1] Faller, C., Feldmüller, D.: Industry 4.0 Learning factories for regional SMEs; Procedia CIRP; Volume 32, Pages 88-92 (2015), 5th Conference on Learning Factories, Edited by Dieter Kreimeier, ISSN: 2212-8271

[2] Bildstein, A.; Seidelmann, J.: Industrie 4.0-Readiness: Migration zur Industrie 4.0-Fertigung, in: Bauernhansl, T; ten Hompel, M; Vogel-Heuer, B.(Eds.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Springer Vieweg, Wiesbaden 2014, ISBN: 978-3658046811

[3] Faller, C.; et. al.: Control-System-Algorithm implemented with NodeRed and OPC-UA, 14th International Conference of Accomplishments in Mechanical ands Industrial Engineering, Mai 2019, Banja-Luka, Bosnien und Herzegowina (Tagungsband), ISBN 978-99938-39-84-2

[4] Sergej Japs, Harald Anacker, Roman Dumitrescu: SAVE: Security & safety by model-based systems engineering on the example of automotive industry, Procedia CIRP, Volume 100, 2021, Pages 187-192, ISSN 2212-8271, https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.053.

[5] Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Produktsicherheitsgesetz, 9. ProdSV (Maschinenverordnung) Interpretationspapier zum Thema "Wesentliche Veränderung von Maschinen" (Bek. des BMAS vom 09.04.2015 – IIIb5-39607-3 – im GMBl 2015, Nr. 10, S. 183-186)

Open Access. © 2022 C. Faller , A. Schwoll 1
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.–11.03.2022

Salzburg Smart Factory Bootcamp

S. Kranzer[1], O. Saßnick[1], D. Hofer[1], S. Hoher[1], M. Schirl[1], D. Prill[1]

Zusammenfassung

Wissen über Digitalisierung, Automatisierung und über „smarte“ Technologien sind Schlüssel für einen stabilen und nachhaltigen Erfolg von Klein- und Mittelunternehmen in der Region Salzburg. Die Fachhochschule Salzburg beantragte aus diesem Grund die Initiative Salzburg Smart Factory Bootcamp. Moderne und mobile Industrierobotik, kommunikative Software-Architekturen und OT-Sicherheit bilden die Basis für die Umsetzung aktueller Smart-Factory-Technologien und deren Potentiale in Unternehmen. Ziel des Bootcamps ist die gezielte Weiterqualifizierung mit modernsten Smart-Factory-Technologien von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der beteiligten Unternehmen. Zusätzlich kann langfristig, auch über die beantragte Projektlaufzeit hinaus, die Zusammenarbeit zwischen Hochschule und Salzburger Unternehmen etabliert und weitergeführt werden.

Stichwörter

Bootcamp, Smart Factory, KMU, Industrie 4.0, Weiterbildungsangebot

1 Einleitung

Digitalisierung verändert die Welt. In nahezu allen Lebensbereichen unterstützen smarte Maschinen bzw. intelligente Systeme den Menschen und sorgen für mehr Effizienz. Diese Entwicklung ergibt aber immer mehr Anforderungen an die Ausbildung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, sowohl in der Produktion selbst als auch in der Anwendung moderner Produkte.

2 Digital Pro Bootcamps der FFG

In Österreich sind, wie im Rest von Europa, eine hohe Anzahl der Unternehmen dem Bereich der Klein- und Mittelunternehmen zuzuordnen. Es ist im Interesse dieser Firmen wettbewerbsfähig zu bleiben, wobei die digitale Transformation als Werkzeug gesehen wird, mit dem eine langfristige Effizienzsteigerung für bestehende Prozesse und neue Innovationen erzielt werden können. Über Weiterbildungsmaßnahmen kann gezielt Wissen zur digitalen Transformation vermittelt werden. Die bestehenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bekommen von außen Impulse und übernehmen im Unternehmen neue Verantwortung. Diese Form von Weiterqualifizierung fördert die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) in Form der Ausschreibung der Digital Pro Bootcamps.

Möglich ist die Förderung für ein Konsortium, bestehend aus mindestens einer Hochschule und mindestens fünf Unternehmen als Partner. Der Fokus liegt auf kleineren und mittleren Unternehmen (KMU), mindestens drei der Partner müssen den KMU-Status haben. Die Rolle der Hochschule ist der Wissenstransfer, während die Firmenpartner ausgewählte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für den Zeitraum zur Verfügung stellen. Der Zeitraum der Schulung entspricht 150 h Schulungszeit und ist auf maximal drei Monate beschränkt. Es existiert ein Rahmenprogramm mit Veranstaltungen und Übungen zu bestimmten Themenbereichen der Digitalisierung. Darüber hinaus ergänzt ein Praxisprojekt,

[1] Fachhochschule Salzburg, Informationstechnik & System-Management

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

das die Teilnehmerinnen und Teilnehmer eines jeden Unternehmens eng mit der Unternehmensführung abstimmen, das Angebot des Bootcamps. Ziel ist es, die Erkenntnisse aus dem Rahmenprogramm direkt in die Praxis zu übertragen und so in den Unternehmen frühzeitig die Möglichkeit zur Umsetzung und Erprobung der Inhalte zu geben.

3 Übersicht zum Salzburg Smart Factory Bootcamp

Die Fachhochschule Salzburg engagiert sich bereits seit vielen Jahren neben der Lehre und Forschung auch im Rahmen des Transfers von Wissen in die Wirtschaft. Ziel ist es, mit dem Smart Factory Bootcamp Salzburger KMUs die Möglichkeit zu eröffnen, bereits bestehende Fachkräfte hinsichtlich unterschiedlicher Themen zur Digitalisierung, bspw. am Weg der klassischen Produktion zur Smart Factory, weiterzubilden. Das durchgeführte Smart Factory Bootcamp unterscheidet sich signifikant von bestehenden Angeboten. Bisherige erfolgreiche Angebote, etwa aus Qualifizierungsnetzwerken oder von anderen Bildungsanbietern, wandten sich an eine breite Masse von Teilnehmerinnen und Teilnehmern mit verschiedensten Bedürfnissen. Das Smart Factory Bootcamp hingegen stellt ein maßgeschneidertes Rahmenprogramm dar, das alle notwendigen Smart Factory Themen in einem einzigen Bildungsangebot konzentriert. Sowohl Ablauf, Zusammenstellung und Charakter des Bootcamps wurden in der Form zuvor noch nicht angeboten.

Die konkreten Ziele des Bootcamps sind (1) die Steigerung des Bewusstseins bzgl. Anwendbarkeit und Möglichkeiten von Smart-Factory-Technologien unter den Teilnehmerinnen und Teilnehmern, (2) Aufbau und Vertiefung von Wissen in den oben genannten Bereichen sowie Etablierung von Multiplikatorinnen und Multiplikatoren in den Unternehmen, (3) die Intensivierung des Wissenstransfers zwischen der Hochschule und den Unternehmen, in beide Richtungen gleichermaßen, (4) die Unterstützung von Unternehmen im systematischen Aufbau und der Höherqualifizierung des vorhandenen Personals und (5) Entwicklung von Angeboten zur Weiterqualifizierung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Bereich Smart Factories und Smart Production.

3.1 Partner und Praxisprojekte

Am Bootcamp haben folgende österreichische Unternehmen teilgenommen: Die Ing. Punzenberger COPA-DATA GmbH, ein Softwarehersteller (Simulation und Visualisierung einer Multi-Roboter Fertigungsstraße Robotik), die Lichtgenossenschaft Neukirchen eGen, ein Energielieferant (Automatisierung der Spülwasserzufuhr für ein Wasserkraftwerk), die Nutropia Pharma GmbH, ein Hersteller von Nahrungsergänzungsmitteln (Automatisierte Erfassung und Auswertung von Parametern der Produktionsumgebung), SIGMATEK GmbH & Co KG, ein Hersteller von Automatisierungslösungen (Schulungskonzept für einen Mehrachs-Linearroboter - Robotik), StM waterjet GmbH, ein Hersteller von Wasserschneideanlagen (Kundenportal und Wartungsplanung für Wasserstrahlschneidmaschinen) und die SW Automatisierung GmbH & Co KG, ein Schaltschrankbauer und Hersteller von Drahtkonfektioniermaschine (IoT-Konzept für eine Drahtkonfektioniermaschine). Es handelte sich zum Zeitpunkt der Antragstellung um ein Großunternehmen, vier mittlere Unternehmen sowie ein kleines Unternehmen.

4 Rahmenprogramm

Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht zum entwickelten Rahmenprogramm für das Smart Factory Bootcamp, erläutert dieses, die Themenauswahl und die Zuordnung nach dem Digcomp 2.2 AT Modell.

4.1 Auswahl der Themen

Die im Bootcamp angebotenen Bereiche, Datenstrategien, Data-Science, Robotik und OT-Security ergeben sich einerseits aus den Kompetenzen an der Hochschule und in der Forschungsgruppe der Autoren

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

und andererseits aus einer Analyse der Transfergesellschaft des Landes Salzburg. Es wurden gezielt Unternehmen angesprochen und bezüglich aktueller Herausforderungen in den von der Hochschule abgedeckten Themenfeldern befragt. Digitalisierung wird gerade in produzierenden Unternehmen immer wichtiger, speziell KMU können aber oft nicht alle Bereiche des Internet der Dinge oder der Industrie 4.0 intern abdecken. Eine Weiterqualifizierung von Personal und Zusammenarbeit sind der Schlüssel zur Weiterentwicklung. Da die Erfassung und der Umgang mit Daten, der Einsatz von Automatisierungstechnik und Robotik, sowie die Sicherheit (Security) von Produktion und Produkt im Fokus der Weiterentwicklung der beteiligten Unternehmen steht, ergaben sich die im nächsten Abschnitt erläuterten Inhalte für das Bootcamp.

4.2 Zuordnung nach dem Digcomp-Modell

Das Digcomp 2.2 AT Modell [10] hat zum Ziel, individuelle Kompetenzen sowie Inhalte von Bildungsangeboten im Bereich Digitalisierung mit einem einheitlichen System zu beschreiben. Für das Smart Factory Bootcamp sind die Kompetenzbereiche und Kompetenzstufen in Abbildung 1 zusammengefasst. In der Grafik werden die Inhalte des Smart Factory Bootcamp zunächst allgemein den Themen Robotik, Data-Science, Security, Design-Thinking & Business-Strategie sowie Ethik zugeordnet.

Bildlich gesprochen, bilden die in Abbildung 1 dargestellten fünf Bereiche einzelne Säulen, mit dem Ziel gemeinsam das begleitende Praxisprojekt zu tragen. Feiner detailliert können die Bereiche weiter in einzelne Kurse untergliedert werden, die jeweils aufeinander aufbauen und entsprechend auch in unterschiedlichen Abschnitten des Bootcamps stattfinden. Zuunterst stehen notwendige Grundlagen, auf die mit vertiefenden, stärker anwendungsbezogenen Veranstaltungen aufgebaut werden. Die Themenschwerpunkte Grundlagen zu Industrie 4.0 sowie Datenstrategie und Datenkonzept sind den Bereichen Security und Data-Science zugeordnet, da sie Grundlagenwissen sowohl für die OT-Security (netzwerk-technische Aspekte) als auch Data Science (Verständnis zu Datenquellen) vermitteln.

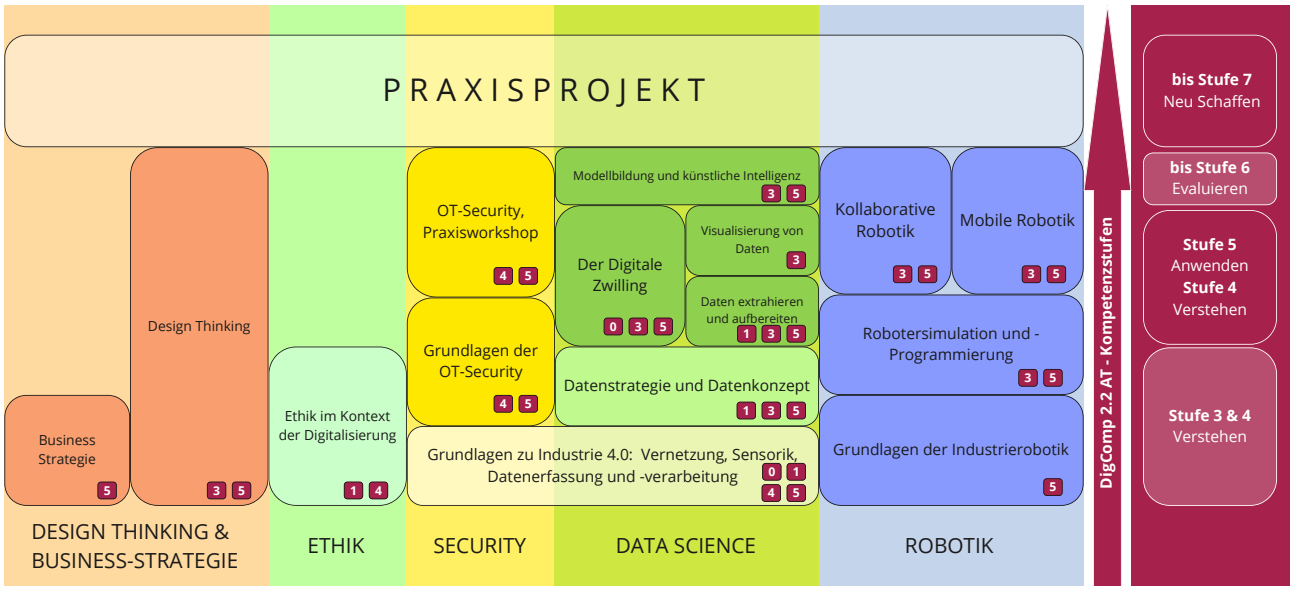


Bild 1: Inhalte angeordnet nach Digcomp 2.2 AT

In Abbildung 1 sind nebenstehend zu den einzelnen Veranstaltungen passend die Kompetenzstufen nach Digcomp 2.2 AT eingezeichnet. Für die Grundlagen steht zunächst das Verstehen im Vordergrund. Soweit möglich, werden Stufe 3 und 4 jedoch auch durch Stufe 5, dem Anwenden, ergänzt, um den Lernprozess weiter zu unterstützen. Für die weiter fortgeschrittenen vertiefenden Veranstaltungsinhalte kommt Stufe 6 hinzu: Es gilt unterschiedliche Lösungswege zu erfassen, zu vergleichen und abschließend zu bewerten. Für das Praxisprojekt folgt Stufe 7: mithilfe des erlangten Wissens werden neue Wege und Lösungen erarbeitet, oder auch bestehende Teillösungen identifiziert, verknüpft und

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

ergänzt. Die entsprechenden Kompetenzbereiche sind für jeden der Kurse in Abbildung 1 mit einer Ziffer vermerkt. Besonders häufig scheint der Kompetenzbereich 5 - Problemlösen und Weiterlernen - auf. Grund hierfür ist, dass allgemein für die Kursinhalte das anwendungsbezogene Lösen technischer Probleme im Vordergrund steht. Für Ethik und die Digitalisierung sowie OT-Security ist weiters der Kompetenzbereich 4 – Sicherheit relevant. Während jedoch bei der OT-Security der Fokus auf der Kompetenz 4.1 Geräte schützen liegt, betrachtet die Ethik den Schutz von personenbezogenen Daten, der Umwelt und der individuellen Gesundheit (Kompetenzbereiche 4.2, 4.3 und 4.5). Einen weiterer Schwerpunkt bildet der Kompetenzbereich 3 - Kreation digitaler Inhalte, insbesondere bei den Themen Robotik und Data-Science. Dabei rückt besonders Kompetenz 3.4 - Programmieren und Abläufe automatisieren in den Mittelpunkt. In der Robotik werden mithilfe des Programmierens Abläufe automatisiert. Im Bereich Data-Science werden Auswertungen programmiert, einfachen Datenanalysen erstellt und weiterführend die Konzepte zur Erstellung eigener komplexer Vorhersagemodelle vermittelt.

4.3 Übersicht zu den Inhalten

In den folgenden Abschnitten werden die im Bootcamp vermittelten und in den Projekten begleiteten Inhalte erläutert.

4.3.1 Grundlagen zu Industrie 4.0

Zu Beginn der Workshopserie war es notwendig Verständnis zu grundlegenden Begriffen zu erreichen und beispielhafte Anwendungen von Methoden und Technologien zu vermitteln. Ziel war es den Buzzword-Dschungel aufzulichten und unter den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ein gemeinsames Begriffe-System zu schaffen. Im Bereich Smart Factory Technologien standen in der Einführungsphase industrielle Protokolle und Architekturen im Mittelpunkt. Es wurden die Grundlagen für die Vernetzung von Anlagen und für die Erfassung von Daten aus Sensoren und die grundlegenden Möglichkeiten, die sich durch die Auswertung von Daten ergeben, besprochen. Zusätzlich wurden die Einschränkungen des aktuellen Standes der Technik erörtert.

4.3.2 Datenkonzept und Datenstrategie

Eine gute Strategie bildet die Grundlage nahezu aller erfolgreicher Unternehmungen. Auch in der Beschäftigung mit Technologie und Digitalisierung ist ein strategisches Vorgehen von Vorteil. Im Rahmen der Beiträge zu Datenkonzept und Datenstrategie wurde gemeinsam mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmern über diese Notwendigkeit diskutiert. In einem Workshop und mehreren weiteren Feedbackterminen wurde für die einzelnen Praxisprojekte sowohl Datenkonzept als auch Datenstrategie erarbeitet. Gemeinsam wurden neue Geschäftsfelder, die sich potentiell daraus ergeben, definiert und diskutiert. Gemeinsam mit externen Experten aus der Industrie wurden die resultierenden Datenstrategien nochmals evaluiert und verfeinert.

4.3.3 Design-Thinking und Business-Strategie

Das primäre Ziel der Design-Thinking Einheiten war das Hinterfragen des von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern eingebrachten Exposés. Das didaktische Konzept wurde mit der „Triarchic Theory of Intelligence“ von Sternberg erarbeitet [1]. Es wurden dahingehend folgende Bereiche in den Fokus gesetzt: das Erlernen von neuen Konzepten und das Generieren von kreativen und innovativen Ideen sowie deren Exekution. Als zusätzliche Komponente wurde die Sokratische Methode eingebunden. Diese sollte vor allem Teilnehmerinnen und Teilnehmer dazu motivieren Fragen zu stellen, Feedback zu geben und durch Reflexion deren erarbeitete Konzepte inkrementell zu verbessern [2].

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Gewählte Aktivitäten wurden aus den Büchern von Strategyzer [5] [6] und den Gebrüdern Kelley [3] entnommen. Dies inkludiert das Erarbeiten des Value Proposition & Business Model Canvas, Hypothesenerstellung und die Präsentationsform des Elevator Pitch. Eine spezielle Position nehmen die Stokes ein. Diese können als eine Art Aktivierungsübung betrachtet werden, die eine Übergangsfunktion haben. Das Ziel der Stokes war es, die Teilnehmerinnen und Teilnehmer in einen speziellen Mindset zu bringen, der für die darauffolgenden Aktivitäten wichtig ist.

4.3.4 Data-Science

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer wurden an die Herausforderungen und Besonderheiten beim Arbeiten mit größeren Datensätzen herangeführt. Mit Hilfe einfacher deskriptiver Statistik und Visualisierungen, welche direkt an das Vorwissen der Teilnehmer anknüpfen, wurden verschiedene Datensätze unter Anleitung mit Eigenleistung analysiert. Die gewählte Herangehensweise an die Aufgabenstellungen folgt dabei dem CRISP-DM Modell [7]. Gemeinsam mit den Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Workshops wurde also mit der Phase des Business Understandings begonnen, im Anschluss wurde die Phase des Data Understandings gemeinsam erarbeitet. Dabei wurden auf die besonderen Herausforderungen dieser Phase, das Sammeln, Beschreiben und Verstehen großer Datenmengen, das Feststellen der Datenqualität und das Evaluieren der gesetzten Projektziele auf Basis der vorhandenen Daten, eingegangen. Spezielles Augenmerk wurde auch auf das Visualisieren der Daten gelegt, um den Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Wichtigkeit der Datenanalyse anhand adäquater Darstellungen zu vermitteln. Im nächsten Schritt wurde vorgezeigt, welche Herausforderungen im Rahmen der Data Preparation zu meistern sind. Hierbei wurden mathematische Verfahren vorgestellt, die zur Formatierung, Bereinigung und Skalierung der Daten verwendet werden können. Darüber hinaus erarbeiteten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer unter Anleitung eigene Ideen zur Auswahl beschreibender Merkmale der Daten, gestützt durch statistische Methoden wie die Kreuzkorrelation. Bei der Erstellung eigener Modelle konzentrierten sich die Vortragenden auf Modelle aus dem Bereich des überwachten Lernens. Zuerst legte eine Theorieeinheit zu den Konzepten des statistischen Modellierens, des Trainierens solcher Modelle sowie der Evaluierung dieser, den Grundstein für die nachfolgenden Praxiseinheiten. In denen entwickelten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer ihre eigenen Modelle. Hierbei handelte es sich um einfache neuronale Netze, unter Anleitung von den Vortragenden.

