

# Industrie 4.0 im Remanufacturing

## Analyse und Bewertung aktueller Forschungsansätze

Kim Sprenger, Jan-Felix Klein, Marco Wurster, Nicole Stricker, Gisela Lanza und Kai Furmans, Karlsruher Institut für Technologie

Das Remanufacturing, bisher geprägt durch manuelle und kostenintensive Prozesse, ist ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft. Industrie und Forschung sind sich einig, dass der Einzug von Industrie 4.0 Technologien den Schlüssel zu einer Entwicklung automatisierter und wirtschaftlicher Remanufacturing-Systeme darstellt. Basierend auf einer systematischen Literaturrecherche widmet sich dieser Beitrag der Analyse vielversprechender Industrie 4.0-Ansätze mit dem Fokus auf den übergeordneten Gesamtprozess sowie den Teilprozessen der Demontage und der Inspektion. Die Ergebnisse legen nahe, dass es an zusätzlichem Wissen, Erfahrung und Forschung bei der Entwicklung und realen Demonstration der Ansätze und deren Übertragbarkeit auf breitere Anwendungsfelder bedarf.

Knapper werdende Rohstoffreserven, strengere Umweltauflagen und das zunehmende Umweltbewusstsein von Konsumenten zwingen viele Unternehmen zu einem Umdenken in ihrer Wirtschaftsweise. Als Konsequenz werden Unternehmen immer mehr dazu bewegt, Verantwortung für die Entsorgung ihrer Produkte und die Reduzierung von Abfällen zu übernehmen [1]. Das Remanufacturing, das Zurückführen von gebrauchten Produkten in einen garantierten „wie neu“ Zustand [2, 3], stellt eine entscheidende Strategie auf dem Weg hin zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft dar. Bis heute ist das Remanufacturing durch einen großen Anteil an manuellen und kostenintensiven Prozessen geprägt. Ungewisse Produktzustände, inkonsistente Qualität und schwankende Verfügbarkeit der Altprodukte stellen große Herausforderung für die Automatisierung des Remanufacturing dar [4]. Industrie 4.0-Technologien sollen zukünftig dabei helfen, die Prozesse im Remanufacturing effizienter, zuverlässiger und digitaler zu gestalten, um das volle Potenzial von Remanufacturing zu entfalten [5, 6].

### Methodik

Die Ergebnisse dieser Arbeit basieren auf einer systematischen Literaturrecherche, welche die relevante Literatur bezüglich des Einsatzes und der Erforschung von Industrie 4.0 Technologien im Zusammenhang mit einer potenziellen Anwendung im Remanufacturing identifiziert. Die Vorgehensweise der Recherche kann in Bild 1 nachvollzogen werden. Die relevanten Ergebnisse wurden nach ihrer Zuordnung in

die betrachteten Prozesskategorien Gesamtprozess, Demontage und Inspektion hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere Produkte und Modelle und hinsichtlich ihres Informationsgehalts zu Prozessbeginn bewertet. Dies lässt Rückschlüsse hinsichtlich einer Eignung für eine industrielle Anwendung im Remanufacturing zu. Während sich aus der Bewertung der Übertragbarkeit das potenzielle Einsatzspektrum der Ansätze ableiten lässt, gibt der Informationsgehalt Auskunft über die erforderliche Datengrundlage zu Prozessbeginn. Die verwendeten Suchbegriffe sind angelehnt an die Einteilung der Schlüsseltechnologien von Industrie 4.0 nach Pistorius [7]. Bild 2 fasst die relevantesten Ansätze zusammen.

### Gesamtprozess

Im Remanufacturing werden Altteile zunächst gesammelt, inspiziert, demontiert und gereinigt. Durch die Aufarbeitung und abschließende Remontage der einzelnen Komponenten soll das Altprodukt so in einen „wie neu“-Zustand zurückgeführt werden [8].

### Daten- und Wissensintegration

Ungewisse Zustände aufgrund der individuellen Beanspruchung der Produkte während der Nutzungsphase erschweren den Remanufacturing-Prozess. Digitalisierung und Industrie 4.0 ermöglichen das Problem fehlender Produktinformationen durch verbesserte

### Industry 4.0 in Remanufacturing

Remanufacturing, previously characterized by manual and cost-intensive processes, is a critical step on the way to a resource-efficient circular economy. Industry and research agree that the introduction of Industry 4.0 technologies is the key to the development of automated and economical remanufacturing systems. Based on a systematic literature review, this paper is dedicated to the analysis of promising Industry 4.0 approaches with a focus on the overall process as well as the sub-processes of disassembly and inspection. The results suggest that there is a need for additional knowledge, experience and research in the development and real demonstration of the approaches and their transferability to broader application fields.

