Geschlossener Informationsfluss über den gesamten Produktlebenszyklus als Wegbereiter zur effizienten Refabrikation - Stand der Technik und Ausblick

Lars Schaupeter¹, Matthias Vette-Steinkamp¹

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

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 refabrikierbare 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]

Durch den Refabrikationsprozess kann so der Energieverbrauch und Emissionsausstoß im Vergleich zu einer Neuherstellung erheblich 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 Materialien 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.

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 befassen 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.

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

der entsorgten Elektrogeräte durchgeführt und die Ergebnisse zur Aktualisierung des digitalen Zwilling 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.

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->

- 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. Oudemir 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.com-pind.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.