4.3.5 Ethik im Kontext der Digitalisierung

Einen weiteren wichtigen Aspekt bei der Beschäftigung mit Technologie und Digitalisierung stellen ethische Fragestellungen, die durch oder mit dem Einsatz von Maschinen und Software bedingt sind, dar. Im Bootcamp wurden daher auch Themen wie Maschinenethik und Interaktion von Menschen und Maschinen diskutiert. Standen zwar die technischen Inhalte klar im Vordergrund wurden dennoch ethische Fragen in einem Workshop und im Rahmen der Projekte besprochen.

4.3.6 Robotik

Der Themenschwerpunkt Robotik wurde im Bootcamp in die Teile Industrie-Robotik und mobile Robotik geteilt.

Industrie-Robotik
In diesen Workshops wurden die Grundlagen der Industrierobotik und der Simulationstechnik (digitaler Zwilling in der Produktentwicklung) vermittelt. Dabei wurden die gängigen Roboterkinematiken der klassische Industrieroboter besprochen. Dazu wurden die notwendigen Begrifflichkeiten der Teleoperatoren, der Einlegegeräte und der Industrieroboter gemeinsam erarbeitet. Darauf aufbauend wurden die gängigen Roboterkinematiken anhand (geometrischer und normgerechter) Skizzen erläutert, kategorisiert und es wurden Vor- und Nachteile erörtert. Danach wurde die Beschreibung der

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Roboterstellung vermittelt. Zunächst wurden dazu die gängigen Konzepte der Eulerwinkel, Rotationsachse und -Winkel und Quaternionen eingeführt und auf die homogene Transformation erweitert. Zuletzt wurde die DH-Konvention für Industrieroboter für serielle Roboterkinematiken erklärt. Im Robotiklabor wurden die vermittelten Konzepte in reale Anwendung gebracht und in Simulationen wurden den Teilnehmerinnen und Teilnehmern ermöglicht eigene Robotikanwendungen zu entwickeln und zu testen. Praxisprojekten mit Robotikanteil wurden über die gesamte Dauer des Bootcamps begleitet.

Mobile kollaborative Robotik
In den Beiträgen zur mobilen Robotik wurde ein Fokus auf „Triarchic Theory of Intelligence“ von Sternberg gesetzt [1]. Gewählte Aktivitäten inkludieren das Erlernen des Robot Operating System [8], sowie theoretische Konzepte von Human Robot Interaktion mit einem Fokus auf Mobile Manipulatoren. Die unterschiedlichen Themen wurden als finale Aufgabe, in einer Posterkonferenz für innovative Roboterapplikationen vereint. Das Robot Operating System (ROS2) wurde als erster Meilenstein definiert, um den Teilenehmerinnen und Teilnehmern eine herstellerunabhängige Erfahrung, im Bereich der Roboterprogrammierung zu gewähren. Der zweite Meilenstein fokussierte sich auf das Erlernen von Themen der Mobilen Manipulatoren. ROS (Robot Operating System) bzw. Tools und open source Implementierung von verschiedenen Robotern und Algorithmen wurden als unterstützende Maßnahmen verwendet. Besprochene Themengebiete inkludieren das Erstellen von Karten, Lokalisierung, Pfadplanung und SLAM. Der finale Themenkomplex - Human Robot Interaction - wurde inkludiert, um der Wichtigkeit von Mensch-Maschinen Kommunikation Raum zu bieten. Vor allem mobile Roboter/Manipulatoren im Kontext der Industrie müssen in der Lage sein, Befehle entgegenzunehmen, sowie auch Informationen an Benutzerinnen und Benutzer weitergeben zu können [4]. Zuletzt sollten die Teilenehmerinnen und Teilnehmer pro Projekt den System Usability Scale (SUS) [9] Fragebogen ausfüllen . Die grundlegende Idee war, dass sowohl verbales Feedback (qualitativ) in Form von Fragen und Kommentaren gegeben wird, sowie auch quantitatives, in Form eines standardisierten Fragebogens.

4.3.7 OT-Security

Die Sicherheit von Industrieanlagen und von IoT-Geräten sowie die Sicherheit (Security) von deren Betriebe ergeben neue Herausforderungen. Aus abgeschlossenen Netzen wurden durch das Internet der Dinge und die Industrie 4.0 hochvernetzte IP-Netze mit Kommunikation zu vielen Beteiligten. Nicht nur Betreiber, sondern auch Betreuer und Hersteller sowie Kundinnen und Kunden interagieren mit den Geräten und Anlagen. Security muss dabei „by Design“ mitgedacht werden oder später mühsam sichergestellt werden. Darum war es den Autoren besonders wichtig im Zuge des Bootcamp Bewusstsein für diese Herausforderung und Anforderung zu schaffen. Für die Praxisprojekte wurde daher eine Risikoanalyse durchgeführt. Dabei wurden folgende Fragen beantwortet: (1) Was soll geschützt werden? (2) Wogegen soll es geschützt werden? Ziel dieser Analyse ist es, die wichtigsten Gefahren zu erkennen und zu bewerten, wobei die Risikoanalyse spezifisch für ein Unternehmen, eine Produktionsumgebung, ein System, eine Anlage oder eine Maschine durchgeführt werden soll. Da dazu auch ein Verständnis für potenzielle Angriffsvektoren, die einen unkontrollierten Fernzugriff ermöglichen, gehört, wurden aktuelle Angriffsszenarien simuliert und analysiert. Im Bootcamp wurden auch aktuelle Standards und Praxisbeispiele dargelegt. Für die Praxisprojekte wurden Sicherheitskonzepte definiert. Im Anschluss wurden in einem Workshop zum Thema OT-Security im Unternehmen auch Themen präsentiert, die über das einzelne Projekt hinaus notwendig sind, um Sicherheit zu gewährleisten. So sollten, neben den technischen Maßnahmen, Unternehmen Security-Richtlinien und -Prozesse erarbeiten und umsetzen. In diesem Zusammenhang müssen notwendige Rollen, Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten definiert werden. Zudem sollten Unternehmen regelmäßig Übungen zur Reaktion auf Vorfälle durchführen, um die organisatorische Effektivität zu testen.

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4.3.8 Praxisprojekt

Die Herangehensweise an die Praxisprojekte wurde an üblichen Ablauf für wissenschaftliche Arbeiten angelehnt. Zunächst bestand das Ziel, eine verkürzte Form eins Exposés zu formulieren. Dafür wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer bereits mit einer Vorlage versorgt, diese beinhaltete vorrangig Fragestellungen, die darauf abzielen, durch deren Beantwortung Anforderungen, Rahmen, Abhängigkeiten sowie Nicht-Ziele frühzeitig zu identifizieren. Ein weiterer Bestandteil des Exposés bildete ein Zeitplan, mit dem eine grobe Abschätzung zur Realisierung des Umfangs erfolgen sollte. Im weiteren Ablauf wurden die Praxisprojekte wiederholt gezielt in Form von Austauschrunden in das Rahmenprogramm mit integriert. Dabei stellte jeder Partner in 5-10 Minuten den Projektfortschritt anhand von Fragen vor: (1) „Was wurde letzte Woche erreicht?“, (2) „Was war gut? Was nicht?“ und (3) „Sollten wir etwas ändern?“, sowie (4) „Was möchten wir diese Woche machen?“.

5 Befragung und Methode

Ziel der Befragung war es, zu ergründen, wie effektiv das Bootcamp im Hinblick auf die Stärkung der Kompetenzen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer in Bezug auf die gewählten Themenschwerpunkte war und um zu eruieren welche Verbesserungspotentiale bestehen. Als Methodik wurden zwei zeitlich versetzte Umfragen gewählt. Die Erste kurz nach Beginn der Durchführungsphase und die Zweite nach Abschluss des Bootcamps. Die Fragestellungen bieten Antwortmöglichkeiten für jeden einzelnen Themenschwerpunkt des Bootcamps, sodass nicht lediglich über die Qualität des Bootcamps insgesamt eine Aussage getroffen werden kann, sondern gezielt betrachtet werden kann, welche der einzelnen Schwerpunkte von den Teilnehmerinnen und Teilnehmer als besonders wertvoll empfunden wurden. Die Befragung wurde in vier Teile untergliedert: (1) Wissenstransfer, (2) Anwendbarkeit, (3) Praxisprojekt und (4) Organisation des Bootcamps. In der ersten Umfrage wurden nur Fragen bezüglich des Wissenstransfers gestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Teile kurz vorgestellt: Im ersten Teil wird der Wissenstransfer betrachtet, indem die Umfrageergebnisse vor und nach dem Bootcamp verglichen werden. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer sollen dabei jeweils ihr Kompetenzlevel für die sieben gewählten Schwerpunkte des Bootcamps zuordnen. Die Skala orientiert sich dabei an dem Kompetenzstufenmodell aus [10], jedoch reduziert auf 5 Stufen: „1 - Kein Vorwissen, keine Erfahrung vorhanden“, „2 - Grundlagenwissen vorhanden“, „3 - Eigenständiges Anwenden möglich“, „4 - Viel Erfahrung, das Lösen komplexer Aufgaben möglich“, sowie „5 - Vertieftes Fachwissen vorhanden, auch das Lösen neuartiger Aufgaben ist möglich“.

Im zweiten Teil wurde die Anwendbarkeit der erworbenen Kompetenzen im beruflichen Umfeld betrachtet. Unterschieden wird zwischen der Anwendbarkeit zum aktuellen Zeitpunkt und der zu erwartenden Änderung in den nächsten 5 Jahren. Außerdem wird betrachtet, zu welchem Themenschwerpunkt sich die Teilnehmerinnen und Teilnehmer vorzugsweise zukünftig weiterbilden möchten.

Der dritte Teil ist auf das Praxisprojekt der Teilnehmerinnen und Teilnehmer fokussiert. Besonderes Interesse liegt hierbei auf den Herausforderungen bzw. Schwierigkeiten, die Teilnehmerinnen und Teilnehmer bei der Durchführung des Praxisprojektes hatten. Für eine erneute Durchführung des Bootcamps sollen die hierdurch gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um eine bessere Unterstützung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sicherzustellen. Hierzu konnte die folgende Liste von Aufgabenstellungen / Herausforderungen, jeweils auf einer Skala von 1 - vernachlässigbar, bis 5 - sehr stark herausfordernd, bewertet werden. Diese Liste entstand aus den Rückmeldungen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer während der Austauschrunden zu den Praxisprojekten: (1) Zeitliche Integration in den Berufsalltag, (2) Definieren der Projektziele, (3) Abschätzen eines Zeitplans, (4) Fehlende technische Ausstattung, (5) Koordination der Aufgaben im Team, (6) Transfer der Bootcamp-Inhalte in das Praxisprojekt, (7) Eigenständiges Erarbeiten von projektbezogenem Fachwissen und (8) Inhaltlicher Gesamtumfang des Projekts.

Der vierte und abschließende Teil betrifft die Organisation und die zeitliche Durchführung des Bootcamps. Hierbei geht es z.B. um die Aufteilung der Veranstaltungen zwischen Online und vor Ort an der Fachhochschule, oder auch wie die zeitliche Organisation des Rahmenprogramms empfunden wurde.

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Für letzteres wurden den Teilnehmerinnen und Teilnehmern unterschiedliche Formate zur Auswahl gestellt, von denen sie jenes wählen sollten, mit dem sie den bestmöglichen Lernerfolg für sich sehen würden: (1) 4 Wochen Gesamtlänge, Komprimiertes Format, jede Woche 5 ganze Tage, (2) 2 Monate Gesamtlänge, jede Woche zwei ganze Tage, (3) 4 Monate Gesamtlänge, jede Woche ein ganzer Tag, (4) 4 Monate Gesamtlänge, jede Woche zwei halbe Tage und (5) Eigener Vorschlag.

Abschließend haben die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Möglichkeit zusätzliche Themen zu vermerken, die sie im Smart Factory Bootcamp vermisst haben, oder können allgemein weitere Anmerkungen hinterlassen.

6 Ergebnisse

Am Bootcamp haben zwölf Personen teilgenommen, zehn der Personen haben die Evaluation durchgeführt. Die Ergebnisse haben deshalb keine allgemeingültige Aussagekraft, sondern stellen die Wahrnehmung ausgewählter Teilnehmerinnen und Teilnehmer dar. Die Ergebnisse können dennoch wertvolle Anhaltspunkte für die Umsetzung zukünftiger Projekte bieten und werden deshalb im Folgenden in verkürzter Form vorgestellt. Die Antworten wurden anhand von 5-stufigen Beurteilungsskalen erfasst.

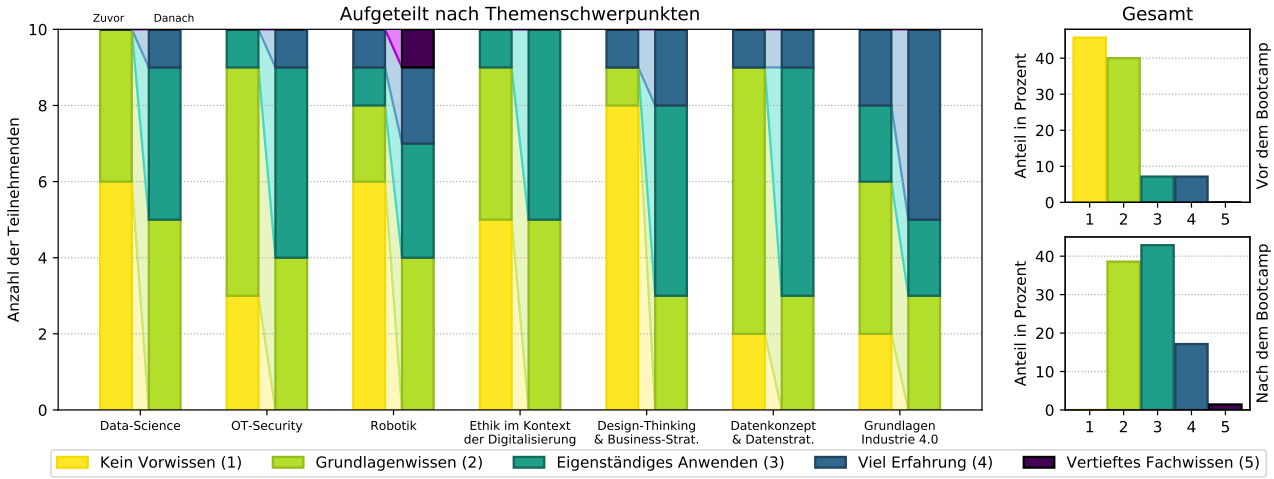


Bild 2: Kompetenzlevel vor und nach Abschluss des Bootcamps, gesamt und nach Themenschwerpunkten

Wissenstransfer

Bei den Themenschwerpunkten Design-Thinking & Business-Strategie, gefolgt von Data-Science und Robotik sind zu Beginn des Bootcamps bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern am wenigsten Kompetenzen vorhanden. In den Bereichen Grundlagen Industrie 4.0, Datenkonzept & Datenstrategie und OT-Security geben die Teilnehmerinnen und Teilnehmer an, das meiste Vorwissen zu haben. Gesamtheitlich betrachtet, über alle Themenschwerpunkte hinweg, werden die zwei niedrigsten Kompetenz-Level „kein Vorwissen“ (46 %) und „Grundlagenwissen vorhanden“ (40 %) am häufigsten gewählt. Höhere Kompetenzlevel werden selten gewählt (14 %). Nach Abschluss des Bootcamps wird in folgenden Bereichen das Kompetenzlevel nachwievor als gering eingeschätzt: Ethik im Kontext der Digitalisierung, Data-Science und OT-Security. Bei dem Modul Ethik im Kontext der Digitalisierung kann ein Zusammenhang zu der geringen Stundenanzahl hergestellt werden. Bei dem Modul Data-Science hingegen liegt eine Herausforderung darin, dass eine Programmiersprache erforderlich ist, womit eine zusätzliche Hürde beim Einstieg gegeben ist. Die drei höchsten durchschnittlichen Kompetenzlevel ergeben sich in den Bereichen Design-Thinking & Business-Strategie, Datenkonzept & Datenstrategie sowie Grundlagen Industrie 4.0. Im Vergleich zur Einschätzung vor Beginn des Bootcamps werden durchwegs höhere Kompetenzlevel ausgewählt: 39 % Grundlagenwissen, 43 %

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

eigenständige Anwendung. Der größte Zuwachs zeigt sich bei den drei Themenschwerpunkten Design-Thinking & Business-Strategie, Robotik und Data-Science (Abbildung 2).

Anwendbarkeit

In der Befragung wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer gebeten die Relevanz der erworbenen Kompetenzen für den aktuellen Berufsalltag zu bewerten (Abbildung 3). Die höchste Bewertung erhält OT-Security, gefolgt von Datenkonzept & Datenstrategie, daran anschließend Grundlagen der Industrie 4.0. Für die Bewertung der Themenschwerpunkte hinsichtlich der Relevanz in der eigenen beruflichen Tätigkeit in den nächsten fünf Jahren, wird besonders bei dem Thema OT-Security eine starke Zunahme erwartet. Ebenso wird eine starke Zunahme an Relevanz für Data-Science angenommen, auch wenn es aktuell für die meisten Teilnehmerinnen und Teilnehmer noch keine hohe Relevanz hat (durchschnittliche Bewertung als „etwas relevant“). Allgemein wird für alle Themenschwerpunkte von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern eine steigende Relevanz im eigenen Beruf innerhalb der nächsten 5 Jahre erwartet. Als mögliches Interesse für eine zukünftige Weiterbildung wird Data-Science an erster Stelle am häufigsten genannt, gefolgt von OT-Security.

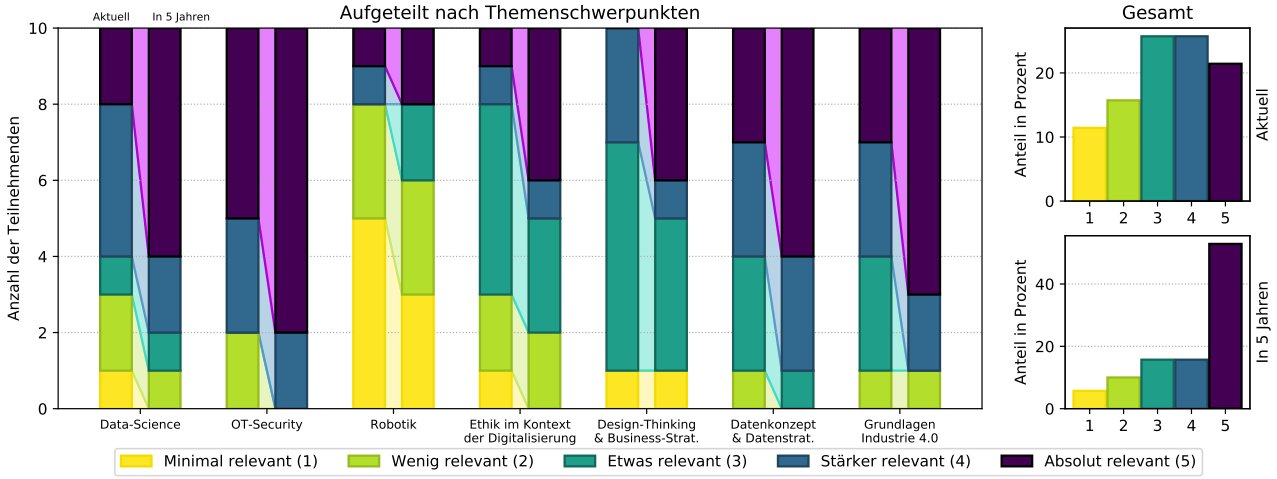


Bild 3: Themenschwerpunkte, bewertet nach Relevanz - aktuell sowie in fünf Jahren

Praxisprojekt

Die Herausforderung das Projekt zeitlich in den Berufsalltag zu integrieren, wurde von vier der zehn Teilnehmerinnen und Teilnehmern als „sehr stark herausfordernd“ angegeben. Die restlichen Teilnehmerinnen und Teilnehmer gaben eine starke oder mittlere Herausforderung an. Dazu passend wurde der Umfang des Praxisprojekts als die zweitgrößte, sowie das Definieren der Projektziele als die drittgrößte Herausforderung angesehen. In dieses Gesamtbild fügt sich auch der Wunsch der Teilnehmerinnen und Teilnehmer, das Praxisprojekt über eine längere Zeitspanne verteilt realisiert haben zu können. Hierbei wurde vier Mal eine Laufzeit von 6 Monaten angegeben (auswählbarer Maximalwert), drei Mal 4 Monate, sowie zwei Mal 5 Monate.

Organisation und zeitliches Format

Die Aufteilung der Veranstaltungen in Online- und Präsenzangebote wurde von 50 % der Teilnehmerinnen und Teilnehmer als „gut ausgeglichen“ bewertet, 20 % hätten mehr Online-, 30 % mehr Präsenzangebote bevorzugt. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer konnten weiters ihr bevorzugtes zeitliches Format auswählen. Es ergab sich ein gemischtes Bild. Vier der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sprachen sich für das diesjährige Format aus mit einer Länge von zwei Monaten aus. Weitere zwei Teilnehmerinnen und Teilnehmer wünschten sich eine komprimierte Version über drei Wochen hinweg jeden Tag mit ganztägigen Lerneinheiten. Die restlichen vier Teilnehmerinnen und Teilnehmer sprachen sich für eine entzerrte Variante über vier Monate aus, mit wöchentlich einem Bootcamp-Tag.