#### Keywords:

remanufacturing, industry 4.0, automation, internet of things, literature review

Kim Sprenger, B. Sc. ist Studentin im Fach Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie

Jan-Felix Klein, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFL Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Bereich Robotik und interaktive Systeme.

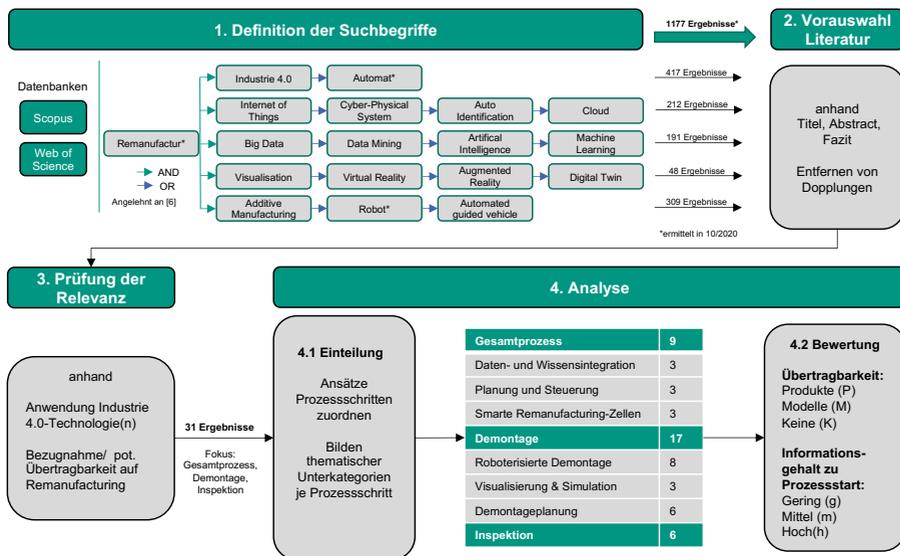
Marco Wurster, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Bereich Produktionssystemplanung.

Dr.-Ing. Nicole Stricker ist Oberingenieurin im Fachbereich Produktionssysteme am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza leitet den Forschungsbereich Produktionssysteme am wbk Institut für Produktionstechnik des KIT und ist verantwortlich für die Bereiche Qualitätssicherung, Produktionssystemplanung und Globale Produktionsstrategien.

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans leitet das Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

jan-felix.klein@kit.edu  
www.ifl.kit.edu



**Bild 1: Rechercheprozess zur Ermittlung relevanter Literaturansätze.**

Literatur

[1] Chakraborty, K.; Mondal, S. u. a.: A study on remanufacturing possibility of a product. In: *Microsystem Technologies* 25 (2019) 5, S. 1765–1770.

[2] Steinhilper, R.: *Remanufacturing: The ultimate form of recycling*. Stuttgart 1998.

[3] Jjomah, W. L.; McMahon, C. A. u. a.: Development of robust design-for-remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development. In: *International Journal of Production Research* 45 (2007) 18-19, S. 4513–4536.

[4] Huang, W.; Jiang, Z. u. a.: Remanufacturing Scheme Design for Used Parts Based on Incomplete Information Reconstruction. In: *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 33 (2020).

[5] Kerin, M.; Pham, D. T.: Smart remanufacturing: a review and research framework. In: *JMTM* 31 (2020) 6, S. 1205–1235.

[6] Yang, S.; M. R., A. u. a.: Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing. In: *Applied Sciences* 8 (2018) 7, S. 1177.

[7] Pistorius, J.: *Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion: Grundlagen • Potenziale • Anwendungen, 1. Auflage*. Berlin, Heidelberg 2020.

[8] Sundin, E.; Elo, K. u. a.: Design for automatic end-of-life processes. In: *Assembly Automation* 32 (2012) 4, S. 389–398.

[9] Wang, X. V.; Wang, L.: From Cloud manufacturing to Cloud remanufacturing: A Cloud-based approach for WEEE recovery. In: *Manufacturing Letters* 2 (2014) 4, S. 91–95.

