Bedarfsorientierte Rekonfiguration einer Co-Simulation für diskrete Fertigungsanlagen

C. Härle¹, M. Barth², A. Fay³

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, das 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 An-

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

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 Autorenteam 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 Autorenteam, 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 Bedieneingabe 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 Autorenteam 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.

3.1 Einordnung bezogen auf Vorveröffentlichungen des Autorenteam

Das im Rahmen von Vorveröffentlichungen des Autorenteam 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 bestimmte 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

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 Autorenteam [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 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 parametrisiert. 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.

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 beschrieben 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 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 beispielsweise 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.

Bild 4: Antriebswechsel als Umbauszenario – Umbau von Pulsantrieb (links) zu Schrittmotor (rechts).

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.

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 Salzschnmelzen 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 Wannen-system 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 her-

vorgehoben) 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 Flüssigkeitsverschleppung 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 Inbetriebnahme-phase 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 Teilmockel Simulation der Plattform Industrie 4.0.

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 – Bedienungsanleitung, <https://shop.jentner.de/media/a8/40/ca/1617282672/DIGITAL-II-Ver-2-0-de.pdf>, [letzter Aufruf: 07.12.2021].