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Ergänzend lässt sich noch anmerken, dass Formate mit ganztägigen Lerneinheiten den Vorzug gegenüber halbtägigen Lerneinheiten erhalten haben. Als möglicher Grund ist der zusätzliche Mehraufwand für die häufigere An- sowie Abreise denkbar.

Das Format der Austauschrunden wurde von neun der zehn Teilnehmerinnen und Teilnehmer als sinnvoll erachtet, um den eigenen Projektstand im Blick zu bewahren und auch rundherum von den anderen Praxisprojekten zu erfahren.

7 Ausblick und Danksagung

Das Smart Factory Bootcamp Salzburg wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) als SmartFactoryCamp [11] unter der Projektnummer 887090 gefördert. Die Autoren bedanken sich für die gute Unterstützung durch den Fördergeber. Des Weiteren gilt der ITG Salzburg Dank für die Akquise der Unternehmen und für die Unterstützung in der Beantragung. Nicht zuletzt gilt der Dank der Autoren auch allen beteiligten Firmen und insbesonders den Teilnehmerinnen und Teilnehmern des Bootcamps.

Im Anschluss an das Bootcamp wurden auch einige weitere Schritte definiert und mit den Unternehmen und den beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern abgestimmt. In den nächsten Monaten erfolgt eine Vertiefung von Wissen in den oben genannten Bereichen sowie Etablierung von Multiplikatorinnen und Multiplikatoren in den Unternehmen. Dazu plant die Hochschule ein dementsprechendes Programm mit einem Angebot von Workshops und Trainings vor Ort bei den Firmen. Des Weiteren plant die Hochschule die Intensivierung des Wissenstransfers zwischen der Hochschule und den Unternehmen, in beide Richtungen gleichermaßen. Dies soll durch eine Steigerung der Anzahl der Partner für Folgevorhaben, durch die Akquise von Folgeprojekten aufbauend auf die Praxisprojekte, sowie durch gezielten Transfer von Fragestellungen in die Lehre an der Hochschule, realisiert werden. Geplant ist auch die Unterstützung von weiteren Unternehmen im systematischen Aufbau und der Höherqualifizierung des vorhandenen Personals. Angebote werden aus dem Bootcamp und dem Feedback aus den Workshops und Ergebnisse aus den Praxisprojekten realisiert. Nicht zuletzt werden Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Bootcamp auch in die Lehre an der Hochschule integriert. Das begleitende Praxisprojekt soll sowohl in den Bachelorstudien als auch in den Masterstudiengängen in die Praxisausbildung integriert werden.

8 Literatur

[1] Sternberg, R. J. (1997). A Triarchic View of Giftedness: Theory and Practice. In Coleangelo; Davis (eds.). Handbook of Gifted Education. pp.43–53.
[2] Hugh H. Benson: Socratic Method.In: Donald R. Morrison (Hrsg.):The Cambridge Companion to Socrates, Cambridge 2011, S. 179–200, hier: 184.
[3] Kelley, T., & Kelley, D. (2015). Creative Confidence. London, UK: William Collins.
[4] Müller, R., Franke, J., Henrich, D., Kuhlenkötter, B., Raatz, A., & Verl, A. (2019). Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. München, Germany: Carl Hanser Verlag.
[5] Strategyzer. (2010). Business Model Generation. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
[6] Strategyzer. (2014). Value Proposition Design. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
[7] Shearer, C. (2000). The CRISP-DM model: the new blueprint for data mining. Journal of data warehousing, 5(4), 13-22.
[8] Stanford Artificial Intelligence Laboratory et al. (2018). Robotic Operating System. Retrieved from https://www.ros.org
[9] Brooke, John. (1995). SUS: A quick and dirty usability scale. Usability Eval. Ind.. 189.
[10] Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort, Digitale Kompetenz und Arbeitsmarkt, https://www.bmdw.gv.at/Themen/Digitalisierung/Gesellschaft/Digitale-Kompetenz_Arbeitsmarkt.html
[11] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH , FFG Projektdatenbank, Bootcamp Smart Factory Salzburg, https://projekte.ffg.at/projekt/4127690

Open Access. © 2022 S. Kranzer, O. Saßnick, D. Hofer, S. Hoher, M. Schirl, D. Prill
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Digital Twin Academy: From Zero to Hero through individual learning experiences

Jessica Ulmer[1], Youssef Mostafa[2], Jörg Wollert[3]

Abstract

Digital twins are seen as one of the key technologies of Industry 4.0. Although many research groups focus on digital twins and create meaningful outputs, the technology has not yet reached a broad application in the industry. The main reasons for this imbalance are the complexity of the topic, the lack of specialists, and the unawareness of the twin opportunities. The project "Digital Twin Academy" aims to overcome these barriers by focusing on three actions: Building a digital twin community for discussion and exchange, offering multi-stage training for various knowledge levels, and implementing real-world use cases for deeper insights and guidance. In this work, we focus on creating a flexible learning platform that allows the user to select a training path adjusted to personal knowledge and needs. Therefore, a mix of basic and advanced modules is created and expanded by individual feedback options. The usage of personas supports the selection of the appropriate modules.

Keywords

Digital Twins, Knowledge Transfer, Training

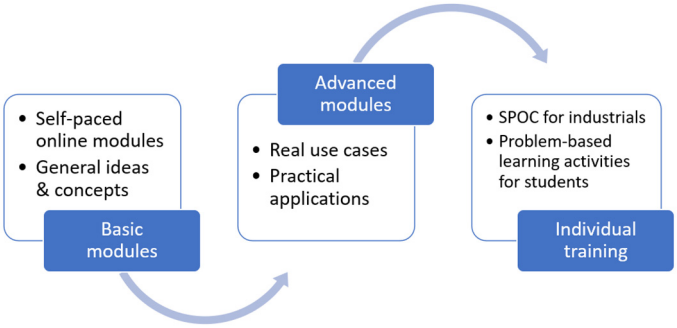
1 Introduction

Real and virtual components are increasingly merging in the context of Industry 4.0. For example, machines are not only planned digitally and evaluated using Virtual Reality, but processes are also tested in advance using simulations and virtual commissioning. To realize these applications with a benefit for the companies, digital twins play a significant role. Digital twins generally refer to a set of adaptive models that emulate the behavior of a physical system in a virtual environment [1].
While the term digital twin is widely used and active research is being conducted on applications of digital twins, the transfer of knowledge between research institutions, companies, vocational schools, and courses is still limited. In order to strengthen this knowledge transfer, the Digital Twin Academy (DTA) project was launched. The DTA aims to build up a community in the digital twin field, conduct application-oriented research, and transfer knowledge to all interested people through a hybrid training program. The challenge is that the DTA target groups have a wide variety of prior knowledge and experience. The training program must therefore be adaptable to individual requirements.
In order to achieve this individualization, a multi-pronged approach was adopted in the DTA (Picture 1). First, general knowledge on digital twins is introduced by basic online modules. The modules include, inter alia, information about the general idea of digital twins, implementation concepts, and technical backgrounds. Afterward, the learners can proceed to the advanced online modules. These are based upon actual use cases and highlight challenges and solution strategies for the implementation of digital twins. Finally, the participants have the chance to test their knowledge in projects at

1 Jessica Ulmer, M.Sc., FH Aachen University of Applied Sciences, Aachen
2 Youssef Mostafa, B.Sc., FH Aachen University of Applied Sciences, Aachen
3 Prof. Dr.-Ing. Jörg Wollert, FH Aachen University of Applied Sciences, Aachen

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

universities or in companies. During the project implementation, they are supported by the experts of the consortium. To meet the different requirements of the user groups, user profiles have been defined. This allows particularly suitable courses to be highlighted and facilitates the user's selection.



Picture 1: General learning procedure.

2 Background

2.1 Digital Twins

The idea of representing objects virtually and referring to the virtual representation of the physical objects as "digital twins" was first introduced by M. Grieves [2]. Grieves suggested a digital twin architecture composed of 3 layers: a physical layer, a virtual layer, and the connection layer between them. While the idea's core content stayed the same (i.e., representing important assets virtually), details of its description have evolved and varied in focus and scope. Five-layer models [3], as well as six-layer architectures [4], have evolved over the years to describe how a digital twin is built, expanding on the classical three-layer architecture to include services, data, and a focus on the flow of data from physical asset to the cloud [1]. In our projects, we use a digital twin architecture compatible with RAMI4.0 [5] to describe the virtualization of assets through digital twins using commonly used Industry4.0 terms. The model distinguishes between the type and the instance of an asset to further zoom into the data source. The data flow from the asset to the virtual domain and beyond is described by the Layers Axis included originally in RAMI4.0. The model introduces a data pool in which data is transformed into information and made ready for consumption through the application or other digital twins.

2.2 Knowledge Transfer

Acquiring new skills usually follows the 70:20:10 rule: 70% of the learning is done with hands-on practice and experience, 20% is done through working with colleagues and feedback, and 10% is done through reading. [6, 7] For this reason, the courses developed aim to be as interactive as possible, offering practical sessions whenever considered feasible. Because the program seeks to support companies in keeping a high level of competitiveness directly, a transparent knowledge transfer between academia and industry is established. This knowledge sharing should reduce the duplication of search efforts [8] and avoid the commonly identified restrictions arising from the commercialization of scientific research [8].

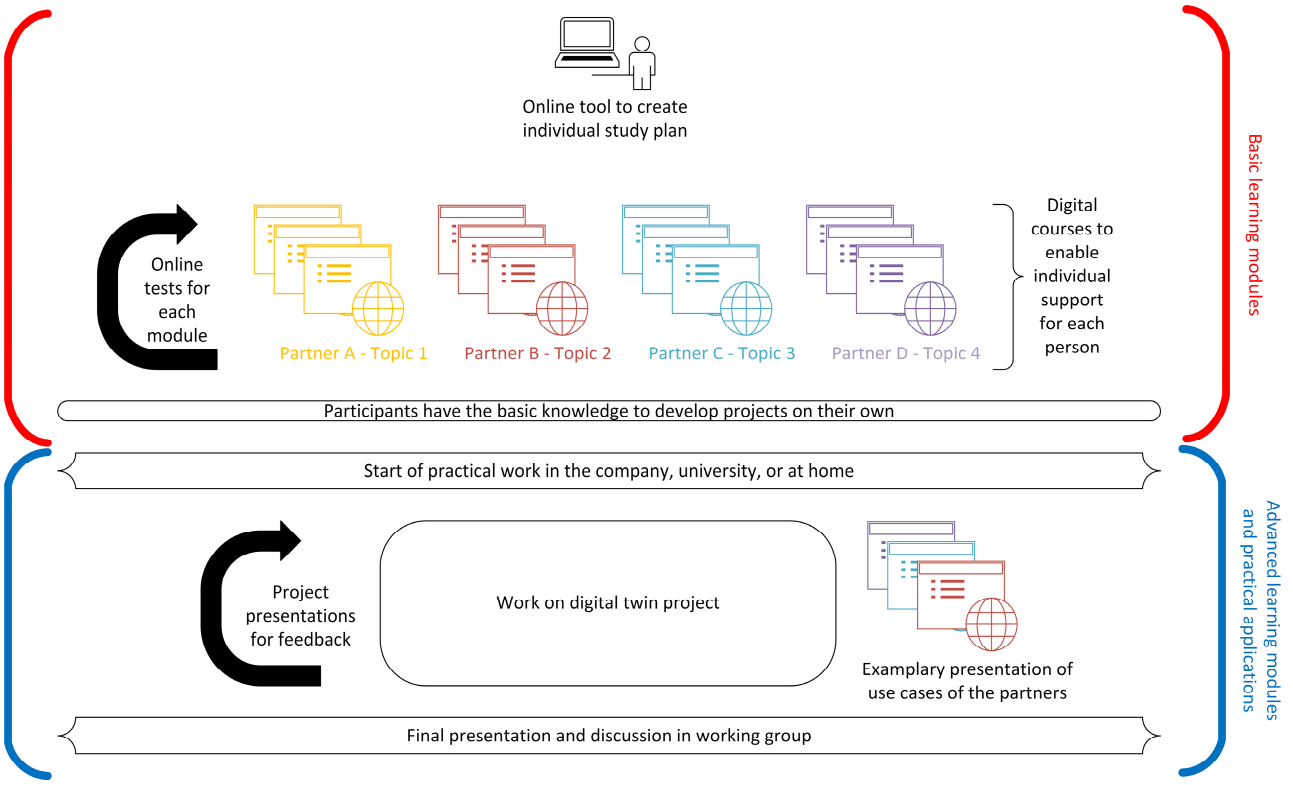
Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3 Concept

The training program should support companies in implementing their own digital twins. Therefore, it must fulfill several requirements:

- Accessibility to people from different backgrounds: Digital twins must be included in all processes in the company, from the shop floor to the management. Thus, employees with different experiences and educational backgrounds must be considered.
- Condensed information according to interest and needs: The learners have limited time to undergo the digital twin training. Therefore, the information should be provided efficiently by offering selection choices and by limiting the training time per topic.
- Practical relevance: After participating in the program, the participants should be able to understand and conduct digital twin projects. Therefore, the required basic knowledge, as well as exemplary implementation pathways, must be included.

In order to fulfill these requirements, a general learning path was defined. First, the participants gain fundamental knowledge using online learning modules. Second, they can proceed to the advanced learning modules, which explain real projects on digital twins. Third, they apply their knowledge to a project at a university, a company, or at home.



Picture 2: Concept for the usage of the learning material.

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

3.1 Creation of Learning Material

A consortium of experts from the field of digital twins should produce the learning material. In the beginning, different aspects of digital twins should be collected based on literature and own experiences. Next, the proposed fields should be discussed and adjusted in cooperation with industry representatives to extract relevant topics. Afterward, basic modules of approximately two hours of learning content should be developed, covering the general idea of digital twins, suitable technologies for the implementation of digital twins, and concepts to create and apply digital twins in different environments. Moreover, small exercises should allow the users to test their knowledge.
At the same time, use cases on digital twins should be conducted in industrial environments. From the idea and concept to the implementation and test, the whole process should be documented. Based on this, the advanced learning modules should be created showing exemplary ways to integrate digital twins in industrial environments. Moreover, the modules should highlight potential challenges and solutions which occurred during the project. This way, relevant strategies, and ideas should be transferred from the scientific partners to the industrial users of the advanced learning modules.
Practical tasks around digital twins should complement the learning modules. For students, different practical tasks should be offered at the universities. For employees, small private online courses (SPOC) tackling projects in the companies should be led by the consortium's experts. In both cases, the participants should regularly present their ideas and progress and discuss them with their peers. This feedback loop should enhance the results and allow an exchange between the participants.

3.2 Usage of Learning Material

The online modules should allow an individual learning speed according to the user's preferences. However, current research indicates that the distributed studying technique allows students to memorize content better over a longer period. [9, 10] Therefore, the suggested learning path should not promote the mass reading of the material but recommend using the learning material over a more extended period with short breaks, e.g., by executing one learning module per four days [11] and by rereading main aspects of previous modules.

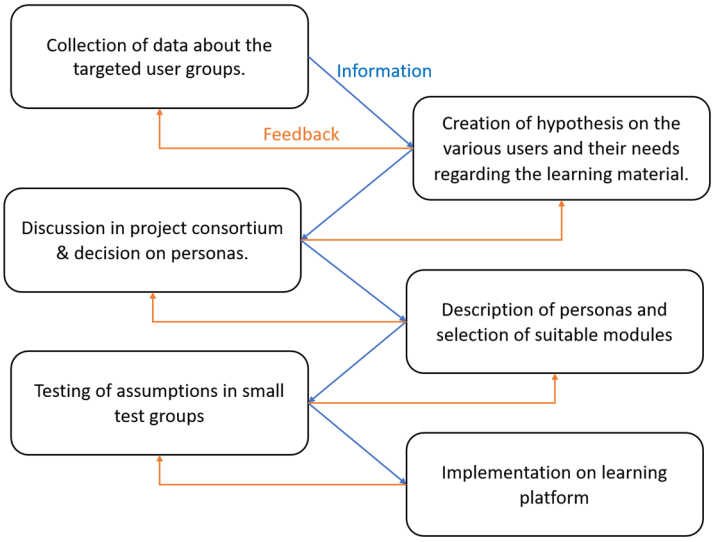
3.2.1 Online Modules

The learning modules will deal with different aspects of the digital twin on several abstraction levels. Thus, the learners must be able to access the modules according to their interests and knowledge. In order to ease the access to the learning modules, three different options are planned

1. Selection of modules according to topics,
2. Choice of modules according to user profiles,
3. Individual selection from a list of all modules.

Keywords should be specified for each module to allow a categorization. The persona method [12] shoud evaluate relevant aspects of the different user groups and identify suitable learning modules. Therefore, a process to create, test, and use personas are defined (Picture 3). This approach allows particularly appropriate courses to be highlighted and facilitates the user's selection. Bachelor students or trainees, for example, are offered practical modules that do not require any prior knowledge. Master's students or technical managers, on the other hand, gain direct insight into the current state of research, for example, by being introduced to concepts of digital twins.

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +



Picture 3: Process for personas based on [12].

3.2.2 Practical Tasks

Practical tasks should allow the participants to use the obtained knowledge of the online modules in their own context. Different learning activities should be planned for students, which enable them to create, implement, and evaluate small-scale digital twin applications. Compared to the online modules, these activities should include a hands-on experience and a face-to-face meeting with the student groups. This approach also allows the usage of software and hardware at the universities.
For employees, SPOCs are planned by the experts in the consortium. The topic areas of the SPOCs should be defined in advance that the companies can register for relevant courses. Afterward, the registered participants are divided into small groups of five people [13] to allow an intense exchange during the project runtime. In these groups, participants with a similar background, such as technicians, developers, and managers, should be matched to adjust the SPOC to the participant's needs. In the beginning, the participants should receive a short introduction to the topic and the possible tools for implementation. Afterward, the group meets regularly to discuss the progress and collect information and feedback.

4 Implementation

The learning concept is currently implemented in the "Digital Twin Academy" project by a consortium of nine partners from Germany, Belgium, and the Netherlands. Therefore, not all elements of the learning concept (Picture 2) are already developed.

4.1 Content Selection

Initially, the consortium identified their expert areas as the basis for the developments and the thematic responsibilities. The areas included manufacturing, factory management, smart energy, and traffic. The consortium decided to provide basic learning modules focusing on

- introductions into the topic of digital twins from different perspectives;
- exemplary demonstrations of digital twin possibilities;
- concepts required to design digital twin applications;
- technologies to implement digital twin applications.

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Afterward, possible topics for the basic modules were proposed, discussed, and selected. The focus of the SPOC was chosen by each expert individually as the expert must supervise the participants intensively. In contrast to the basic modules, the advanced modules as well as the problem-based learning activities could not be chosen freely but built upon the industrial use cases.

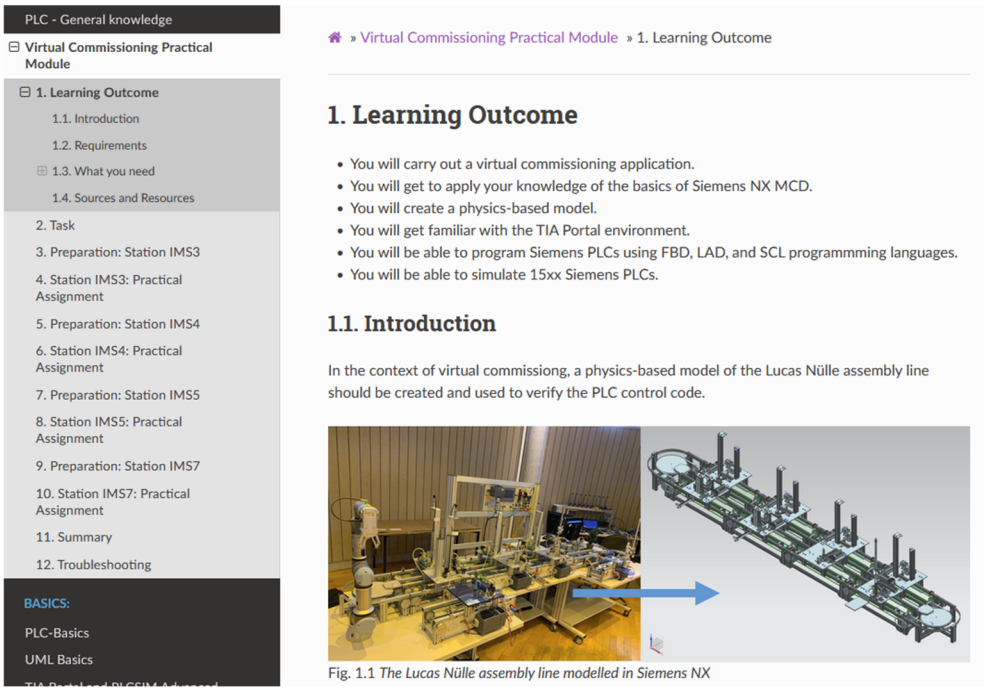
4.2 Creation Process

4.2.1 Basic Modules

The basic modules are implemented as two-hour online modules, whereby the learning modules can be selected independently of one another. The modules consist of texts, pictures, videos, and self-assessment activities. Moreover, a conclusion chapter and a download of the most critical aspects of each module are included to allow the users to remember and reread. The included videos were limited to a maximum duration of seven minutes to reduce students' cognitive load[14]. All basic modules will be provided on an edX learning platform [15].