[10] Wang, X. V.; Wang, L.: WRCloud: A Novel WEEE Remanufacturing Cloud System. In: *Procedia CIRP* 29 (2015), S. 786–791.

Datenerfassung und -übertragung über die Nutzungsphase und durch die Entwicklung von Wissensplattformen anzugehen [9]. Wang und Wang entwarfen in diesem Kontext ein Cloudsystem, das kundenspezifische Services für das Remanufacturing von gebrauchten Elektronikgeräten bereitstellt und nutzen zusätzlich deren Digitale Zwillinge (DZ) in einem Cyber-Physischen System (CPS) für das erleichterte Remanufacturing-Lebenszyklusmanagement [9–11]. Auch Datenübertragungsgeräte wie RFID-Tags erlauben es, Informationen zur verlässlicheren Entscheidung über den gesamten Produktlebenszyklus zu sammeln [12]. Durch sofortige Bereitstellung echtzeitfähiger und individueller Produktinformationen stellt die RFID-Technologie ein geeignetes Werkzeug zur Erhöhung der Informationstransparenz und damit zur Optimierung des Remanufacturing-Prozesses dar [13]. Die Notwendigkeit zur Schaffung standardisierter, zentralisierter Wissens- und Datenaustauschplattformen wurde in der Forschung bestätigt und die entscheidende Rolle von Industrie 4.0-Ansätzen wie Auto Identification, der Cloud und smarten Sensoren in einem Internet der Dinge (IoT) erkannt [6, 11]. Aktuell gibt es jedoch nur vereinzelte industrielle Anwendungen oder konkrete Demonstrationen der beschriebenen Industrie 4.0-Technologien im Remanufacturing.

Planung und Steuerung

Der beschriebene Erhalt und die Nutzung von Daten und Wissen entlang der Wertschöpfungskette führt auch im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung zu verbesserten Remanufacturing-Prozessen. Vor allem die Eignung des IoT zur echtzeitfähigen Überwachung und Steuerung der Remanufacturing-Ressourcen [14, 15], sowie zur Handhabung von Unsi-

cherheiten wird in der Literatur bestätigt [16]. Odemir und Gupta entwarfen ein auftragsbezogenes Remanufacturing-System, in welchem das IoT mithilfe von Sensoren und RFID-Tags statistische und dynamische Lebenszyklusdaten zur Produktidentifizierung und Restlebenszeitbestimmung zur Verfügung stellt [16]. Ähnlich dazu entwickelten Zhang u. a. eine IoT-basierte Methode zur echtzeitfähigen Planung und Kontrolle mit dynamischer Entscheidungsfindung [14]. Besonders vielversprechend ist der Ansatz von Groß u. a., die eine Agenten-basierte, hybride Simulation zur Steuerung und Terminplanung des stochastischen Routings im Remanufacturing entwickelten [17]. Die in einem CPS verbundenen Komponenten des Systems kooperieren durch künstliche Intelligenz (KI) miteinander, wodurch flexibel auf unbekannte Produktzustände und unerwartete Ereignisse reagiert werden kann. Ziel ist die Übertragung des Ansatzes auf Anwendungen aus der Automobilindustrie.

Smarte Remanufacturing-Zellen

Um auf individuelle Produktzustände zu reagieren, bedarf es im Remanufacturing an intelligenten, flexiblen und wandelbaren Systemen. Einen vielversprechenden Ansatz liefern Yang u. a., in dem eine smarte Reparaturzelle für Luft- und Raumfahrtanwendungen simuliert wird, die für variierende Zustände verschiedener Turbinenschaufelmodelle maßgeschneiderte, additive Reparaturen durchführen soll [6]. Der modular aufgebaute Prototyp von French u. a. kombiniert in einer intelligenten Remanufacturing-Zelle Vision-Systeme zur Charakterisierung, Inspektion und Fehlererkennung [18]. Auch Ruggeri u. a. nutzten das Prinzip der Modularität, um eigenständige Arbeitszellen flexibel zu einer skalierbaren Remanufacturing-Anlage im PCB-Bereich zu kombinieren [19]. Alle benannten Ansätze befinden sich aktuell noch in der Entwicklungsphase. Einig ist sich die Literatur jedoch, dass Modularität, ein nahtloser Informationsfluss und ein verbesserter Datenaustausch die Grundlage für anpassungsfähige Remanufacturing-Systeme in einer smarten Industrie 4.0-Umgebung bilden [18].