4.2.2 Practical Tasks for Students

The practical tasks are developed using the hardware and software resources at the different universities. Therefore, the practical tasks are tested initially with students of existing courses to execute a first feedback and improvement cycle. Afterward, the course material is offered to all interested parties who possess the required materials. At FH Aachen, a tutorial and exercise for virtual commissioning applications using digital twins were developed. The course module consists of theoretical parts, which can be executed without software access, and practical parts, which require the usage of particular software. The content is provided on a website, which allows easy adjustments and interactive designs.



Picture 4: Example of a problem-based learning activity for students at FH Aachen.

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4.3 Usage of Learning Material

For the selection of the modules according to the individual interest, a multi-answer questionnaire of the following format was chosen:

I am interested in learning about digital twins, specifically

- *the main concept*
- *The design part such as…*
- *The technical part such as…*

Moreover, different user profiles (personas) were defined based on the current affiliation and the background:

Current affiliation

- *Student*
  - *High School*
  - *Bachelor*
  - *Final year of Bachelor or Master*
  - *PhD*
- *Employee*
  - *Technician*
  - *Developer*
  - *Manager*
  - *Work seeker*

Background

- *Technical area (manufacturing, engineering, science, etc.)*
- *Economic area (accounting, business administration, etc.)*
- *Other*

Afterward, the personas were described according to their background, learning process, reasons for the usage of the training program, and relevant modules. Two examples of persona descriptions are shown in Table 1 and Table 2. Moreover, similar requirements regarding the modules were matched to reduce the number of module categories in the background. This process resulted in four categories to which the modules were assigned (Table 3). However, it must be noted that the current status of persona descriptions and the aggregation of the different personas to define categories was not yet tested. Therefore, updates and changes might occur in the future.

Table 1: Exemplary persona description for students.

Student – Master (technical area) / Bachelor in final year (technical area) / PhD	
Background	Previous technical knowledge Used to self-learning activities
Learning process	Can work on problems independently Can find necessary/ missing knowledge on his own Likes to find own solutions Practical tasks for better understanding and higher interest
Reasons/ motivation for usage	Mandatory activity for their study program Increase knowledge for application process/ future job opportunities
Type of modules	In-depth modules which require previous technical knowledge such as cad or programming Modules explaining conceptual backgrounds

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Table 2: Exemplary persona description for employees.

Employee - Technician	
Background	Practical technical knowledge
Learning process	Focus on practical applications Hands-on experiences
Reasons/ motivation for usage	Proposal from employer Increase knowledge for application process/ future job opportunities
Type of modules	Introductory modules with relation to real productions Hands-on modules with a focus on practical applications

Table 3: Aggregation of personas into categories to reduce the number of required user profiles.

Categories	**Persona**
Category 1	Student – High School Student – Bachelor (technical or non-technical area) Work Seeker – No Technical Background (Retraining)
Category 2	Student – Master (technical area) / Bachelor in final year (technical area) / PhD Employee – Technical Development or Technical Management
Category 3	Student – Master (non-technical area) Employee - Management
Category 4	Employee – Technician Work Seeker – Technical Background

5 Conclusion and Outlook

Digital Twins are seen as one of the main technologies to pursue the goals of Industry 4.0. However, there is a gap between the technological possibilities identified in research projects and the companies' knowledge about practical benefits and implementation strategies. Moreover, specialists are missing who can understand, plan, and implement digital twin applications in the industry. To close this gap between academia and industry, the project "Digital Twin Academy" was introduced. It aims to connect experts and the industry by forming a close network, training students and employees according to their individual needs, and developing exemplary use cases to understand digital twins better. For the learning program, the different backgrounds and experiences of the participants must be considered. Therefore, the approach is divided into basic modules, advanced modules, and practical tasks. A selection tool identifies relevant learning modules according to the personal background and the interest of the user. Basic modules present the current state of the art and introduce the required knowledge to understand practical applications. Subsequently, advanced modules can be selected depending on the area of interest. These contain field reports on real-life applications and provide an insight into procedures and challenges. Parallel to the advanced learning modules, practical activities take place within the framework of internships at the universities, work on company-specific issues, or small-scale implementations at home.

Since the application-oriented, advanced modules are created in cooperation between companies and research institutions, knowledge about challenges, implementation strategies, and solutions can be conveyed directly to the students and employees. The use of practical activities in small groups also challenges creativity and solution-orientation. The first test phase of the developed concept is currently running at universities in Germany, Belgium, and the Netherlands.

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

6 Literature

[1] Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. u. Dassisti, M.: Digital twin paradigm: A systematic literature review. Computers in Industry 130 (2021), S. 103469
[2] Grieves, M.: Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication (2014)
[3] Tao, F., Zhang, M., Liu, Y. u. Nee, A.: Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. CIRP Annals 67 (2018) 1, S. 169–172
[4] Redelinghuys, A., Basson, A. u. Kruger, K.: A Six-Layer Digital Twin Architecture for a Manufacturing Cell. In: Borangiu, T., Trentesaux, D., Thomas, A. u. Cavalieri, S. (Hrsg.): Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing. Studies in Computational Intelligence. Cham: Springer International Publishing 2019, S. 412–423
[5] Braun, S., Mostafa, Y., Ulmer, J., Cheng, C.-T., Dowey, S. u. Wollert, J.: Agents-as-a-Service - a novel approach to on-premise digital twins. 2020 IEEE 16th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP) 2021
[6] Lombardo, M. M. u. Eichinger, R. W.: The career architect development planner. An expert system offering 103 research-based and experience-tested development plans and coaching tips for learners, managers, mentors and feedback givers. S.L.: Lominger Limited 2006
[7] Ackermann, B., Krancher, O., North, K., Schildknecht, K. u. Schorta, S.: Erfolgreicher Wissenstransfer in agilen Organisationen. Hintergrund – Methodik – Praxisbeispiele. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler 2020
[8] Gerbin, A. u. Drnovsek, M.: Knowledge-sharing restrictions in the life sciences: personal and context-specific factors in academia–industry knowledge transfer. Journal of Knowledge Management 24 (2020) 7, S. 1533–1557
[9] Fini, A. A. S., Zainalipour, H. u. Mozafari, S. H.: Comparing the effect of mass and distributed study techniques on remembering level and its relation with the exam date. Procedia - Social and Behavioral Sciences 5 (2010), S. 1751–1759
[10] Arthur, W., Day, E. A., Villado, A. J., Boatman, P. R., Kowollik, V., Bennett, W. u. Bhupatkar, A.: The Effect of Distributed Practice on Immediate Posttraining, and Long-Term Performance on a Complex Command-and-Control Simulation Task. Human Performance 23 (2010) 5, S. 428–445
[11] Verkoeijen, P. P. J. L., Rikers, R. M. J. P. u. Özsoy, B.: Distributed rereading can hurt the spacing effect in text memory. Applied Cognitive Psychology 22 (2008) 5, S. 685–695
[12] Nielsen, L.: Personas - User Focused Design. SpringerLink Bücher. London: Springer London 2019
[13] Abu Seileek, A. F.: The effect of computer-assisted cooperative learning methods and group size on the EFL learners' achievement in communication skills. Computers & Education 58 (2012) 1, S. 231–239
[14] AFIFY, M. K.: EFFECT OF INTERACTIVE VIDEO LENGTH WITHIN E-LEARNING ENVIRONMENTS ON COGNITIVE LOAD, COGNITIVE ACHIEVEMENT AND RETENTION OF LEARNING. Turkish Online Journal of Distance Education (2020), S. 68–89
[15] Open edX. The Center for Reimagining Learning, Inc. 2021

Open Access. © 2022 Jessica Ulmer, Youssef Mostafa, Jörg Wollert
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Das Projekt cITIcar

Autonomes Fahren als begleitende Lehr- und Lernplattform – auch in der Pandemie

Jakob Czekansky[1], Moritz Schauer[1], Florian von Zabiensky[1], Diethelm Bienhaus[1]

Zusammenfassung

Das Projekt cITIcar bietet ein breites Spektrum für das Lehrangebot im Bereich der (Technischen) Informatik und der Ingenieur-Informatik. Aus dem Themengebiet der Eingebetteten Systeme kann sowohl die Prototypenentwicklung als auch die Mikroprozessorprogrammierung und das Arbeiten mit Echtzeitsystemen am cITIcar erlernt werden. Typische Aufgaben aus der Regelungstechnik können am Fahrzeug durchgeführt und verschiedene Probleme aus der Längs- und der Querregelung von den Studierenden gelöst werden. Zusätzlich bietet das cITIcar Potential für Aufgaben aus dem Bereich der Computer Vision und des Machine Learnings: Fahrbahnranddetektion, Schilderkennung oder Fahrbahnsegementierung sind nur wenige Beispiele für Lehraufgaben am cITIcar. Sowohl die Lehrmodule als auch die Projektarbeit am cITIcar wurden durch die Pandemie vor neue Herausforderungen gestellt. Um die Onlinelehre im Projekt zu verbessern, wurden verschiedene Werkzeuge und Techniken in der Lehre integriert. In dieser Arbeit werden diese Werkzeuge und Techniken, sowie die damit gewonnenen Erfahrungen dargelegt.

Stichwörter

Autonomes Fahren, Mobile Robotik, Simulation, Lehrkonzept, Projektarbeit, Eingebettete Systeme, Testing, Remote-Programming, Continous Integration, Carolo-Cup

1 Einleitung

„Jede dritte Fahrt erfolgt im Jahr 2035 mit einem autonomen Flottenfahrzeug“ – so prognostiziert zumindest das Wirschaftsunternehmen Deloitte die nahe Zukunft des autonomen Fahrens [1]. Auch an dem weltweit starken Zuwachs an Patenten mit Bezug zum autonomen Fahren [2][3] und dem global wachsenden Bestand an Elektrofahrzeugen [4] lässt sich dieser Trend erkennen. Um die Studierenden der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) auf dieses weitreichende Themengebiet der mobilen Robotik vorzubereiten, wurde das studienbegleitende Projekt cITIcar (Abbildung 1) ins Leben gerufen. Dabei handelt es sich um ein autonom fahrendes Modellfahrzeug im Maßstab 1:10, welches in regelmäßigen Abständen an verschiedenen internen und externen Wettbewerben im Bereich des autonomen Fahrens teilnimmt. 2020 konnte das cITIcar das erste Mal am Carolo-Cup der Technischen Universität Braunschweig teilnehmen und belegte dort den sechsten von vierzehn Plätzen im Basic Cup.
Bei dem Projekt cITIcar handelt es sich um ein rein studentisches Lehr- und Lernprojekt, an dem die Studierenden verschiedener Studiengänge der THM teilhaben können. Da das Projekt an der THM am Fachbereich für Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik (MNI) angesiedelt ist, liegt der Fokus bei der Entwicklung besonders auf der Hardware- und Softwareentwicklung. Neben freiwilligen Arbeiten der Studierendenschaft am cITIcar wird die Weiterentwicklung des Fahrzeugs durch

[1] Institut für Technik und Informatik, Technische Hochschule Mittelhessen, Gießen

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

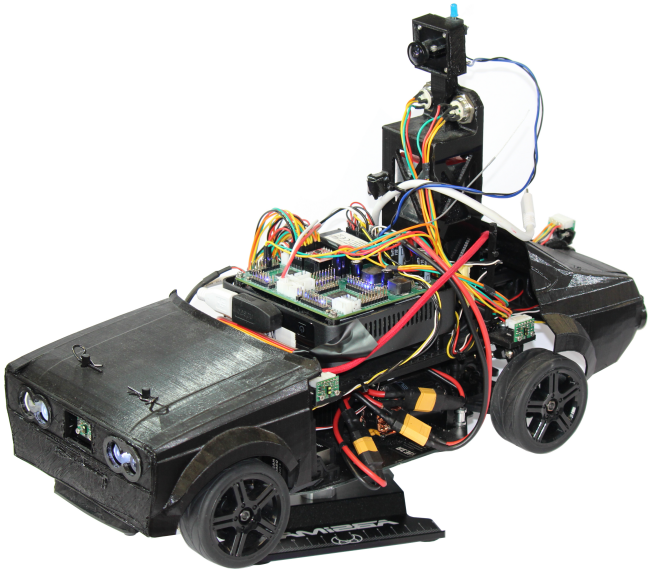


Bild 1: Das cITIcar 2020

verschiedene Wahlpflichtmodule und das Angebot von Abschlussarbeiten im Kontext des Modellfahrzeugs gefördert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll zunächst in groben Zügen der zugrundeliegende Carolo-Cup vorgestellt werden, um anschließend das Projekt cITIcar in dessen Kontext zu beleuchten. Während der Pandemie sollte das Projekt möglichst effizient weiterlaufen, weshalb die Onlinelehre im Kontext des cITIcars so konzipiert wurde, dass die Studierenden von Zuhause aus das autonome Fahrzeug weiterentwickeln können. Hierzu wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, welche in Abschnitt 4 beschrieben werden und als Inspiration für ähnliche Projektarbeiten dienen können.

2 Der Carolo-Cup

Der Carolo-Cup[1] ist ein internationaler Hochschulwettbewerb, der seit 2008 jährlich im Februar von der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig angeboten wird [5]. Der Wettbewerb inkludiert verschiedene statische und dynamische Disziplinen, in denen Teams aus internationalen Hochschulen und Universitäten mit autonom fahrenden Modellfahrzeugen im Maßstab 1:10 gegeneinander antreten können. Im Jahr 2008 wurde der Wettbewerb initial von sechs teilnehmenden Teams besucht, wohingegen 2020 bereits 22 Teams am Carolo-Cup partizipiert haben.
Der Carolo-Cup teilt sich intern in zwei verschiedene Schwierigkeitsklassen auf: den Basic-Cup und den Master-Cup. Im Basic-Cup wird unter vereinfachten Bedingungen konkurriert, während im Master-Cup zusätzliche Schwierigkeiten beim Rundkurs eingebaut werden. Der Basic-Cup richtet sich in erster Linie an einsteigende Teams, mit wenig Erfahrung, wohingegen der Master-Cup eine Herausforderung für die Teams bieten soll, die schon seit einigen Jahren am Wettbewerb teilhaben. In beiden Klassen wird der Wettbewerb jeweils in unterschiedlichen Disziplinen bewertet: Bei den sogenannten Statischen Disziplinen muss das Gesamtkonzept der einzelnen Fahrzeuge in einem Fachvortrag vor einem Bewertungskomitee aus Lehre und Industrie präsentiert werden. Zusätzlich bewertet das Komitee verschiedene technische, wirtschaftliche und organisatorische Aspekte im Bezug auf das vorgestellte Fahrzeug [6]. In der Dynamischen Disziplin müssen die Teams anschließend jeweils für zwei Minuten einen bestimmten Rundkurs bezwingen. Beim ersten Durchlauf, im Modus „Freie Fahrt und Einparken“, kommt es darauf an, auf dem Rundkurs so viele Meter wie möglich zurückzulegen und dabei möglichst wenige Fehler zu machen. Zusätzlich kann bei jedem Rundendurchgang einmal vorwärts oder seitlich rückwärts eingeparkt werden, um die zurückgelegten Meter mit einem Multiplikator zu versehen. Im zweiten Durchlauf, dem „Hindernisparcours“ wird die Fahrbahn an verschiedenen

1 https://www.tu-braunschweig.de/carolo-cup/

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Stellen durch feste, statische Hindernisse und durch bewegliche, fahrende Hindernisse blockiert. Das autonome Fahrzeug muss bei diesem Kurs an passenden Stellen überholen und Vorfahrtsregeln an Kreuzungen beachten. Die Punkte der Statischen und der Dynamischen Disziplin werden schlussendlich verrechnet und die besten Teams werden mit Preisgeldern belohnt. 2020 wurde der erste Platz im Basic-Cup mit 2000€ dotiert, der zweite Platz mit 1000€ und der dritte Platz mit 500€. Zusätzlich muss das erstplatzierte Team des Basic-Cups bei erneuter Teilnahme im Folgejahr im Master-Cup teilnehmen [7].

3 Das Projekt cITIcar

Das Projekt cITIcar[2] wurde im Sommersemester 2018 am Fachbereich MNI der THM gegründet, mit dem Ziel, ein vielseitig integrierbares Projekt für die Studierenden der Informatik und der Ingenieur-Informatik zu schaffen. Ähnliche Projekte gibt es in einigen Universitäten und Hochschulen Deutschlands, wie beispielsweise im Jahr 2018 von der Hochschule RheinMain publiziert wurde [8]. An der Hochschule RheinMain wurde das Autonome Fahren am Beispiel des Carolo-Cups im Rahmen einer Projektveranstaltung *Wahlprojekt* in die Lehre integriert [8]. Das cITIcar der THM soll die Studierendenschaft jedoch über viele Semester ihres Studiums bis hin zu einer potentiellen Abschlussarbeit begleiten und in unterschiedlichen Lehrmodulen als Demonstrations- und Arbeitsplattform dienen. Hierzu wurde beim ersten studentischen Entwurf des Fahrzeugs darauf geachtet, dass eine möglichst breite Abdeckung der typischen Technologien aus dem Bereich der (technischen) Informatik vorliegt. Zusätzlich wurde das cITIcar einem realen Elektrofahrzeug nachempfunden, sodass explizit Bussysteme, wie ein Controller Area Network (CAN) Bus, im Fahrzeug verbaut wurden [7].

3.1 Hardware- und Softwarekonzept des cITIcars

Das cITIcar basiert zurzeit auf dem 1:10 RC-Chassi „Deathwatcher EVO 2.0“ des Modellbauherstellers Reely. Neben Modifikationen an der Mechanik wurde die komplette Steuerungselektronik des Modelbausatzes ersetzt, um das ferngesteuerte Modell auf den autonomen Betrieb umzurüsten. Dabei wurde sowohl die Software als auch die zugehörige Hardware in verschiedene Ebenen eingeteilt. Grob lässt sich der Aufbau in ein Eingebettetes System und einen Mini-Computer (Intel Next Unit of Computing (NUC)) einteilen (siehe Abbildung 2). Dabei dient der NUC als Ebene der Zentralen Intelligenz des Fahrzeugs. Hier wird auf der einen Seite die gesamte Verhaltenslogik des Fahrzeugs implementiert. Auf der anderen Seite wurde hier auch die rechenintensive Bildverarbeitung, welche zur Navigation des Fahrzeugs genutzt wird, umgesetzt. Die Kommunikation der beiden Softwareteile untereinander aber auch mit den anderen Komponenten wird mithilfe des ROS-Frameworks umgesetzt [7].
Neben der übergeordneten Intelligenz müssen auch die anderen Aktoren und Sensoren des Fahrzeugs angesteuert werden. Hierfür wurde eine eigene Steuerplatine entwickelt. Auf ihr befinden sich neben den beiden Cortex M4 Mikrocontrollern diverse Anschlüsse für die unterschiedlichen Komponenten sowie die zum Einsatz kommenden Bus-Systeme. Dabei sind die beiden Microcontroller Units (MCUs) in High- und Low-Level-Aufgaben eingeteilt. Der High-Level-Controller übernimmt hier erstens die Kommunikation mit der Zentralen Intelligenz und zweitens die Längs- und Querregelung des Fahrzeugs. Der Low-Level-Controller ist für die Kommunikation (Serial Peripheral Interface (SPI)- und Inter-Integrated Circuit (I2C)-Bus) und das Bereitstellen der Daten der verschiedenen Sensoren und Aktoren zuständig. Als Sensoren kommen bei dem Fahrzeug eine Inertiale Messeinheit sowie mehrere Time-of-Flight Sensoren zum Einsatz. Die Controller kommunizieren hierbei untereinander über den CAN-Bus des cITIcars. Für die Ansteuerung des Fahrzeugmotors kommt ein weiteres Controller-Board zum Einsatz, welches ebenfalls an den CAN-Bus angeschlossen ist [7].

[2] https://citicar.thm.de/

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

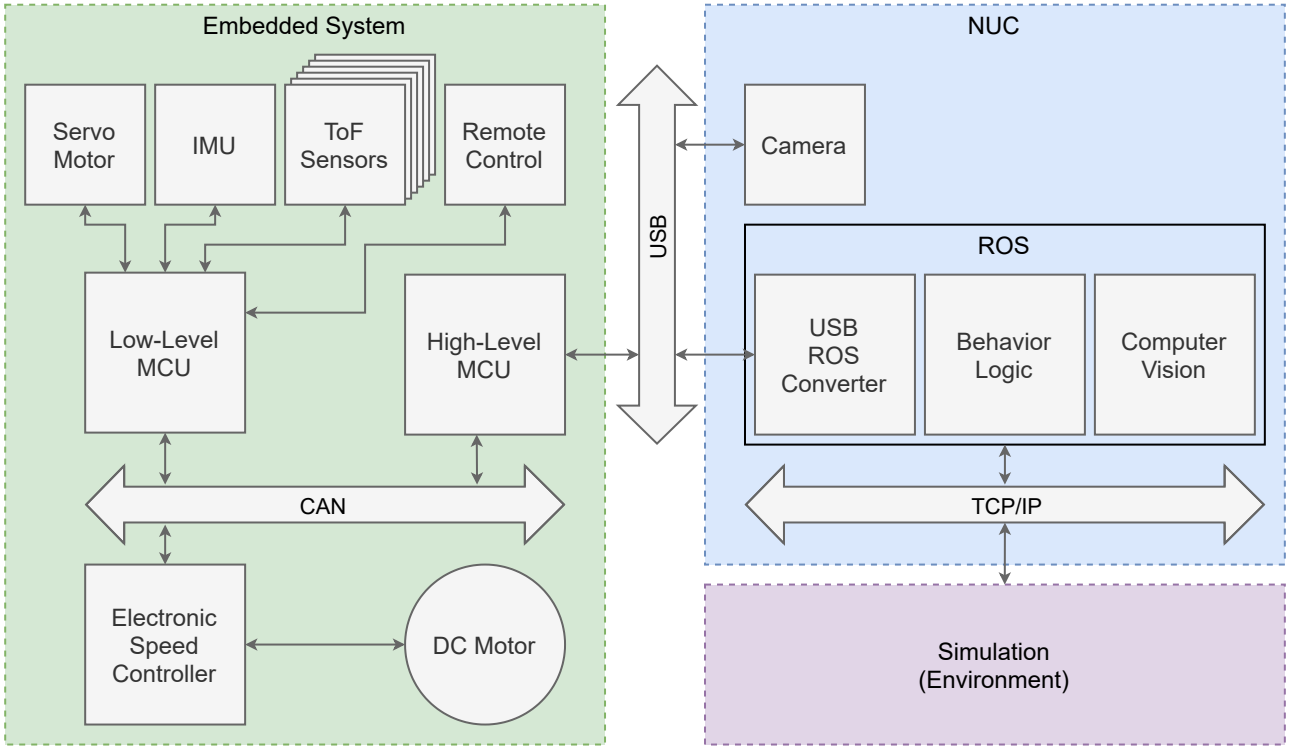


Bild 2: Überblick über das Hardware- und Softwarekonzept des cITIcars 2020

3.2 Einbindung des cITIcars in die Lehre

Im Bereich der klassischen Informatik und der Ingenieur-Informatik finden sich viele Überschneidungen: Grundlagen zu Objektorientierter Programmierung oder Module zu Algorithmen und Datenstrukturen sind für die Studierenden beider Studiengänge wie vieles Basiswissen im Bereich der Informatik unumgänglich. Die Ingenieur-Informatik spezialisiert sich jedoch, ähnlich wie die bekanntere Technische Informatik, eher im Bereich der klassischen Ingenieurwissenschaften. Schwerpunkte werden im Studium besonders auf die Entwicklung von Eingebetteten Systemen, die systemnahe und die Mikroprozessorprogrammierung gesetzt. Im weiteren Verlauf des Studiums können sich die Studierenden anschließend weiter mit dem praktischen Entwurf von Elektronik und der Entwicklung von eingebetteten Prototypen beschäftigen. Im Kontext dieser Prototypenentwicklung hat sich über viele Jahre weiterhin der Einsatz von 3D-Druckern im Bereich der Ingenieur-Informatik an der THM etabliert, sodass die Studierenden lernen mit verschiedenen 3D-Druck-Techniken umzugehen und eigene CAD-Entwürfe anfertigen können. Darüber hinaus hat das Studium der Ingenieur-Informatik weitere Schwerpunkte im Bereich der Signalverarbeitung, der Computer Vision und des Maschinellen Lernens. Die Studierenden können n-dimensionale Signale sowohl mit klassischen Methoden, wie auch mit Deep-Learning-Verfahren be- und verarbeiten.
Um in der Ingenieur-Informatik den bestehenden Schwerpunkt im Bereich der mobilen Robotik zu vertiefen und zusätzlich eine Schnittmenge zwischen den bisher beschriebenen Themen zu schaffen, wurde das Projekt cITIcar gegründet. Hier finden die bereits beschriebenen Kerngebiete der Ingenieur-Informatik gebündelt einen Platz. In Modulen wie *Praktische Elektronik und Prototypenentwicklung* können die Studierenden den kompletten Prozess vom Planen, über das Entwerfen bis hin zum Fertigen einer Platine am Beispiel einer eigenen Steuerplatine für das cITIcar durchführen. Im *Praktikum Eingebettete Systeme* erlernen die Studierenden die saubere Programmierung von Mikrocontrollern und das Ansteuern verschiedener Peripherien in einem eingebetteten System, auf Basis der weit verbreiteten ARM Cortex-M Architektur. Im Bereich des Masterstudiums findet das cITIcar Einsatz im Modul *Regelungstechnik*, in dem die Studierenden praktische Erfahrungen beim Längs- und Querregeln eines autonomen Fahrzeugs sammeln können. In *Echtzeitsysteme* finden die Masterstudierenden die Möglichkeit, ein eigenes Echtzeitbetriebssystem (RTOS) für das cITIcar zu entwickeln und verschiedene Analysemethoden an dem Realprojekt anzuwenden.

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

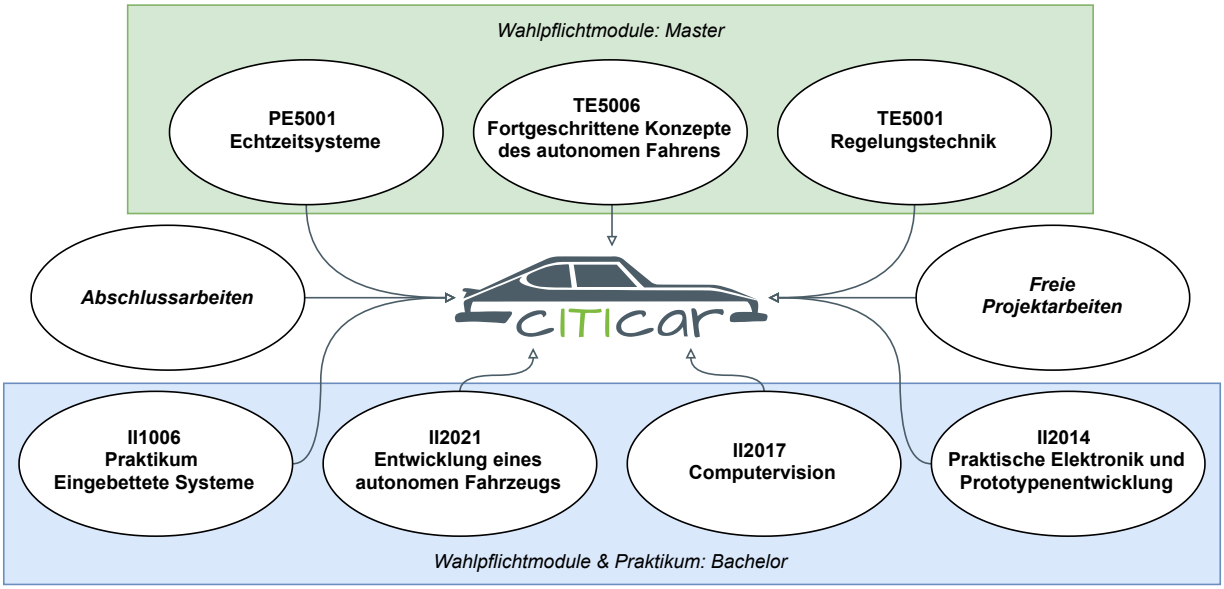


Bild 3: Einbindung des cITIcars in die Lehre der Informatik und der Ingenieur-Informatik

Neben den Einsatzgebieten in den beschriebenen, eher klassischen Lehrmodulen wurde zusätzlich das Curriculum des Bachelorstudiums um die Module *Computervision* und *Entwicklung eines autonomen Fahrzeugs*, und das Masterstudium um das Modul *Fortgeschrittene Konzepte des autonomen Fahrens* erweitert. Die Studierenden haben durch diese Wahlpflichtmodule die Möglichkeit, explizit in die Thematik der cITIcar-Entwicklung einzusteigen. In diesem Kontext kann das notwendige Wissen im Bereich des Robot Operating System (ROS), ebenso wie die Grundlagen für die notwendige Bildverarbeitung am cITIcar für Straßenrand-, Schild- oder Parklückenerkennung geschaffen und direkt angewendet werden. Auf diese Art können die Studierenden gezielt ihr favorisiertes Themengebiet am Projekt cITIcar fokussieren und sich im weiteren Studium in diesem Bereich spezialisieren. Seit Beginn des Projekts konnten bereits weit über zehn Abschlussarbeiten (Bachelor und Master) im Kontext des cITIcars durchgeführt werden. Die Themengebiete sind dabei weit gestreut: Abschlussarbeiten mit dem Schwerpunkt auf der *Modellierung der Hardware- und Software-Architektur eines autonomen Modellfahrzeugs in AADL*, die *Modellgetriebene Entwicklung eines Robotik-Systems für ein autonomes Fahrzeug* oder auch die *Modellierung von Hardware-Komponenten zur Integration in einer Simulationsumgebung verteilter, eingebetteter Systeme* bilden nur eine kleine Auswahl der erfolgreichen Thesen in dem Projekt.

4 Onlinelehre in der Pandemie

Eine der größten Herausforderungen, die es seit Beginn der Pandemie im Frühjahr 2020 in vielen Schulen, Hochschulen und Universitäten zu bewältigen gilt, ist die plötzliche Umstellung von Präsenzlehre auf Onlinelehre. Wie vorhergehend beschrieben, inkludiert das Projekt cITIcar viele Arbeiten, die am cITIcar direkt vor Ort unternommen werden müssen, weshalb das bestehende Lehrkonzept an vielen Punkten angepasst werden musste, um weiterhin erfolgreich zu funktionieren. Zunächst müssen hierzu die Probleme analysiert werden, welche durch die Onlinelehre entstanden sind, um anschließend adäquate Werkzeuge für die Lösung der Probleme zu finden und die Onlinelehre zu verbessern. Im Folgenden werden die entstandenen Probleme vorgestellt und im Anschluss die Lösungsansätze im Kontext des Projekts cITIcar präsentiert.

Instant Messaging Kommunikationsplattform
Zu Beginn der Onlinelehre war die Infrastruktur der THM für digitale Kommunikation zwischen Dozierenden und Studierenden kaum ausgebaut, woraus eine mangelhafte Erreichbarkeit für beide Par-

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

teien resultierte. Mit der Einführung einer niedrigschwelligen Instant-Messaging-Plattform konnten gleich mehrere Probleme gelöst und eine entscheidende Grundlage für die Onlinelehre geschaffen werden. RocketChat[3] ist eine Open-Source-Lösung, die zur Erhöhung des Datenschutzes auf hochschuleigenen Servern gehostet wird. Über dedizierte Kanäle wird hier gezielt themenspezifischer Austausch gefördert, während Direktnachrichten zwischen zwei oder mehreren Teilnehmenden den Rahmen für einen vertraulichen Austausch bieten. Da Nachrichten gespeichert bleiben, dient RocketChat darüber hinaus der einfachen Dokumentation von Diskussionen und Beschlüssen. Der Instant Messenger bewährte sich im Rahmen des cITIcar-Projekts und wurde schließlich hochschulweit freigegeben. Rund 1600 aktiv Nutzende in über 1100 Chaträumen profitieren mittlerweile an der THM von dieser Lösung.

Virtuelle Arbeitsräume
Während sich RocketChat sowohl für synchrone als auch asynchrone schriftliche Kommunikation anbietet, musste auch für den verbalen Austausch in Lehrveranstaltungen und Besprechungen ein virtuelles Äquivalent gefunden werden. Auch hier war Datenschutz eine besondere Priorität, wodurch nicht auf übliche Enterprise-Lösungen zurückgegriffen werden sollte. Mit dem Open Source Tool BigBlueButton[4], das ebenfalls auf hochschuleigenen Servern gehostet wird, können gemeinsame Termine (unabhängig vom Aufenthaltsort der Teilnehmenden) wahrgenommen werden. Weiterhin bieten virtuelle Arbeitsräume den Studierenden die Möglichkeit, sich jederzeit selbstorganisiert zu vernetzen und zusammenzuarbeiten. Auch dieses System war im initialen Projekt so erfolgreich, dass es im Anschluss in den Lehrkontext der gesamten THM übernommen wurde.

Containerisierung der Arbeitsumgebung mithilfe von Docker
Bereits während der Präsenzlehre war die Einrichtung der Entwicklungsumgebung für den ROS-basierten Teil des cITIcar-Systems ein komplexer und langwieriger Prozess: Die Studierenden mussten für den Einsatz der verwendeten ROS Version das zugehörige Ubuntu in der passenden Version installieren. Lange Zeit basierte das cITIcar auf *ROS Kinetic Kame*, welches wiederum ein Ubuntu in der Version 16.04 voraussetzt. Nach einer Umstellung des Codes auf *ROS Melodic Morenia* war es notwendig, dass die Studierenden künftig eine Ubuntu 18.04 Instanz auf ihrem System zur Verfügung hatten. Immer wieder kam das Feedback aus der Studierendenschaft, dass die Einrichtung der Entwicklungsumgebung zu komplex sei. Die Bereitschaft ein zusätzliches Ubuntu auf dem eigenen Gerät zu installieren, um an den zugehörigen Wahlpflichtmodulen teilzunehmen, sank. Diese Problematik bestand in der Präsenzlehre bereits, wurde jedoch durch die sich häufenden Problemstellen und die erschwerten Hilfsmöglichkeiten in der Onlinelehre weiter verstärkt. Um die Einrichtung der Entwicklungsumgebung zu erleichtern wurde daher eine containerisierte Arbeitsumgebung mithilfe von Docker geschaffen (siehe Abbildung 4).
Die Studierenden müssen sich lediglich ein einzelnes Repository klonen und anschließend plattformunabhängig[5] die beinhaltete *docker-compose.yml* Datei ausführen. Auf diese Art werden automatisiert verschiedene Container für die Entwicklung mit dem cITIcar erstellt: Die beiden Container ROS1 und ROS2 beinhalten jeweils die verschiedenen Softwareknoten des cITIcars und sind über einen weiteren Container, ROS Bridge, miteinander verbunden. So können die Studierenden sowohl in ROS1 als auch in ROS2 Programme entwickeln und direkt im Projekt integrieren. Mithilfe des Gazebo Containers wird zusätzlich eine Simulationsumgebung auf Basis von Gazebo[6] im System bereitgestellt. Hierzu wurde das komplette cITIcar nachmodelliert, sodass eine virtuelle Version des Fahrzeugs von den ROS-Knoten in Gazebo angesteuert werden kann. Die Studierenden können mit dieser Konfiguration alle Entwicklungsschritte, die nicht im Eingebetteten System stattfinden, am eigenen Computer realisieren. Sobald einzelne Softwarekomponenten vollständig in der Simulation getestet wurden, kann anschließend ein Test an der Hochschule stattfinden, um das reale Verhalten des Fahrzeugs zu prüfen.

---

3 https://de.rocket.chat/
4 https://bigbluebutton.org/
5 Getestet wurden unter anderem Linux-Distributionen wie Linux Mint, Manjaro, Ubuntu, Debian und ElementaryOS in verschiedenen Versionen.
6 https://gazebosim.org/

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

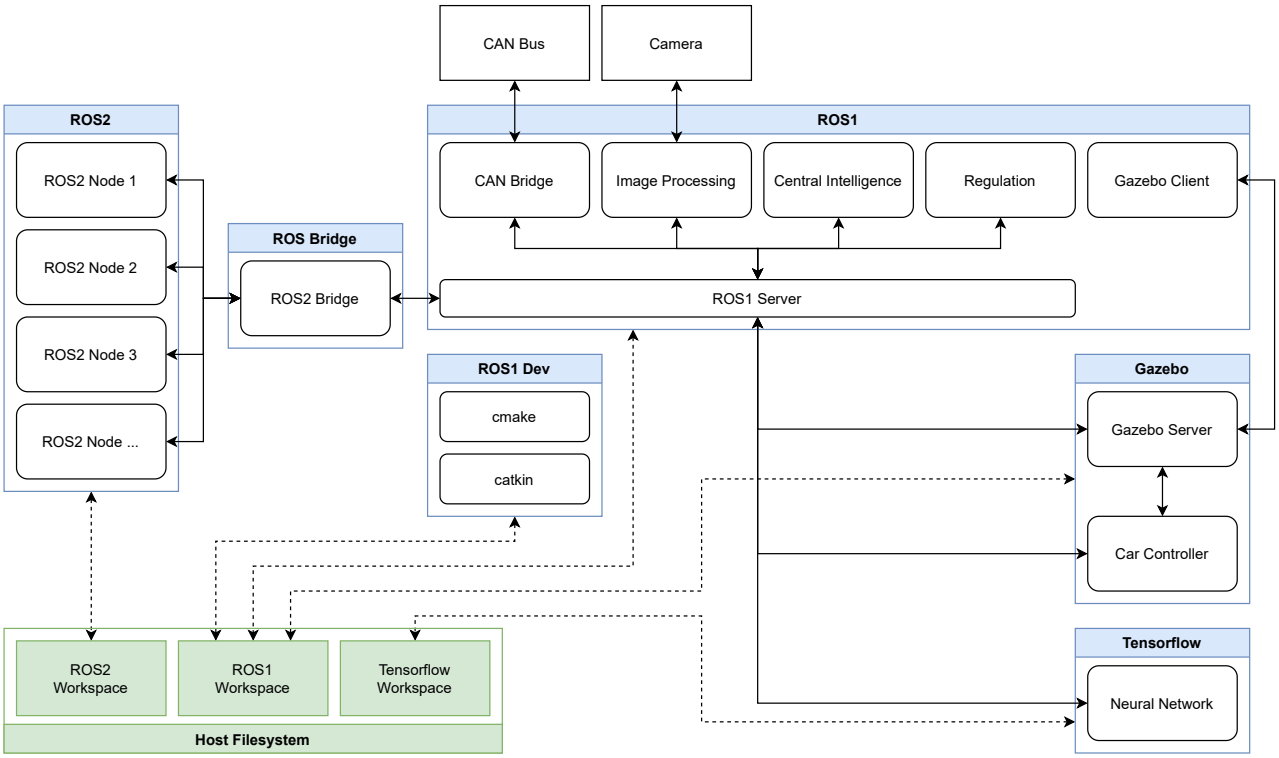


Bild 4: Struktur der containerisierten Arbeitsumgebung. Gestrichelte Pfeile stellen Dateisystem-Anbindungen dar. Durchgezogene Pfleile zeigen eine Kommunikation zwischen den Containern. Blaue Kästen sind Docker Container und der grüne Kasten stellt das Host-System dar. Runde Kästen dienen der Darstellung von verwendeten Softwarekomponenten. Farblose eckige Kästen stellen externe Peripherie dar.

Ausleihystem für Hardwarekomponenten

Im Rahmen des Projektes aber auch generell in sehr vielen Bereichen der Ingenieur-Informatik ist das Arbeiten mit unterschiedlicher Hardware gefordert. Dies betrifft verschiedenste Sensoren, Aktoren oder auch Mikrocontroller-Evaluationsboards, um nur ein paar Beispiele zu nennen. Im Regelbetrieb wird diese Hardware in den verschiedenen Laboren bereitgestellt. Wegen der Pandemie sind die Studierenden jedoch darauf angewiesen, diese Hardware auch Zuhause benutzen zu können. Hierfür wurde das Open Source Asset Management Snipe-IT [7] eingeführt. Dieses System wird über die hochschuleigene Serverinfrastruktur bereitgestellt. Es bietet die Möglichkeit, Hardware, Verbrauchsmaterialien und sogar Softwarelizenzen verwalten zu können. Hierbei können sowohl die einzelnen Komponenten verliehen, diese aber auch zu verleihbaren Sets zusammengestellt werden. Eine schnelle Identifizierung der Komponenten bei der Ausgabe beziehungsweise bei der Rücknahme lässt sich über vom System generierte QR-Code-Labels lösen. Ein weiterer Vorteil ist die Anbindung an das hochschuleigene LDAP-Verzeichnis. Dadurch müssen die Nutzungsdaten der einzelnen Studierenden und Mitarbeitenden nicht aufwendig gepflegt werden. Durch das digitale System war es auf der einen Seite möglich, die gesamten Hardwarekomponenten des Instituts zu inventarisieren und so auch stets über den Verbleib der Hardware informiert zu sein. Auf der anderen Seite hat es den gesamten Ablauf der Ausleihe stark vereinfacht, da nun eine transparente und dauerhafte Dokumentation existiert, bis hin dazu, dass die Studierenden automatisch an die terminierte Rückgabe der Hardware erinnert werden.