Demontage

Roboterisierte Demontage

In der Demontage lässt sich eine starke Entwicklung in Richtung autonomer robotischer Demontagezellen und einer Verbesserung hy-

brider Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) erkennen. Vor allem das automatisierte Lösen von Schrauben und die Demontage einzelner handhabbarer Komponenten wurde von mehreren Forschenden bereits thematisiert [20–28]. Huang u. a. entwarfen in diesem Zusammenhang eine auf Active Compliance beruhende MRK, die eingepresste Komponenten einer Pumpe autonom durch einen Roboter entfernt [20]. Ähnlich dazu entwickelten Li u. a. und Gerbers u. a. MRKs zum automatisierten Lokalisieren und Lösen von Schrauben, die durch selbstständigen Werkzeugwechsel eine gewisse Variantenvielfalt gewährleisten [21, 22]. Auch das durch sensorische Wahrnehmung lernende System von Bdiwi u. a. lokalisiert und erkennt Schrauben ohne vorherige Produktkenntnisse [23]. Zur Demontage von Verbindungselementen eines Elektroantriebs griffen Jungbluth u. a. auf ein hybrides, Agenten-basiertes System zurück [24]. Den wohl vielversprechendsten Ansatz für die Remanufacturing-Demontage lieferten Vongbunyong u. a. [25, 26]. Sie entwickelten ein automatisiertes Demontagesystem, das flexibel auf physische Variationen von Produkten reagieren kann, ohne dabei grundlegend auf Produktinformationen zurückzugreifen. Zukünftig sollen vom Menschen demonstrierte Demontagefähigkeiten auf einen kognitiven Roboter übertragen werden [27]. Eine Vollautomatisierung der Remanufacturing-Demontage ist noch schwer zu realisieren. Folglich werden aktuell hybride MRK aufgrund ihrer höheren Flexibilität und Anpassungsfähigkeit bevorzugt. Angesichts fehlender technischer Autonomie sind robotische Demontagesysteme bisher nicht in der Lage variantenreiche und komplexe Produkte autonom zu demontieren. Vor allem bei gebrauchten, durch Verformung oder Alterung beschädigten Produkten stoßen automatisierte Systeme an ihre Grenzen. Einer der wichtigsten Enabler der automatisierten Demontage ist folglich das Forschungsgebiet der künstlichen Intelligenz. Weitere Fortschritte sind hier erforderlich um Roboter mit Intelligenz, Autonomie und zusätzlichen dynamischen Fähigkeiten auszustatten.

ein auf Basis von Nutzerpräferenzen generierter Demontageplan in AR-basierte Anweisungen überführt wird [29, 30]. Mircheski und Rizov nutzten in ihrem Ansatz RFID-Tags, um auf produktspezifische Daten zuzugreifen und dadurch AR-basierte Demontageanleitungen zur Verfügung zu stellen [31].

### Demontageplanung

Ein Großteil der relevanten Literatur in Bezug auf die Demontageplanung bezieht sich aktuell auf Produkte im neuwertigen Zustand. Remanufacturing-spezifische Unsicherheiten werden sowohl im Line Balancing als auch im Sequence Planning nur in geringem Maße betrachtet. Unsicherheiten bezüglich des Produktzustandes und den damit einhergehenden schwankenden Prozesszeiten wurden beispielsweise in den Line-Balancing-Ansätzen von Bentaha u. a. und Liu u. a. betrachtet [32, 33], wohingegen Meng u. a. in ihrem Optimierungsmodell den Grad des Produktversagens verursacht durch Rost, Alterung oder Verformung berücksichtigen [34]. Im Bereich des Demontage Sequence Plannings (DSP) beziehen Tian u. a. und Li u. a. in ihren multikriteriellen Methoden unsichere Komponentenqualitäten der Altprodukte mit ein [35, 36]. Ähnlich dazu entwickelten Xia u. a. eine multikriterielle Ablaufplanungs-methode unter Einbezug des Beschädigungsgrades und der Remanufacturing-Fähigkeit einzelner Komponenten [37]. Für eine autonome Demontageplanung im Remanufacturing benötigt es dynamische Prozesse und Modelle, um mit auftretenden Unsicherheiten und ungeplanten Problemen umgehen zu können. Vielversprechend sind vor allem Ansätze, die verstärkt Qualitätsunsicherheiten und den Beschädigungsgrad der Komponenten miteinbeziehen. In zukünftigen Studien sollten dementsprechend vermehrt Unsicherheiten in Zielwerten, Produktzuständen und Prozesszeiten adressiert werden. Eine weitere Lücke lässt sich bei der Demontageplanung von MRK erkennen und auch bei vollständig automatisierten Demontagepla-