Remote Programmierung des Eingebetteten Systems

Um den Studierenden auch während der Pandemie die Arbeit mit physischer Hardware zu ermöglichen, wurde vor Ort im Labor der Hochschule ein Testaufbau erstellt. Dieser erlaubt es die daran angeschlossenen Mikrocontroller über einen Remote-Zugriff zu flashen und zu debuggen [9]. Grundsätzlich besteht der Testaufbau aus mehreren kleinen Komponenten. Das ganze System dahinter ist

7 https://snipeitapp.com/

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt. Die Steuerzentrale des Systems bildet auch hier ein NUC Mini-Computer, welcher als zentraler Server vor Ort arbeitet und über Programmieradapter in direkter Verbindung mit den Mikrocontrollern des cITIcars steht. Auf dem NUC laufen drei OpenOCD[8]-Instanzen, die aus dem VPN aus erreichbar sind. OpenOCD steht für Open On Chip Debugger und nutzt die angeschlossenen Programmieradapter, um das Debug-Interface der verschiedenen Mikrocontroller zu bedienen. Zusätzlich setzt OpenOCD noch das Server Protokoll des GNU Debuggers (GDB) um. Somit kann man sich mittels einer GDB Instanz auf die OpenOCD Server verbinden und die Mikrocontroller hierüber flashen und debuggen [9]. Die Studierenden haben die Möglichkeit sich direkt aus dem Projekt der Entwicklungsumgebung mit dem gewünschten Mikrocontroller zu verbinden, ohne wirklich vor Ort sein zu müssen, und mit diesem zu arbeiten. Um die Server zu erreichen, müssen sich die Studierenden zunächst in das VPN der THM eingewählt haben. Da man beim Debuggen auch die Reaktion des Fahrzeugs bzw. der Hardware auf bestimmte Eingaben überprüfen muss, verfügt der Testaufbau über verschiedene Kameras, die rund um das Auto platziert wurden. Die Kameras sind ebenfalls per USB an die Steuerzentrale angeschlossen. Ein Kamera-Stream kann von den Studierenden über Motion[9] abgerufen werden [9].

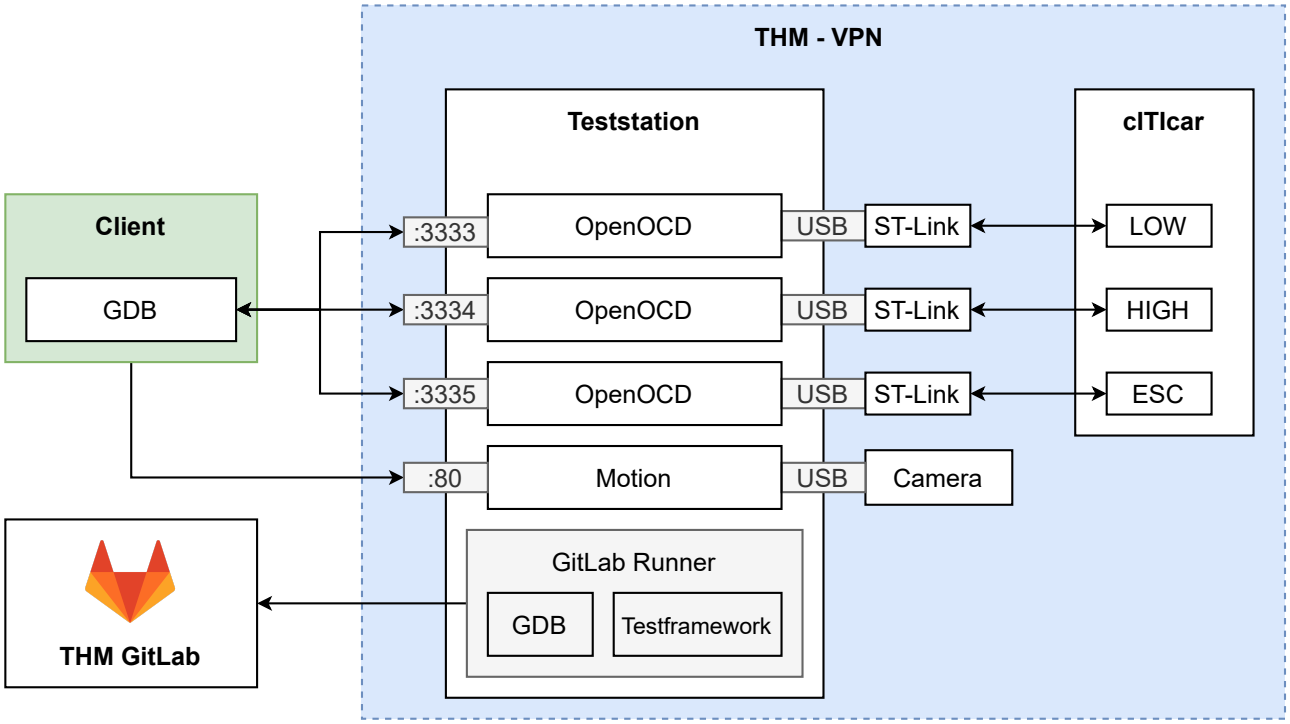


Bild 5: Aufbau des Systems zur Remote Programmierung mit GDB-Server, ST-Links, MCUs

Um gleichzeitig den Entwicklungsprozess zu verbessern, wurde für die verschiedenen Projekt-Repositorien in der Projektverwaltung je eine Continuous Integration Pipeline erstellt. Hierfür wurde ein GitLab Runner auf der Steuerzentrale eingerichtet. Dieser dient der Ausführung der Continuous Integration Pipeline bzw. der darin definierten Jobs. Die Pipeline dient der automatisierten Fehlersuche und dem Testen des Codes. Das Executable wird automatisiert gebaut und in einem anschließenden Job auf den jeweiligen Mikrocontroller geflasht. Um das Testen realer Hardware in den Continuous Integration Prozess mit aufzunehmen, wurde ein extra Testframework in Python entwickelt. Innerhalb des GitLab Runners wird in dem jeweiligen Job eine eigene GDB Instanz gestartet und anschließend wird das Framework sowie die Tests in den GDB geladen. Die Tests dienen der automatisierten Steuerung bzw. dem Debuggen des Mikrocontrollers über den GDB. Somit können die Tests verschiedene Debugging Szenarien durchlaufen und durch beispielsweise zusätzliche Peripherie auch ausgehende

8 https://openocd.org/
9 https://motion-project.github.io/

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Nachrichten und Signale des Mikrocontrollers überprüfen. Das Testframework führt die Tests nacheinander aus und setzt nach jedem abgeschlossenen Test die Ausführung des Mikrocontrollers zurück. Auf diese Art können die Studierenden von extern die Mikrocontroller programmieren und zusätzlich durch definierte Testszenarien die eigenen Programme testen, ohne vor Ort sein zu müssen [9].

5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich das langfristige Projekt cITIcar als ein sehr vielseitig einsetzbares und gut angenommenes Lehrprojekt beschreiben. Bei der Durchführung der Lehrmodule fällt jedoch sowohl in der Präsenz- wie auch in der Onlinelehre immer wieder auf, dass an einigen Stellen das Grundlagenwissen zum Bearbeiten bestimmter Aufgaben am Fahrzeug noch nicht weitgehend genug vorhanden ist, sodass ein Zeitkonflikt zwischen Grundlagenlehre und Projektarbeit am Fahrzeug entsteht. Auch wenn die Containerisierung der Arbeitsumgebung den Zeitaufwand bei der Einrichtung des cITIcar-Systems deutlich reduziert hat, benötigen die Studierenden besonders in der Anfangsphase im Projekt sehr viel Unterstützung, um eigenständig mit den Projektarbeiten beginnen zu können. Die Einrichtung und Verwaltung der verschiedenen Werkzeuge zur Unterstützung der Onlinelehre hat ebenfalls viel Zeit auf Seiten der Mitarbeitenden in Anspruch genommen. Abschließend lässt sich feststellen, dass die teilnehmenden Studierenden über viele Semester ein starkes Teamgefüge entwickelt haben und eine Weiterführung des Projekts am Fachbereich fest geplant ist.

6 Ausblick

Das Projekt cITIcar bietet immer wieder neue Möglichkeiten, um nach und nach weitere Module oder sogar Fachbereiche im Projekt zu integrieren. Auch technologisch entwickelt sich das Grundfahrzeug immer weiter, woran sich die verschiedenen Projektarbeiten und Lehrveranstaltungen orientieren können. Ein wechselseitiger Einfluss vom Projekt auf die Lehre und umgekehrt sorgt kontinuierlich für die Verbesserung von beiden.

Verstärkter Fokus auf Machine Learning
Die aktuelle Bildverarbeitung des cITIcars basiert komplett auf klassischer Bildverarbeitung [10]. Typische Operationen, wie das Anwenden von Filtern oder der Einsatz von Hough-Transformation und RANSAC-Algorithmen könnten durch alternative Ansätze aus dem Bereich des Machine Learnings ersetzt werden. Erste Schritte in modulbegleitenden Projektarbeiten in die Richtung von Neuronalen Netzen wurden bereits getätigt und sollen in der Zukunft weiter ausgebaut werden.

Vorgeschaltete Hardwareemulation mittels Renode
Wie in Abschnitt 4 beschrieben, können die Studierenden ihren Programmcode direkt von Zuhause auf die Mikrocontroller des cITIcars übertragen, um Debuggen und Testen zu können. Hier kann eine weitere Zwischenebene eingeführt werden, welche zunächst den neuen Programmcode in einer vorgeschalteten Hardwareemulation auf Basis des Renode[10]-Frameworks testet. Teile des Fahrzeugs wurden bereits für die Emulation modelliert und konfiguriert [11], sodass im weiteren Projektverlauf ein zweistufiges Testen, erst in der Emulation und anschließend auf dem echten Fahrzeug, realisiert werden kann. Dies minimiert das Risiko von Hardwarebeschädigungen und nimmt den Studierenden die Hemmschwelle, ihren Code auszuprobieren.

10 https://renode.io/

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Erweiterung des Testaufbaus um weitere Fahrzeuge
Um eine höhere Flexibilität im Umgang mit Testanfragen der Studierenden zu erreichen, soll das Testsystem um weitere Versuchsaufbauten des cITIcars erweitert werden. Hierbei könnten Teilaufbauten für bestimmte Hardwaregruppen, ebenso wie vollständige Komplettsysteme des Fahrzeugs realisiert werden. Wird beispielsweise für einen spezifischen Test nur die Hardware rund um einen speziellen Sensor oder einen Motor benötigt, kann sich direkt auf den Minimalaufbau verbunden werden, ohne unnötig weitere Ressourcen zu blockieren. Sollte ein Fahrzeug oder eine Testeinheit bereits von den Studierenden verwendet werden, können weitere Anfragen zum Testen und Debuggen direkt über das Testframework an eine freie Teststation weitergeleitet werden. Je nach Bedarf kann das System immer weiter skaliert werden, um allen Anforderungen für die Testaufgaben zu genügen und Wartezeiten bei der Entwicklung zu dezimieren.

Integration weiterer Studiengänge in das Projekt
Als weiterer Schritt im Lehrprojekt cITIcar kann die Einbindung des fachbereichseigenen Studiengangs *Social Media Systems (SMS)* realisiert werden. Die Studierenden können das cITIcar mithilfe von geplanten Kampagnen und Auftritten in Social Media in der Außendarstellung verstärken und so weitere Studierende für das Projekt begeistern. Hieraus könnte resultieren, dass weitere Fachbereiche der THM Interesse am Projekt cITIcar zeigen und das Projekt ebenfalls in die eigene Lehre mit einbetten. Zusätzlich können Studierende mit Hinblick auf die Finanzierung des Projekts auf Sponsoring-Suche gehen. Solch ein Projekt kann ebenfalls im Studiengang SMS durch die dem Studiengang inhärente wirtschaftliche Ausrichtung oder auch durch Studierende des Fachbereichs Wirtschaft angegangen werden. Weiterhin denkbar wären beispielsweise eine Partizipation am Projekt von Studiengängen wie Maschinenbau, Mechatronik (Fachbereiche M und ME) oder Elektro- und Informationstechnik (Fachbereiche EI und IEM).

7 Literatur

[1] Deloitte, „Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035 | Welche Veränderungen durch Robotaxis auf Automobilhersteller, Städte und Politik zurollen“, 2019. Zugegriffen: Aug. 01, 2020.
[2] R. Berger, „Anzahl der Patente mit Bezug zum autonomen Fahren weltweit von 2015 bis 2020“, 2020. Zugegriffen: Okt. 01, 2021.
[3] IPlytics GmbH, „Anzahl der angemeldeten Patente im Bereich autonomes Fahren weltweit in den Jahren 2009 bis 2019*“. Statista GmbH, Okt. 16, 2019. Zugegriffen: Aug. 15, 2020.
[4] ZSW, „Weltweite Bestandsentwicklung von Elektroautos in den Jahren 2012 bis 2019“. Statista GmbH, 2020. Zugegriffen: Aug. 15, 2020.
[5] M. Nolte, R. Graubohm, T. Form, und M. Maurer, „Carolo-Cup — Zehn Jahre automatisiertes Fahren im Maßstab 1:10“, Sonderprojekte ATZ/MTZ, Bd. 22, Nr. S2, S. 16–21, Dez. 2017.
[6] M. Nolte, T. Form, S. Ernst, R. Graubohm, und M. Maurer, „The Carolo-Cup Student Competition: Involving Students with Automated Driving“, in 2018 12th European Workshop on Microelectronics Education (EWME), Braunschweig, Germany, Sep. 2018, S. 95–99.
[7] J. Czekansky, „Konzeption und Realisierung der Hardware und Software eines autonomen Modellfahrzeugs“, Masterthesis (unveröffentlicht). Institut für Technik und Informatik, Technische Hochschule Mittelhessen, Aug. 20, 2020.
[8] A. Werner und R. Kaiser, „Autonomes Fahren in der Lehre“, in Echtzeit und Sicherheit, H. Unger, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 39–48.
[9] C. Haefke, „Ein Test-System für Continuous Integration auf Embedded Systems“, Bachelorthesis (unveröffentlicht). Institut für Technik und Informatik, Technische Hochschule Mittelhessen, Sep. 18, 2020.
[10] M. Mengel, „Bildverarbeitung eines autonomen Modellfahrzeugs im Maßstab 1:10“, Bachelorthesis (unveröffentlicht). Institut für Technik und Informatik, Technische Hochschule Mittelhessen, Sep. 20, 2019.
[11] S. Kunz, „Modellierung von Hardware-Komponenten zur Integration in eine Simulationsumgebung verteilter, eingebetteter Systeme“, Bachelorthesis (unveröffentlicht). Institut für Technik und Informatik, Technische Hochschule Mittelhessen, Sep. 17, 2020.

Open Access. © 2022 Jakob Czekansky, Moritz Schauer, Florian von Zabiensky, Diethelm Bienhaus
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Erfahrungen und Schlussfolgerungen nach drei Semestern Online-Lehre in einem Grundkurs Regelungstechnik

Struktur geben, Screencasts wieder verwenden und Präsenz aktiv nutzen

Prof. Dr. Birgit Rösel[1]

Zusammenfassung

Vorgestellt wird ein Konzept für einen Grundkurs Regelungstechnik, der die Erfahrungen nach drei Semestern Online-Lehre aufgreift. Die Basis ist die Vermittlung des theoretischen Wissens über Lehrtexte und Screencasts. Ergänzend wurden die Übungen in Fragestunden und die eigentliche Diskussion der Lösungen aufgeteilt, um aktivierende Methoden intensiver einsetzen zu können und nachhaltigeren Lernerfolg zu erreichen.
Durch die Vielzahl von Lehrformen ergibt sich die Notwendigkeit, die Struktur des Moduls explizit zu thematisieren. Der Beitrag vergleicht dabei zwei verschiedene Ansätze und stellt eine dafür gut geeignete Skriptform vor.
Im Beitrag wird auf die letzten drei Semester und die jeweils vorgenommene Studierendenbefragung Bezug genommen. Außerdem wird die Problematik bei der Wiederverwendung von Screencasts thematisiert.

Stichwörter

Blended Learning, Screencast, Lehrtext, aktivierende Lehre, Strukturierung

1 Ausgangssituation und Adaption an die Bedingungen der Pandemie

Schon vor der Pandemie hat die Autorin in einem 6 SWS Grundkurs zur Regelungstechnik mit Praktikum an der OTH Regensburg ein Blended Learning Konzept umgesetzt. Dabei stand die Vermittlung wesentlicher Inhalte des Moduls durch eigens erstellte Lehrtexte im Mittelpunkt. Die Studierenden haben diese Lehrtexte in der Selbststudienzeit gelesen und bearbeitet. Über eine Lernplattform sollten sie zudem Fragen zum Lehrtext beantworten und auch eigene Fragen formulieren. In einer zugehörigen Lehrveranstaltung wurde die Beantwortung der Fragen anonymisiert ausgewertet und die Fragen der Studierenden ausführlich beantwortet (siehe auch [1], [2]).
Vor der Pandemie geschah das natürlich im Hörsaal, im Wintersemester 2020/21 und im Sommersemester 2021 ausschließlich als synchrone Veranstaltung per Videokonferenzsystem. Durch dieses virtuelle Format gab es kaum Rückfragen. Im Wintersemester 2021/22 waren wieder Präsenzveranstaltungen möglich, so dass die übliche Diskussion bei der Auswertung der Lehrtexte nun wieder möglich war. Der seit November 2021 erforderliche Mitschnitt von Präsenzveranstaltungen erfolgt natürlich

[1] Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

Open Access. © 2022 Prof. Dr. Birgit Rösel
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

auch für diese Lehrveranstaltung. Durch diesen „hybriden“ Ansatz kann eine kleine Gruppe in Präsenz Studierender weiter direkt Fragen stellen, während Rückfragen bei den Konsumenten der Mitschnitte naturgemäß nicht möglich sind. Die Auswertung der Lehrtexte erfordert nach Ansicht der Autorin die Diskussion zwischen Lehrender und Lernenden und ist in Präsenz sehr viel intensiver.

Durch die im Frühjahr 2020 notwendige Umstellung auf einen ausschließlichen Online-Betrieb wurde dieser Blended Learning Ansatz durch Screencasts zur Theorievermittlung ergänzt. Die Autorin wählte asynchrone Screencasts, die in enger Anlehnung an das Skript eingesprochen, nachbearbeitet und im Laufe des Semesters über eine Videoplattform verfügbar gemacht wurden. Die gesamte theoretische Wissensvermittlung erfolgte so über die Lehrtexte und Screencasts. Wobei die Screencasts formal nicht ausschließlich in der Selbstlernzeit bearbeitet werden sollen, sondern die entsprechenden Lehrveranstaltungen durch die asynchrone Bearbeitung der Screencasts ersetzt werden.

Die zu den einzelnen Themen des Kurses gehörenden Übungseinheiten wurden im Rahmen dieser Umstellung in eine „Fragestunde“ und die eigentliche „Diskussion der Lösungen“ aufgeteilt (vergleiche Tabelle 1).
Die „Fragestunde“ nimmt jeweils Bezug auf die vorher zu bearbeitenden Screencasts und greift häufige Fehlvorstellungen und Schwierigkeiten durch zusätzliche Erläuterungen und gezielte Übungen auf. Außerdem werden die Übungsaufgaben der nächsten Übungseinheit erläutert und Hinweise zur Lösung gegeben. In der „Diskussion der Lösungen“ werden Lösungen der Studierenden aufgegriffen, vervollständigt und ergänzt.

Lehrform	**Durchführung**	**Inhalt**
Vorlesung	Präsenz	Einführung in das Modul, Vorstellung der Lehrformen
Screencasts 1 – 3	asynchron	Studienorganisation, Praktikum, Grundbegriffe
Praktikum P1	asynchron, virtuell	Unterschied zwischen Steuerung und Regelung
Lehrtext A	Präsenz	Aufgabe der Regelungstechnik, Steuerung und Regelung
Screencasts 4 – 6	asynchron	Modellbildung, Differentialgleichung, stationärer Zustand
Hörsaalübung 1	Präsenz	mit Fragestunde zu Übung 1 Steuerungs-/Regelungsszenarien erkennen, Blockschaltbild erzeugen stationärer Zustand, Modellbildung
Übung 1	Präsenz	Diskussion der Lösungen
Lehrtext D	Präsenz	Arbeitspunkt und Linearisierung
Screencasts 7 – 10	asynchron	Eigenschaften wichtiger Übertragungsglieder im Frequenzbereich
Fragestunde zu Übung 2	Präsenz	Zusammenfassung zum Kapitel „Eigenschaften im Zeitbereich“ Modellbildung mit Fokus auf Diskussion der Differentialgleichung
Übung 2	Präsenz	Diskussion der Lösungen
Praktikum P2	Präsenz	Einschätzen von Regelstrecken anhand des Verhaltens im Zeitbereich
Lehrtext G	Präsenz	Frequenzgang und Ortskurve

Tabelle 1: Struktur des Moduls (Auszug für die ersten drei Kapitel)

Die beiden Veranstaltungen sollen deshalb aufeinander folgen, aber je nach Stundenplan möglichst nicht direkt an zwei aufeinanderfolgenden Tagen, so dass die Studierenden die Erkenntnisse aus der „Fragestunde“ noch in ihre Betrachtung einbeziehen können. So entwickelt sich die „Diskussion der Lösung“ wirklich in eine solche und ist kein ausschließliches „Vorrechnen“ mehr.
Diese Übungseinheiten fanden 2020 live und, bis auf wenige Ausnahmen im Herbst 2020, per Videokonferenzsystem statt. Das eigentliche Erarbeiten der Lösung an der Tafel wurde deshalb auf elektronische Endgeräte verlegt. Entweder wurden die Herleitungen schrittweise am Gerät eingeblendet

Open Access. © 2022 Prof. Dr. Birgit Rösel
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

oder mit einem Stift direkt auf dem Bildschirm entwickelt. Die Übungseinheiten wurden jeweils mitgeschnitten und im Nachgang bearbeitet und asynchron zur Verfügung gestellt.
Im Wintersemester 2021/22 konnten diese Übungseinheiten an der OTH Regensburg zunächst in Präsenz durchgeführt werden. Dadurch hat sich eine gewisse Diskussionskultur entwickelt. Ab Ende November 2021, mit der Notwendigkeit, eine Online-Option bereitzustellen, wurden die Übungseinheiten zusätzlich zur Durchführung in Präsenz auch mitgeschnitten, nachbearbeitet und asynchron zur Verfügung gestellt. Die Anzahl der in Präsenz Teilnehmenden ist dadurch gesunken, aber die rege Diskussion in den Übungen ist erhalten geblieben. Die bereitgestellten Mitschnitte werden nicht nur von den Studierenden genutzt, die nicht an die Hochschule kommen, sondern auch von den in Präsenz Anwesenden.

Zusätzlich zu den eben beschriebenen Übungen, bei denen die Aufgaben vorab bekannt gegeben und im Idealfall von den Studierenden vorbereitet werden, wurden sogenannte Hörsaalübungen eingeführt. Diese finden alternativ zur der Kombination aus „Fragestunde“ und „Diskussion der Lösungen“ im Nachgang zu Screencasts statt. In den Hörsaalübungen werden ausgewählte Themen aus den vorher zu bearbeitenden Screencasts anhand gezielter Arbeitsaufträge und Fragestellungen vertieft. Eine vorherige Bekanntgabe der Aufgaben vorab erfolgt bei dieser Übungsform nicht.

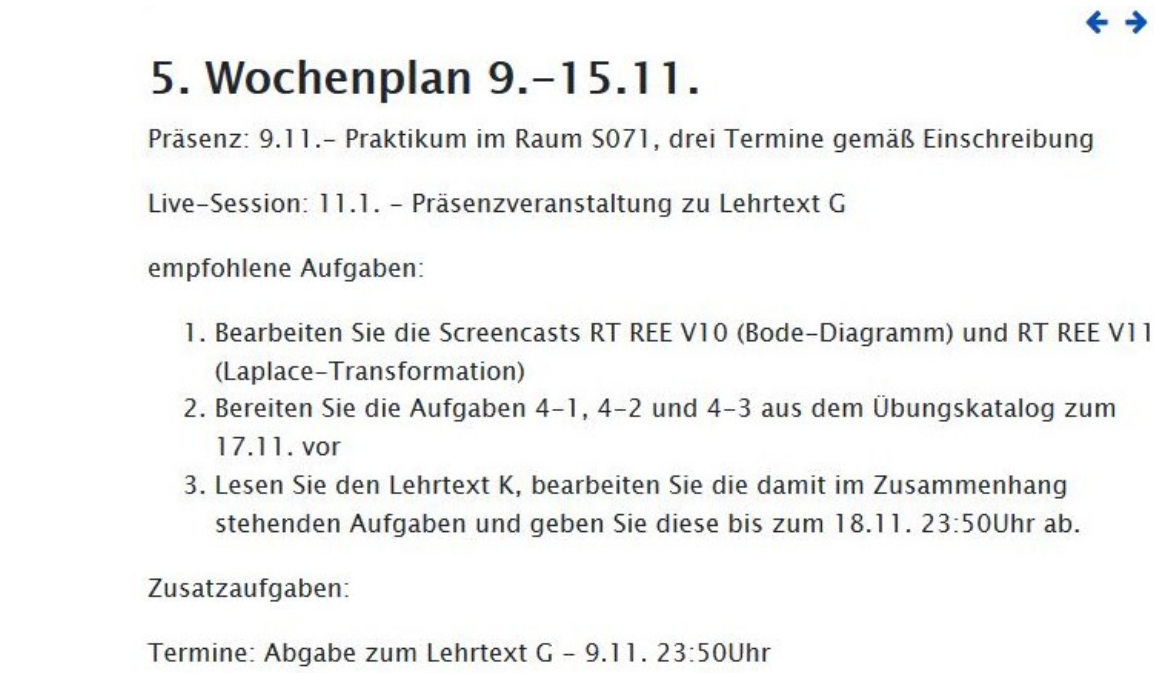
Insgesamt ist das gesamte Modul in den Pandemie-Semestern klarer in Theorievermittlung und Anwendung getrennt worden. Durch die Verdichtung und Entkopplung der Theorievermittlung vom 90-Minuten-Raster einer Lehrveranstaltung ist nun mehr Raum für die Anwendung und Vertiefung der Theoriekenntnisse in den verschiedenen Übungsformen.

2 Struktur des Moduls und deren Abbildung

Durch das oben beschriebene Konzept ergibt sich eine Vielzahl von Lehrformen (Lehrtexte und zugehörigen Just-in-Time-Teaching-Veranstaltungen, Screencast-Einheiten, verschiedene Übungsformen und Praktika), die teilweise in Präsenz, teilweise als asynchrone Lehrveranstaltung und teilweise in der Selbstlernzeit der Studierenden stattfinden.
Tabelle 1 zeigt einen Auszug aus der Abfolge der Lehreinheiten für die ersten drei Kapitel des Moduls. Um den Überblick zu behalten, hat die Autorin ein Portfolio aufgebaut, in dem alle Veranstaltungen mit Lernzielen und Lehrform, Inhalten sowie Anmerkungen zur Durchführung aufgeführt sind. Dieses über mehrere Semester aufgebaute Portfolio bildet die Grundlage für die Strukturierung des jeweils kommenden Semesters. Anpassungen im Ablauf sind in jedem Semester zum Beispiel erforderlich, um den gewünschten zeitlichen Abstand von Fragestunde bzw. Hörsaalübung und Übung abzusichern.

Die Abfolge der Lehrformen muss auch für die Studierenden eine deutlich erkennbare und nachvollziehbare Struktur haben. So ist nun ein detaillierter Ablaufplan, der auf Basis des Portfolios entwickelt und den Studierenden über die Lehr-Plattform zur Verfügung gestellt wird, fester Bestandteil des Moduls.
Im Wintersemester 2020/21 wurde dafür die von der Lehr-Plattform Moodle bereitgestellte Aktivität „Buch“ verwendet, wobei jedes Kapitel dieses „Wochenplan-Buchs“ die Lehrveranstaltungen und Arbeitsaufträge einer Woche enthielt. Exemplarisch ist dies in Abbildung 1 dargestellt. Diese Wochenpläne sind bei den Studierenden gut angekommen, waren aber von der Übersichtlichkeit und Bedienerfreundlichkeit nicht optimal. Aus diesem Grund hat die Autorin auf die Aktivität „Interaktiver Inhalt“ und den Editor `timeline` gewechselt. Mit dieser Aktivität kann das gesamte Semester wie auf einem Zeitstrahl abgebildet werden. Die einzelnen Einträge können ausgewählt werden und zeigen dann zusätzliche Informationen und beispielsweise Links zu den entsprechenden Unterlagen. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus diesem Zeitstrahl, der einen Teil der Lehrveranstaltungen aus Tabelle 1 darstellt. Die unterschiedlichen Hintergrundfarben markieren die zugeordneten Kapitel des Moduls.

Open Access. © 2022 Prof. Dr. Birgit Rösel
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +



5. Wochenplan 9.–15.11.

Präsenz: 9.11.– Praktikum im Raum S071, drei Termine gemäß Einschreibung

Live-Session: 11.1. – Präsenzveranstaltung zu Lehrtext G

empfohlene Aufgaben:

1. Bearbeiten Sie die Screencasts RT REE V10 (Bode-Diagramm) und RT REE V11 (Laplace-Transformation)
2. Bereiten Sie die Aufgaben 4-1, 4-2 und 4-3 aus dem Übungskatalog zum 17.11. vor
3. Lesen Sie den Lehrtext K, bearbeiten Sie die damit im Zusammenhang stehenden Aufgaben und geben Sie diese bis zum 18.11. 23:50Uhr ab.

Zusatzaufgaben:

Termine: Abgabe zum Lehrtext G – 9.11. 23:50Uhr

Bild 1: Beispiel für einen Wochenplan aus dem Wintersemester 2020/21

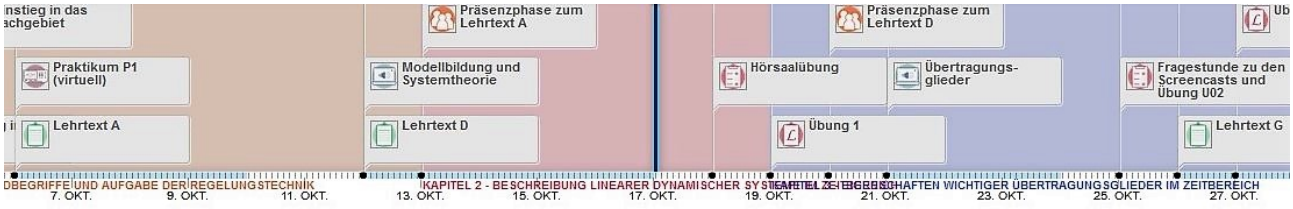


Bild 2: Ausschnitt aus dem Zeitstrahl für das Wintersemester 2021/22

Jeder Eintrag in diesem Zeitstrahl ist mit einem Icon markiert, aus dem die Lehrform und Durchführung identifiziert werden kann. Tabelle 2 zeigt eine Auswahl dieser an der Servicestelle für Digitale Lehre der OTH Regensburg eigens entwickelten Icons. Zur besseren Verknüpfung von Lernplattform und Skript werden diese Icons außerdem zur Strukturierung der Abschnitte der Lernplattform wie auch des Skripts verwendet.

	Präsenzveranstaltung		Screencast
	Lehrtext Leseauftrag		Hörsaalübung
	Praktikum		Fragestunde, Übung

Tabelle 2: Icons zur besseren Identifikation der Lehrform und Durchführung

In allen Befragungen war das Skript der Spitzenreiter bei der Frage nach notwendigen Unterlagen. Insofern ist die Anpassung des Skripts an die Struktur des Moduls vielversprechend, weil die Studierenden es als zentrales Element eines Moduls ansehen.
Bisher enthielt das Skript zum Modul eine Auswahl der im Rahmen der (Präsenz-)Lehrveranstaltung per Beamer gezeigten Inhalte. Dies hatte einige Nachteile, die durch eine LaTeX-Anwendung weitgehend

Open Access. © 2022 Prof. Dr. Birgit Rösel
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

beseitigt wurden. Diese Anwendung wurde der Autorin von Prof. Christine Niebler (OHM Hochschule Nürnberg) zur Verfügung gestellt.
Auch mit dieser Anwendung gibt es einen im Rahmen von Screencasts bzw. Präsenzveranstaltungen zu zeigenden „Foliensatz“. Dieser wird nunmehr aber durch Arbeitsbücher in zwei verschiedenen Versionen ergänzt – eine ausschließlich für die Dozentin und eine für die Studierenden.
Das Arbeitsbuch für die Studierenden dient diesen als Skript für das gesamte Semester. Die Idee dabei ist, dass sie einerseits die im Zeitstrahl abgebildete Abfolge wieder finden und andererseits ihre Aufgaben, Fragen und Anmerkungen direkt in dem Arbeitsbuch ergänzen können und so im Laufe des Semesters eine persönliche Stoffsammlung erarbeiten. Natürlich sind die „Folien“ wesentlicher Bestandteil, aber zusätzlich gibt es nun Hinweise auf zu bearbeitende Screencasts und vorzubereitende Aufgaben zu den einzelnen Übungen sowie die Bedeutung oder Motivation einzelner Abschnitte. Außerdem sind einige in den Hörsaalübungen zu bearbeitenden Aufgaben schon skizziert, so dass sich die Studierenden auf die Lösung der eigentlichen Aufgabe konzentrieren können.
Insbesondere in den online-lastigen Semestern hat sich diese Strukturierung auch im Skript gut bewährt, um die Verzahnung der Screencasts und Lehrtexte mit den Übungen deutlich zu machen.
Die Dozenten-Version des Arbeitsbuches enthält gegenüber der Studierenden-Version zusätzlich Inhalte, die in den einzelnen Lehrveranstaltungen vermittelt werden und natürlich die Lösungen der Aufgaben.

3 Zusammenspiel der einzelnen Lehrmethoden untereinander

Die konsequente Verlagerung der Theorievermittlung in die Screencasts und die Lehrtexte erfordert eine explizite Bezugnahme auf die vermittelten Inhalte in den anwendungsorientierten Lehreinheiten. Dies geschieht einerseits durch die auch für die Studierenden sichtbare Strukturierung und andererseits durch konsequente Bezugnahme auf die Inhalte in den anwendungsorientierten Lehreinheiten.

An die Lektüre der Lehrtexte schließt sich immer eine Veranstaltung zur Auswertung und Beantwortung der Fragen an. Insbesondere dann, wenn diese Auswertung in Präsenz erfolgt, stellt sich eine rege Diskussion zu den Inhalten des Lehrtextes ein. Diese ist bei der Durchführung als synchrone Lehrveranstaltung per Videokonferenzsystem leider fast vollständig ausgeblieben. Trotzdem bietet diese Just-in-Time-Teaching-Methode in jedem Fall die Möglichkeit, explizit die vorher von dieser Studiengruppe mitgeteilten Fragen zu behandeln.
Auf die Lehreinheiten mit Screencasts folgen immer Fragestunden oder Hörsaalübungen, in denen jeweils Themen aus diesen asynchronen Lehreinheiten in Präsenz wieder aufgegriffen oder vertieft werden. Unter anderem werden in diesen Lehrveranstaltungen zusätzliche Aufgaben mit direktem Bezug zu den Screencasts gestellt und direkt in Präsenz bearbeitet. In den kommenden Semestern soll zusätzlich mit Fragen zum jeweiligen Inhalt der Screencasts experimentiert werden, deren Antworten die Studierenden nicht vorab einreichen sollen, sondern die in der anschließenden Fragestunde in Präsenz in Kleingruppen diskutiert werden. Wichtig ist dabei insbesondere die Interaktion zwischen den Studierenden und zur Dozentin, die sich durch elektronische Abstimmgeräte noch verbessern lässt.
Obwohl die Notwendigkeit einer expliziten Erarbeitung der Theorie durch die Studierenden in der Selbststudienzeit zu Beginn des Semesters durch die Studierenden selbst als kritisch eingeschätzt wird, wird genau diese Tatsache in den Evaluationen am Semesterende sehr positiv bewertet. Als Gründe werden eine höhere Motivation durch die Möglichkeit, Bearbeitungszeit und -tempo selbst definieren zu können und der „Zwang“ die Fragen zu beantworten angegeben.

Erfolgreich scheint auch der Ansatz zu sein, die einzelnen Übungen mit einer Vorstellung der Aufgaben vorzubereiten. Dies erfolgt ebenfalls in der Hörsaalübung oder einer expliziten Fragestunde. Diese Aufteilung wurde in den letzten beiden Semestern erprobt. Es gibt relativ wenige Fragen in diesen Vorbereitungsstunden. Vielmehr erläutert die Dozentin die Aufgabenstellung und gibt Hinweise zum Ansatz für die Lösung. Der Anteil an Studierenden, die dann in der Übung selbst eine zumindest begonnene Rechnung vorweisen können, ist deutlich gestiegen. Und auch in der Übung gibt es nun mehr Nachfragen nach alternativen Lösungswegen.

Open Access. © 2022 Prof. Dr. Birgit Rösel
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Das Praktikum ist eine freiwillige Veranstaltung und vertieft einzelne Aspekte. Trotz der Freiwilligkeit wird es regelmäßig von 70% der in der Lernplattform eingeschriebenen Studierenden besucht. Zwei der vier angebotenen Praktikumsthemen finden als rein digitales Praktikum statt. Die Studierenden erhalten die Unterlagen und Programme über die Lernplattform. Die von ihnen eingereichten Ergebnisse werden in einer Auswertungsveranstaltung wie bei den Lehrtexten in Präsenz erörtert.
Die zwei nicht digitalisierten Versuche finden im Labor statt und dienen neben der Vertiefung und Anwendung der Theorie auch dazu, Experimentierkompetenzen auszubauen. Zu einem dieser Versuche kann auch ein Messbericht eingereicht werden, der bewertet wird und mit wenigen Bonuspunkten zur Verbesserung des Prüfungsergebnisses eingesetzt werden kann.

4 Optionen für die Rückkehr zur Präsenzlehre

Mit der Rückkehr zur Präsenzlehre soll der beschriebene Ansatz konsequent weiterverfolgt werden – eine Mischung aus asynchron zur Verfügung gestellten Lehrmedien (Screencasts, Lehrtexte) und die Vertiefung der dort vermittelten Inhalte mit JiTT-Einheiten, Peer Instruction in Präsenzübungen und der intensiven Diskussion von Übungsaufgaben. Dabei sieht das Konzept vor, dass auch dann, wenn eine uneingeschränkte Präsenzlehre wieder möglich ist, ein Teil der Lehrveranstaltungen ausschließlich asynchron stattfindet. Welche Lehreinheiten dies betrifft, ist dabei keine Frage des Terminkalenders der Dozentin. Vielmehr folgt der Ablauf didaktischen Gesichtspunkten.

Die Mischung aus asynchronen und Präsenzlehreinheiten wird auch von den Studierenden in verschiedenen Befragungen immer als sehr motivierend bezeichnet. Besonders hervorgehoben wird dabei die Möglichkeit, sich mit den Screencasts die Theorie im eigenen Tempo aneignen zu können. Das Spektrum reicht dabei von „doppelter Geschwindigkeit“ bis zu mehrfachem Bearbeiten einzelner Passagen der Screencasts. Als besonders wichtig wurde dabei in den Befragungen hervorgehoben, dass es immer wieder Präsenzveranstaltungen an der Hochschule für Übung, Diskussion und Vertiefung gibt. Die Präsenzveranstaltungen, insbesondere Übungen und Praktika, werden von den Studierenden als wichtigste Lehrmethoden nach dem Skript angesehen. Erst danach folgen die Screencasts. Obwohl während des Verbots von Präsenzveranstaltungen auch Vorlesungen und Übungen live per Videokonferenzsystem angeboten wurden, werden diese von den Studierenden in den Befragungen als nicht sehr wichtig eingestuft. Offenbar geht es um den direkten Austausch an der Hochschule, den ein Studium ja eigentlich auch ausmacht.

Da die Theorievermittlung über die Screencasts erfolgt und auch zukünftig erfolgen soll, legt die Autorin besonderen Wert auf die Qualität der Screencasts. Es handelt sich dabei nicht um Mitschnitte von Lehrveranstaltungen sondern die Screencasts werden zielgerichtet eingesprochen und nachbear-

Bild 3: Auswahl einiger Abbildungen für den Abspann der Screencasts aus dem Sommersemester 2021

Open Access. © 2022 Prof. Dr. Birgit Rösel
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

beitet. Der dafür notwendige enorme Aufwand rechtfertigt eine Wiederverwendung. Zu dem Modul gehören knapp 30 Screencasts mit einer durchschnittlichen Dauer von 20 Minuten, wobei die Spanne von 8 bis 36 Minuten reicht.
Alle Screencasts folgen einem einheitlichen Muster: nach dem Urheberrechtshinweis zu Beginn folgt ein kurzes Intro, das die Dozentin im Video zeigt und in dem der Inhalt des Screencasts vorgestellt wird. Anschließend folgt der eigentliche Inhalt, in dem die Dozentin zu hören, aber nicht zu sehen ist. Dadurch ist eine nachträgliche Änderung oder Ergänzung von Inhalten einfacher möglich ohne den ganzen Screencast neu einsprechen zu müssen. Im Abspann ist dann wieder die Dozentin zu sehen. Meist erfolgt im Abspann auch ein Hinweis, was als nächstes zu tun ist. Jedes Video schließt mit einem Abspannbild und dem Erstell- sowie gegebenenfalls Änderungsdatum.
Das Abspannbild soll etwas Persönliches zeigen. Die Autorin hat sich entschieden, den Blick in den eigenen Garten im Laufe des Semesters „preiszugeben“ (siehe Abbildung 3).

Die durch die Beschränkungen der Pandemie quasi erzwungene Digitalisierung der Lehre führte zu einem angepassten Konzept, dass auch bei Rückkehr in die Präsenz erfolgversprechend scheint. Die Mischung aus asynchronen und Präsenzlehrveranstaltungen erzwang einerseits eine konsequente Strukturierung bis in die einzelnen Lehrveranstaltungen, bietet aber andererseits auch die Möglichkeit, die Präsenz aktiver zu gestalten und verspricht so einen nachhaltigeren Lernerfolg.