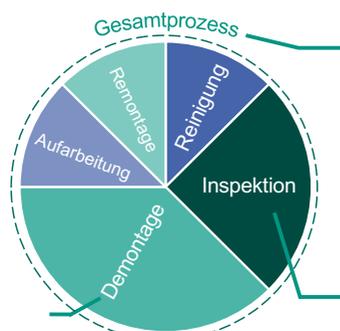
[11] Wang, X. V.; Wang, L.: Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0. In: International Journal of Production Research 57 (2019) 12, S. 3892–3902.  
 [12] Fang, H. C.; Ong, S. K. u. a.: Use of Embedded Smart Sensors in Products to Facilitate Remanufacturing. In: Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. (Hrsg.: Nee, A. Y. C. London 2015, S. 3265–3290.  
 [13] Zhou, W.; Piramuthu, S.: Remanufacturing with RFID item-level information: Optimization, waste reduction and quality improvement. In: International Journal of Production Economics 145 (2013) 2, S. 647–657.  
 [14] Zhang, Y.; Liu, S. u. a.: The 'Internet of Things' enabled real-time scheduling for remanufacturing of automobile engines. In: Journal of Cleaner Production 185 (2018), S. 562–575.  
 [15] Okorie, O.; Charnley, F. u. a.: Towards a simulation-based understanding of smart remanufacturing operations: a comparative analysis. In: Jnl Remanufact (2020).  
 [16] Oudemir, O.; Gupta, S. M.: Quality management in product recovery using the Internet of Things: An optimization approach. In: Computers in Industry 65 (2014) 3, S. 491–504.  
 [17] Groß, S.; Gerke, W. u. a.: Agent-based, hybrid control architecture for optimized and flexible production scheduling and control in remanufacturing. In: Jnl Remanufact (2020).  
 [18] French, R.; Benakis, M. u. a.: Intelligent sensing for robotic re-manufacturing in aerospace — An industry 4.0 design based prototype. In: 2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS). Ottawa, ON, S. 272–277.  
 [19] Ruggeri, S.; Fontana, G. u. a.: Micro-robotic Handling Solutions for PCB (re-)Manufacturing. In: Procedia Manufacturing 11 (2017), S. 441–448.  
 [20] Huang, J.; Pham, D. u. a.: A strategy for human-robot collaboration in taking products apart for remanufacture. In: FME Transactions 47 (2019) 4, S. 731–738.

**Bild 2: Zusammenfassung der bewerteten Ansätze.**

### Visualisierung und Simulation

Neben Robotern finden auch die Industrie 4.0-Technologien der Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) und RFID-Tags zur verbesserten Visualisierung und Simulation vermehrt Anwendung in der Remanufacturing-Demontage. Chang u. a. entwickelten in diesem Zusammenhang einen AR-gesteuerten Produktdemontageprozess, bei dem

Referenz	I4.0 Ansatz	Eignung
K M P g m h		
<b>Roboterisierte Demontage</b>		
[20]	Robotik	x x
[21]	Robotik	x x
[22]	Robotik	x x
[23]	ML, Robotik	x x
[24]	Robotik	x x
[26, 29]	ML, Robotik	x x
[27]	ML, Robotik	x x
<b>Visualisierung und Simulation</b>		
[29]	AR	x x x
[30]	AR	x x x
[31]	AR, RFID	x x x
<b>Demontageplanung</b>		
[32]	-	x x x
[33]	-	x x x
[34]	-	x x x
[35]	-	x x x
[36]	KI	x x x
[37]	-	x x x



Referenz	I4.0 Ansatz	Eignung
K M P g m h		
<b>Daten- und Wissensintegration</b>		
[9, 10]	Auto ID, Cloud	x x x
[11]	Cloud, CPS, DZ, IoT	x x x
<b>Planung und Steuerung</b>		
[16]	IoT, RFID	x x x
[14]	IoT	x x x
[17]	CPS, FTS, IoT, KI	x x x
<b>Smarte Remanufacturing-Zellen</b>		
[9]	AM, DZ, ML, Robotik	x x x
[18]	AM, CPS, IoT, Robotik	x x x
[19]	IoT, Robotik	x x x
<b>Inspektion</b>		
[39]	-	x x x
[40]	DZ, Robotik	x x x
[41]	ML	x x x
[42]	ML, Robotik	x x x
[43]	ML	x x x
[44]	ML	x x x