5 Literatur

[1] T. Köhler, B. Rösel (2019): Experiences with a new digitalized concept for teaching control theory as minor subject at a university of applied science. *IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/EDUCON.2019.8725217

[2] B. Rösel (2020): A concept of a mainly digitalized course on control theory including problembased practical units and digital supported exams. *6th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'20)*, DOI: http://dx.doi.org/10.4995/HEAd20.2020.11112

Open Access. © 2022 Prof. Dr. Birgit Rösel
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

18. AALE-Konferenz
Pforzheim, 09.03.-11.03.2022

Anwendungsfälle und Konzeptentwicklung eines Pedelec-Prüfstandes

T. Weickert[1], W. Götzmann[2]

Zusammenfassung

Die Fakultät für Elektrotechnik der Hochschule Mannheim hat ein Leitprojekt Elektromobilität initiiert, in dessen Rahmen u.a. ein Prüfstand für elektrisch unterstützte Fahrräder, die sogenannten Pedelecs, entwickelt werden soll. Mit dem Prüfstand und seiner Entwicklung sollen zum einen Studierende an das Thema Elektromobilität herangeführt werden, andererseits sollen den Studierenden praxisnahe Arbeiten begleitend zu Vorlesungen ermöglicht werden. Dabei soll der Prüfstand aber auch tatsächliche Anforderungen der Zweirad-Industrie adressieren.

Der Posterbeitrag trägt zunächst Anwendungsfälle für Pedelec-Prüfstände zusammen. Darauf aufbauend werden Anforderungen für den Prüfstandsaufbau sowie benötigte Betriebsmodi abgeleitet.

Stichwörter

Pedelec, Elektrofahrräder, Prüfstand

1 Einleitung und Motivation

Durch den sich immer rascher vollziehenden Klimawandel ist Elektromobilität bereits in aller Munde und wird in den kommenden Jahren weiter an Bedeutung gewinnen. Während die Elektromobilität im Automobilbereich noch vergleichsweise am Anfang dieser Entwicklung steht, haben elektrisch unterstützte Zweiräder (EPACs – electrically power assisted cycles) im Jahr 2020 bereits einen Marktanteil von fast 40 % erreicht. [2]
Aus diesen Gründen hat die Fakultät für Elektrotechnik der Hochschule Mannheim ein Leitprojekt Elektromobilität initiiert, in dessen Rahmen u.a. ein Prüfstand für elektrisch unterstützte Fahrräder, die sogenannten Pedelecs, entwickelt werden soll. Mit dem Prüfstand und seiner Entwicklung sollen zum einen Studierende an das Thema Elektromobilität herangeführt werden, andererseits sollen den Studierenden praxisnahe Arbeiten begleitend zu Vorlesungen ermöglicht werden. Dabei soll der Prüfstand aber auch tatsächliche Anforderungen der Zweirad-Industrie adressieren.

2 Anwendungsfälle für einen Pedelec-Prüfstand

Im Gespräch mit Pedelec-Herstellern sowie durch Vergleich öffentlich verfügbarer Informationen kommerzieller Pedelec-Prüfstände lassen sich eine Reihe von Anwendungsfällen für Pedelec-Prüfstände sammeln:

1 Hochschule Mannheim, Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen
2 Hochschule Mannheim, Fakultät für Elektrotechnik

Open Access. © 2022 T. Weickert, W. Götzmann
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

- Normprüfung nach DIN EN 15194
- Reichweitentests (z.B. R200 Test des Zweirad-Industrieverbands ZIV)
- Weitere Qualitätssicherung (End-of-Line Tests, Überhitzung, Unterspannung, Rekuperation…)
- Wirkungsgrad- und Effizienzmessungen

Zunächst soll der Pedelec-Prüfstand die Anforderungen der standardisierten Tests aus der Norm DIN EN 15194 [1] sowie des standardisierten Reichweitentest R200 [3] erfüllen.
Die EN 15194 ist sehr umfangreich. Im Rahmen des Projekts wurde entschieden, dass sich der Prüfstand auf die elektrischen Anforderungen konzentrieren soll, insbesondere auf die Prüfung der max. Unterstützungsgeschwindigkeit, die Anfahrunterstützung, das Leistungsmanagement sowie die Messung der Höchstleistung.
Der R200-Test soll im Gegensatz dazu ein vergleichbares Maß für die Reichweite der Batterie liefern, indem in einem standardisierten Test eine Reichweite ermittelt und dann nach bestimmten Normierungsformeln auf eine elektrische Unterstützung von 200 % umgerechnet wird.

3 Prüfstandsaufbau

Basierend auf den obigen Anwendungsfällen können Anforderungen für den Aufbau des Prüfstands abgeleitet werden. Beispielsweise muss für den R200-Test die Radaufstandskraft am hinteren Rad 500 N betragen. Dies bedingt, dass die Bremsrollen, die die auf das Pedelec bremsenden Kräfte darstellen, mit einer vorgebbaren Kraft angedrückt werden können. Eine weitere Anforderung ist, dass sowohl Pedelecs mit Vorderrad- als auch mit Hinterrad- oder Mittelmotor getestet werden können. Daraus resultiert, dass zwei Bremsrollen (vorne und hinten) benötigt werden, die beide angepresst werden müssen.

Bild 1: Aktueller Stand des Prüfstandsaufbaus

Der aktuelle Stand des mechanischen Prüfstandsaufbaus, der entsprechend den obigen Zielen und Bedingungen entwickelt wurde, ist in Bild 1 zu sehen.
Pneumatische Zylinder pressen die Bremsrollen an. Die Bremsrollen werden vom Bremsmotor angetrieben, der mit Zahnriemen verbunden ist. Beim Bremsen arbeitet der Motor im Generatorbetrieb. Die entstehende Leistung kann nicht zurückgespeist werden, daher wurde ein Bremswiderstand mit 600 W Leistung verbaut. Ein Getriebe mit einer Übersetzung von 4:1 zwischen Bremsrollenmotor und Bremsrolle sorgt für eine bessere Ausnutzung des Drehmomentbereichs des Motors.
Der Antrieb der Pedale wird durch zwei Servomotoren realisiert, die den wechselseitigen Fahrertritt simulieren können. An den Motoren sind Getriebe mit Übersetzungsverhältnis 40:1 angeflanscht, um auch hier die Stellbereiche der Motoren besser auszunutzen. Die Motoren sind über eine Rahmenkonstruktion so horizontal und vertikal verstellbar, dass sie auf die Geometrie des getesteten Fahrrads eingestellt werden können.
Um automatisches Schalten zu ermöglichen, wurden zwei Linearmotoren eingebaut, die die Schaltzüge bewegen.

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Betriebsmodi

Zum Betrieb des Prüfstandes sind verschiedene Modi für die jeweiligen Tests notwendig, wie den R200-Test, die Prüfung der max. elektr. Unterstützung etc.
Darüber hinaus werden aber weitere Betriebsmodi benötigt:

- Fahrrad einmessen: Bestimmung der realen Übersetzungen zwischen Rad und Bremsrolle (inkl. Schlupf, dynamischer Rollradius etc.), der Positionen der Linearmotoren zum Schalten gewünschter Gänge etc.
- Komponententest: Manuelles Ansteuern einzelner Komponenten
- Manueller Fahrradtest: Manuelle Vorgabe von Werten (z.B. Fahrradgeschwindigkeit). Im Gegensatz zum Komponententest sind die Pedalantriebe immer gekoppelt, um den Fahrertritt zu simulieren.
- Fehlerbehandlung: Reaktion auf Fehler des Prüfstandes

Eine vollständige State Machine kann als Zustandsgraph mit allen nötigen Übergängen modelliert werden. Diese ist in Bild 2 zu sehen.

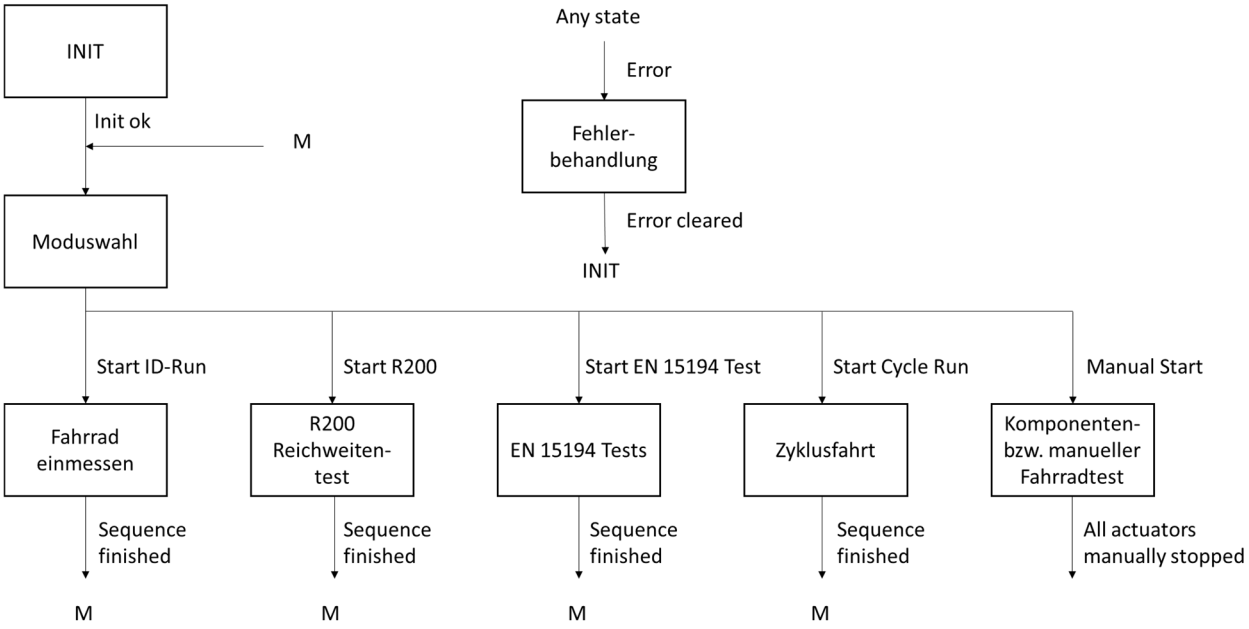


Bild 2: Main State Machine

Nach Initialisierung aller nötigen Parameter und Plausibilisierung der initialen Eingangssignale befindet sich die Anlage im Betriebszustand „Moduswahl“, von dem aus zu den einzelnen Betriebsarten verzweigt wird. In den automatischen Betriebszuständen „Fahrrad einmessen“, „R200 Reichweiten-Test“ und „EN 15194 Tests“ laufen Schrittketten ab, die die automatisierten Abläufe steuern. Über den Zustand „Zyklusfahrt“ können generierte oder gemessene Fahrzyklen abgefahren werden. Schließlich können in den Zuständen „Komponententest“ bzw. „Manueller Fahrradtest“ wie oben beschrieben manuelle, d.h. nicht automatisierte, Tests gemacht werden. Das Ende eines automatischen Ablaufs bzw. das manuelle Stoppen aktiver Motoren führt einen wieder zur Moduswahl.
Ein Fehler hingegen führt in den Zustand „Fehlerbehandlung“. Dieser wird nach erfolgreicher Rücksetzung des Fehlers wieder in den „Init“-Zustand verlassen, um sicherzugehen, dass der Prüfstand wieder sauber startet.

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

5 Software-Struktur

Die Software befindet sich aktuell noch in der Entwicklung. Zurzeit wird erwartet, dass ein einzelner Task zur Steuerung des Prüfstandes genügen wird.
Das Programm der Prüfstandsteuerung soll den charakteristischen Ablauf einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) nach dem sogenannten „EVA-Prinzip“ aufweisen. Die Abkürzung „EVA“ gilt stellvertretend für die Wortlaute Eingabe, Verarbeitung und Ausgabe. Im Programmprozess wird kontinuierlich nach diesem Ablauf verfahren.
Entsprechend diesem Prinzip wird ein Programm (PRG) Input verwendet, das alle Eingangsvariablen von den Eingangsklemmen liest und in physikalische Werte konvertiert. Entsprechend gibt es ein PRG Output, das nach der Verarbeitung die Ausgangswerte in Feldbuswerte (Integer) skaliert und die Aktoren ansteuert.
Die Programmstruktur gliedert sich in die folgenden Hauptprogramme, s. Bild 3:

- Input (HW-Eingänge einlesen und umrechnen)
- Main State Machine (Zustandsautomat, Bestimmung Betriebszustand, Aufruf der entsprechenden Unterprogramme)
- Actuator Control (Funktionen zur Ansteuerung der einzelnen Aktoren, z.B. Freigaben für die Motoren, Regler etc.)
- Output (Variablen umrechnen und an die Ausgänge geben)

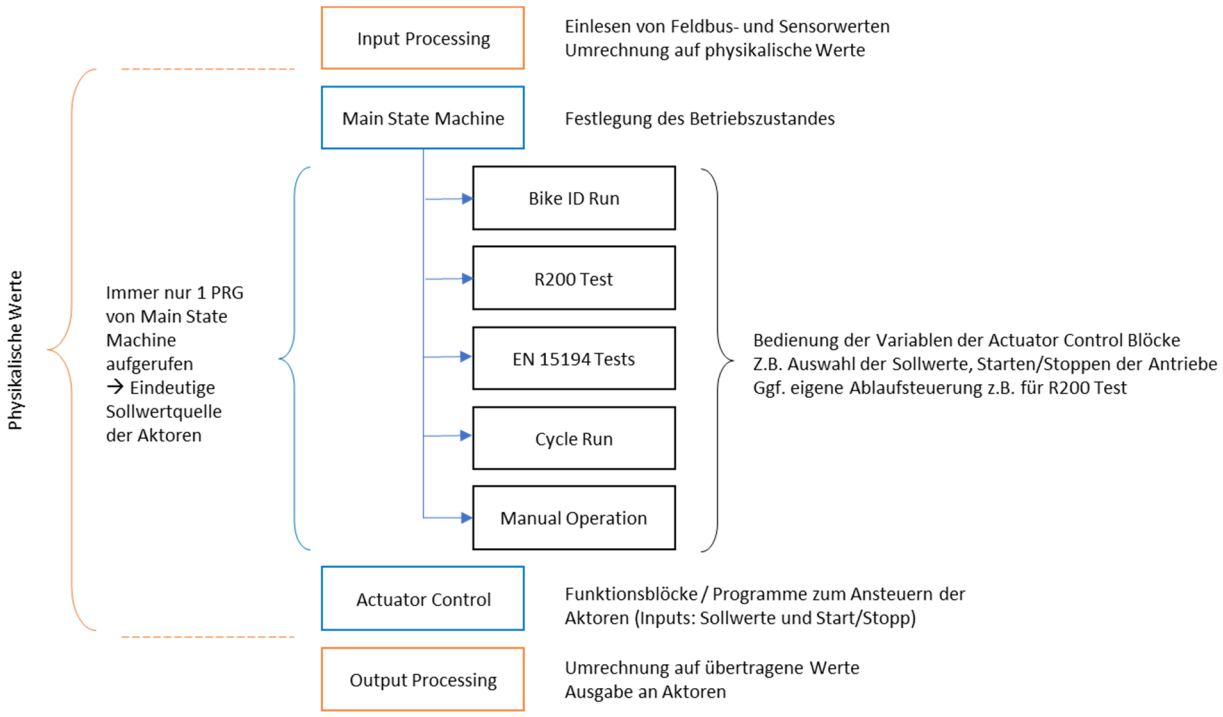


Bild 3: Programmstruktur

Durch dieses Konzept ist auch sichergestellt, dass es zu keinen Konflikten der Aktoransteuerung kommt. Die Sollwerte werden in den Unterprogrammen generiert, von denen immer nur eines von der State Machine aufgerufen wird. Das PRG Actuator Control nimmt die Sollwerte entgegen und steuert die Aktoren an. D.h. es gibt nur einen kontrollierenden Funktionsbaustein je Aktor.

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

6 Einbindung in die Lehre

Schwerpunkt der aktuellen studentischen Arbeiten ist die Softwareseite. Studierende lernen in Studien-, Projekt- und Abschlussarbeiten die Programmierung einer bzw. Automatisierung mittels einer SPS kennen. Die aktuellen entsprechenden Arbeiten beschäftigen sich mit der generellen Programmstruktur, der Kommunikation zwischen den Programmen und den Datenstrukturen sowie der Implementierung der State Machine. Anschließend können die einzelnen Abläufe (R200 Test, Normtest etc.) implementiert werden.
Auch regelungs- und messtechnische Fragestellungen lassen sich anhand des Prüfstandes praktisch untersuchen. So beschäftigten sich vergangene Arbeiten mit der Robustheit der Linearaktor-Regler gegenüber Messfehlern.
Im Rahmen des Masterstudiengangs „Mechatronik“ ist ein zweisemestriges „Mechatronisches Projekt“ im Curriculum vorgesehen. Studierende arbeiten in Zweier- oder Dreierteams an einer gestellten Aufgabe. Hier ermöglicht der Pedelec-Prüfstand als mechatronisches System viele interessante Aufgaben zur praktischen Bereicherung des Studiums. So kann eine Projektgruppe im Laufe der zwei Semester beispielsweise Erfahrung in der SPS-Programmierung sammeln, Kennlinien der pneumatischen Aktoren mit Messungen abgleichen und mechanische Erweiterungen des Prüfstandes konstruieren.
Da insbesondere auf der Softwareseite noch viel zu tun ist, wird das Projekt „Pedelec-Prüstand“ sicherlich noch für einige Semester praxisnahe Aufgaben für studentische Arbeiten und Projekte bieten.

7 Literatur

[1] DIN EN 15194. Fahrräder - Elektromotorisch unterstützte Räder - EPAC. EN 15194:2017, 2017
[2] Statista: Absatz von E-Bikes in Deutschland von 2010 bis 2020. Online verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152721/umfrage/absatz-von-e-bikes-in-deutschland/, 2021
[3] Zweirad-Industrieverband (ZIV): Normierte Reichweite R200 für E-Bikes, 2018

Open Access. © 2022
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

Autorenverzeichnis

A
Albers, Franziska, 45, 85

B
Barth, Mike, 33, 155, 183
Bartsch, Thomas, 45, 85, 145
Bause, Fabian, 125
Bernöcker, Anton, 115
Bienhaus, Diethelm, 331
Boden, Andreas, 233
Brela, Matthäus, 53
Büchau, Bernd, 11

C
Cavaterra, Alessio, 97
Chavez, Victor, 277
Cruz, Fernando, 277
Czekansky, Jakob, 331

D
Daas, Janis, 125
Detje, Johannes Silas, 193
Doll, Prof. Dr.-Ing. Konrad, 203
Drath, Rainer, 33, 183, 247

E
Eberle, Simon, 293

F
Faller, Clemens, 303
Fay, Alexander, 33, 155, 165
Fluchs, Sarah, 247
Franz, Julia, 237
Fuchs, Uwe, 63

G
Götzmann, Walter, 349
Gröbe, Gerald, 11
Große, Norbert, 285
Günther, Norman, 257

H
Habiger, Pascal, 33, 183
Härle, Christian, 155
Herdt, Anika, 73
Hildebrandt, Gary, 33, 183
Hönig, Jana, 237
Hubert, Andreas, 203

J
Jäkel, Jens, 23
Jentner, Chris, 73
John, Jan, 285
Jung, Janis, 203
Jürgens, Andreas, 267

K
Khushairi, Muhammad, 267
Kowalke, Dennis, 45, 85
Kranzer, Simon, 311
Kröhn, Dr. Michael, 203

L
Lambeck, Steven, 97
Leiter, Nina, 115
Littfinski, Daniel, 237

M
Marseu, Moritz, 33
Meißner, Jan-Eric, 193
Mostafa, Youssef, 321
Münster, Carlos, 237

N
Nekrasov, Ivan, 105
Neuner, Tobias, 53
Niemann, Karl-Heinz, 165

O
Oßwald, Kai, 293
Othman, Moaid, 213

P
Peter, Hans, 267
Petrovic, Marc, 233
Pfeifer, Denis, 237
Pilous, Yannick, 285
Prell, Bastian, 257
Pullela, Akhila, 135

R
Raßmann, Rando, 125
Rauschenbach, Thomas, 145

Reiche, Leif-Thore, 165
Reiff-Stephan, Jörg, 257
Reimschüssel, Sophie, 63
Röck, Sascha, 237
Rösel, Birgit, 341
Roth, Armin, 237
Ruchay, Marco, 277
Runge, Maxim, 165

S
Sade, Sercan, 45, 85
Sand, Guido, 63, 73
Saßnick, Olaf, 311
Schauer, Moritz, 331
Schaupeter, Lars, 175
Scheidig, Marcel, 73
Scheifele, Christian, 237
Schleifer, Kevin, 23
Schneider, Frederik, 223
Schnierle, Marc, 237
Schönfeld, Tobias, 125
Schulz, Thomas, 105
Schulze, Rico, 23
Schwoll, Artur, 303
Seitz, Matthias, 267
Stadler, Jochen, 203
Stöcker, Christian, 213
Stolpmann, Alexander, 193
Stuke, Tobias, 145

T
Tastan, Emre, 247
Thiel, Robert, 23

U
Ulmer, Jessica, 321

V
Verl, Alexander, 237
Versen, Martin, 115
Vette-Steinkamp, Matthias, 175
von Zabiensky, Florian, 331

W
Wehnert, Camilla, 237
Weickert, Thomas, 349
Weiper, Franz Josef, 233
Wings, Elmar, 135
Wittenberg, Carsten, 223
Wohlschläger, Maximilian, 115
Wollert, Jörg, 277, 321
Wree, Christoph, 125

Z
Zehner, Marcel, 97
Zieringer, Christoph, 223
Zor, Ayhan, 33