- [21] Li, R; Ji, C. u. a.: Unfastening of Hexagonal Headed Screws by a Collaborative Robot. In: IEEE Trans. Automat. Sci. Eng. (2020), S. 1–14.
- [22] Gerbers, R; Wegener, K. u. a.: Safe, Flexible and Productive Human-Robot-Collaboration for Disassembly of Lithium-Ion Batteries. In: Sustainable production, life cycle engineering and management, Recycling of Lithium-Ion Batteries. (Hrsg): Kwade, A. und Diekmann, J. Cham 2018, S. 99–126.
- [23] Bdiwi, M.; Rashid, A. u. a.: Autonomous disassembly of electric vehicle motors based on robot cognition. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Stockholm, Sweden, S. 2500–2505.
- [24] Jungbluth, J.; Plapper, P. u. a.: Demontage von Elektroantrieben mit Assistenzrobotern zum wirtschaftlichen Recycling. In: Tagungsband AALE 2016 (2016), S. 10.
- [25] Vongbunyoung, S.; Kara, S. u. a.: Basic behaviour control of the vision-based cognitive robotic disassembly automation. In: Assembly Automation 33 (2013) 1, S. 38–56.
- [26] Vongbunyoung, S.; Kara, S. u. a.: Learning and revision in cognitive robotics disassembly automation. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 34 (2015), S. 79–94.
- [27] Vongbunyoung, S.; Vongseela, P. u. a.: A Process Demonstration Platform for Product Disassembly Skills Transfer. In: Procedia CIRP 61 (2017), S. 281–286.
- [28] Rieß, S.; Laub, J. u. a.: Demontageeffektor für Schraubverbindungen mit ungewissem Zustand. In: ZWF 115 (2020) 10, S. 711–714.
- [29] Chang, M. M. L.; Nee, A. Y. C. u. a.: Interactive AR-assisted product disassembly sequence planning (ARDIS). In: International Journal of Production Research 58 (2020) 16, S. 4916–4931.
- [30] Chang, M.; Ong, S. K. u. a.: AR-guided Product Disassembly for Maintenance and Remanufacturing. In: Procedia CIRP 61 (2017), S. 299–304.
- [31] Mircheski, I.; Rizov, T.: Improved Nondestructive Disassembly Process using Augmented Reality and RFID Product/Part Tracking. In: TEM Journal 6 (2017) 4, S. 671–676.
- [32] Bentaha, M. L.; Dolgui, A. u. a.: Profit-oriented partial disassembly line design: dealing with hazardous parts and task processing times uncertainty. In: International Journal of Production Research 56 (2018) 24, S. 7220–7242.
- [33] Liu, M.; Liu, X. u. a.: Robust disassembly line balancing with ambiguous task processing times. In: International Journal of Production Research 58 (2020) 19, S. 5806–5835.
- [34-44] Aus Platzgründen sind diese Referenzen online unter [www.ifl.kit.edu/industrie\\_4\\_0\\_management.php](http://www.ifl.kit.edu/industrie_4_0_management.php) abrufbar.

nungsprozessen zeichnet sich Bedarf weiterer praktischer Forschung ab.

## Inspektion

Der kritische Prozessschritt der Inspektion, in dem Bauteile identifiziert und befundet werden, liefert eine wichtige Datengrundlage für anknüpfende Prozessentscheidungen. Basis für eine Inspektion im Zeitalter von Industrie 4.0 ist die Generierung eines digitalen Repräsentationsmodells, welches anschließend zur Identifizierung und Erkennung von Bauteilanomalien genutzt wird. Die in der Literatur bereits beleuchteten Inspektionsansätze unterscheiden sich durch das Ausmaß des Informationsgehalts zu Prozessbeginn. CAD Dateien der Bauteile werden beispielsweise in der Literatur häufig vorausgesetzt, stehen in der Praxis jedoch oft nicht zur Verfügung [38]. Um Unabhängigkeit von CAD Dateien zu erreichen, entwickelte Zheng u. a. ein Verfahren zur Rekonstruktion geometrischer Primitive, welche es erlauben, beschädigte Objekte ohne gegebenes CAD-Modell zu rekonstruieren, identifizieren und digitalisieren [39]. Khan u. a. konstruierten mittels eines automatisierten Prüfsystems in einer robotischen Arbeitszelle 3-D-Modelle beschädigter Komponenten, welche als Grundlage für die Generierung robotischer Werkzeugtrajektorien dienen [40]. Der Ansatz wurde bereits an unterschiedlichen Beispielobjekten wie Rohren getestet und weist dementsprechend eine Übertragbarkeit auf andere Produkte auf. Einen auf Machine Learning (ML) basierenden Ansatz zeigen Schlüter u. a. mit dem Logic.Cube [41]. Das lernende System fusioniert hierbei klassische Identifikationstechniken wie Barcodes mit inhärenten Eigenschaften wie Gewicht und Dimensionen sowie Image-Matching Techniken zur Identifikation der Bauteile. Einen an der Praxis orientierten Ansatz zeigen Siddiqi u. a. [42]. Hierbei wird auf Grundlage von Fotogrammetrie mittels einer einfachen Handykamera ein virtuelles 3-D-Modell eines gebrauchten Altmotors generiert. Die so generierten Modelle sollen zukünftig dafür genutzt werden, Defekte zu detektieren und Werkzeuge autonom auszuwählen. Gibbons u. a. verwendeten einen ML-Ansatz zur automatisierten Unterscheidung von korrodierten und nicht korrodierten Bereichen von Altmotoren [43]. Auf Deep Learning basiert der Ansatz von Nwankpa u. a. zur Erkennung unterschiedlicher Defektzustände wie Rost, Löcher, Risse oder Kombinationen davon, in dem ein Klassifikationsnetzwerk mittels Supervised Learning trainiert wurde [44]. Die hierbei erzielten Ergebnisse zeigen das große Potenzial von Deep Learning für die Inspektion und lassen auf zukünftige Ansätze hoffen, die weniger auf spe-

zielle Geometrien und Fehlertypen ausgerichtet sind und somit in der Lage, auch nicht zuvor gesehene Fehlerzustände zu erkennen.

## Fazit

Obwohl ein zunehmender Einfluss von Industrie 4.0 Technologien im Bereich des Remanufacturing erkennbar ist, legt die dargestellte Analyse mehrere Forschungslücken offen, die es auf dem Weg zum automatisierten und effizienten Remanufacturing in Zukunft zu schließen gilt. Im Gesamtprozess müssen Daten- und Wissensströme über den gesamten Produktlebenszyklus tiefer integriert werden, z. B. mithilfe standardisierter, auf Echtzeitdaten basierender Austauschplattformen. Smarte Remanufacturing-Zellen wurden bisher lediglich für definierte Teilprozesse entwickelt. Hier bedarf es weiterer Forschungsarbeit bei der Entwicklung größerer Zellstrukturen, die vernetzt in der Lage sind komplexere Prozessschritte umzusetzen. Fehlende technische Autonomie und Wissenszugewinn verhindern aktuell die automatisierte Demontage von komplexen, variantenreichen Produkten. Der Einsatz von künstlicher Intelligenz kann hierbei der Schlüssel sein, um Roboter und Remanufacturing-Zellen zukünftig mit zusätzlicher Intelligenz, Flexibilität und Fähigkeiten auszustatten. In den Algorithmen für die Demontageplanung müssen die Remanufacturing-typischen Unsicherheiten stärker integriert werden. Für den Teilprozessschritt der Inspektion sollten aufbauend auf den bereits existierenden Ansätzen vermehrt Verfahren entwickelt werden, die unabhängiger auf eine Vielzahl von Bauteilen angewendet werden können. Während die Potenziale von Industrie 4.0 zur Automatisierung des Remanufacturing erkannt wurden, mangelt es jedoch noch häufig an einer praktischen Umsetzung und Erprobung der Ansätze in einem Disziplinen-übergreifenden Gesamtsystem. Im Rahmen des Projekts „AgiProbot“ entsteht am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eine Demonstrator-Fabrik, mit dem Ziel, einige der aufgeführten Lücken zu schließen.

*Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „AgiProbot“ (Agiles Produktionssystem mittels mobiler, lernender Roboter mit Multisensorik bei ungewissen Produktspezifikationen), das durch die Carl-Zeiss-Stiftung gefördert wird.*

Schlüsselwörter:

Remanufacturing, Industrie 4.0, Automatisierung, Internet der Dinge, Literaturrecherche