

Entwicklung einer automatisierten und intelligent vernetzten Demontage am Beispiel von zirkulären Smart Meters

Development of an automated and intelligently networked disassembly based on the example of circular smart meters

Markus Ludsteck, M. Sc.
Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
School of Engineering and Design
Technische Universität München

In Deutschland werden aufgrund der Mess- und Eichverordnung ca. 48 Millionen installierte Wasserzähler alle sechs Jahre ausgetauscht. Dies führt zu ökologischen und ökonomischen Herausforderungen und bringt einen erheblichen Rohstoffverbrauch mit sich. Aus wirtschaftlichen Beweggründen verwenden die meisten Hersteller daher mittlerweile Hydraulikgehäuse aus Kunststoff.

Da die mechanische Lebensdauer der Geräte weitaus höher ist als die gesetzliche Eichfrist, empfiehlt es sich, zur Schonung von Ressourcen, wiederverwendbare Materialien (z. B. Messing) zu verwenden. Zur Schließung des Kreislaufs im Sinne der Circular Economy (CE) bietet sich eine technische Aufbereitung (Remanufacturing) an. Dies wird jedoch durch aktuelle Produktarchitekturen und manuelle Demontageprozesse in der technischen Umsetzung gehemmt. Dieser Beitrag stellt einen Forschungsansatz zur Entwicklung einer automatisierten und intelligent vernetzten Demontage von Wasserzählern vor. Aufbauend auf dem 9R-Framework nach Potting wird ein Mixed-Methods-Ansatz verfolgt, der Literaturrecherche, Prozessmodellierung und die Evaluierung in einem industriellen Anwendungsfall kombiniert. Ein konzeptioneller Digitaler Zwilling dient der Optimierung des Demontageprozesses, einschließlich Sortierung, Zustandsbewertung, automatisierter Demontage, Reinigung und Komponentenaufbereitung. Erwartete Ergebnisse sind technische und gestalterische Leitlinien für zukünftige, demontagefähige Wasserzähler, die eine wirtschaftliche Kreislaufführung ermöglichen und zu den Nachhaltigkeitszielen der EU im Rahmen des Green Deal und der Ökodesign-Verordnung beitragen.

[Remanufacturing, Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit, Automatisierung, Demontage]

In Germany, approximately 48 million installed water meters are replaced every six years due to the Measurement and Certification Ordinance. This leads to ecological and economic challenges and results in considerable consumption of raw materials. For economic reasons, most manufacturers now use plastic hydraulic housings.

However, to conserve resources, it is advisable to use sustainable materials (e.g. brass). In addition, the mechanical service life of the devices is much longer than the calibration period, so technical remanufacturing is a good way to close the loop in terms of the circular economy (CE). Nevertheless, this is hampered by current product architectures and manual disassembly processes in large-scale implementation. This article presents a research approach for the development of automated and intelligently networked disassembly of water meters. Based on Potting's 9R framework, a mixed-methods approach is pursued which combines literature research, process modeling, and evaluation in an industrial use case. A conceptual digital twin is used to optimize the disassembly process, including sorting, condition assessment, automated disassembly, cleaning, and component remanufacturing. The expected results are technical and design guidelines for future, disassemblable water meters which enable economic recycling and contribute to the EU's sustainability goals under the Green Deal and the Ecodesign Regulation.

[Remanufacturing, Circular Economy, Sustainability, Automation, Disassembly]

1 EINLEITUNG

Die Herstellung von Wasserzählern befindet sich derzeit in einem Materialumbruch, der durch schwankende Rohstoffpreise und zunehmenden Kostendruck geprägt ist. Während Messing als Kupfer-Zink-Legierung hohe Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit und Maßhaltigkeit bietet [1], setzen Hersteller vermehrt auf Kunststoffe, die Vorteile hinsichtlich Herstellungskosten, Transportgewicht und Installationssicherheit aufweisen [2].

Bei Wasserzählern handelt es sich um geeichte Messgeräte, welche der deutschen Mess- und Eichverordnung (MessEV) unterliegen. Diese Eichfrist beträgt seit der Novellierung der MessEV im Jahr 2021 einheitlich sechs Jahre für Kalt- und Warmwasserzähler [3]. Nach Ablauf dieser Frist darf ein Wasserzähler nicht mehr für die verbrauchsabhängige Abrechnung eingesetzt werden. In der Praxis bedeutet dies in der Regel den Austausch der Geräte, da eine Verlängerung der Eichgültigkeit über Stichprobenprüfungen oder Nacheichungen zwar rechtlich zulässig, organisatorisch und wirtschaftlich jedoch meist unattraktiv ist. Da diese Messwerte für die Betriebskostenabrechnung verwendet werden, dient die Einhaltung der Eichfrist unmittelbar dem Verbraucherschutz. Werden Wasserzähler nach Ablauf der Eichfrist ohne gültige Eichung weiterverwendet, stellt dies eine Ordnungswidrigkeit im Sinne des § 60 Mess- und Eichgesetz (MessEG) dar. Zudem sind Abrechnungen aus nicht geeichten Messgeräten unwirksam [4].

Schätzungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zufolge, ist davon auszugehen, dass ca. 48 Millionen Wasserzähler innerhalb kommunaler Wassernetze in Deutschland installiert sind [5]. Durch die Umsetzung der MessEV ergibt sich ein hoher Rohstoffverbrauch, da diese Geräte laufend nachproduziert werden müssen. Im Jahr 2024 wurden beispielsweise bei einem deutschen Messtechnikhersteller, der Lorenz GmbH & Co. KG, über eine Million neue Geräte produziert [6].

Durch die hohe Anzahl an jährlich benötigten Neugeräten, ergibt sich ein massiver Rohstoffverbrauch. Daher stellt sich die Frage, welcher Werkstoff langfristig in Bezug auf Qualität, Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit am besten geeignet ist. Auf diese Frage findet sich jedoch keine eindeutige Antwort, denn bei der Auswahl des Werkstoffes müssen ebenfalls gesetzliche Vorgaben hinsichtlich korrosionschemischer und hygienischer Materialeigenschaften beachtet werden. Dabei kommt die Norm DVGW W406 [7], welche auf der Norm DVGW W421 [8] basiert, zum Einsatz. Diese bildet die Prüf- und Zertifizierungsgrundlage für Wasserzähler. Diese Norm gibt Empfehlungen zur Einhaltung von trinkwasserhygienischen Anforderungen laut Trinkwasserverordnung [9]. Aufgrund der hohen Materialkosten für Messingteile, ist Kunststoff aus ökonomischen Gesichtspunkten die optimale Entscheidung. Zudem

ist die überwiegend manuelle Demontage mit hohem Aufwand verbunden, deshalb werden die Geräte am Ende des Produktlebenszyklus entsorgt [10].

An diesem Punkt gewinnt das Konzept der Circular Economy zunehmend an Bedeutung. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, den linearen „Take-Make-Dispose“-Ansatz durch geschlossene Stoffkreisläufe zu ersetzen, indem Produkte und Materialien möglichst lange im Umlauf gehalten werden [11]. In diesem Kontext bedeutet dies, dass Materialien von Wasserzählern (z. B. Messing) nicht nach dem Ablauf der Eichfrist entsorgt, sondern durch Remanufacturing, Recycling oder Wiederverwendung erneut in den Produktionsprozess zurückgeführt werden. Dadurch können nicht nur Rohstoffe eingespart, sondern auch CO₂-Emissionen reduziert werden [12].

Der manuelle Prozess zur Handhabung der Rückläuferprodukte inkl. der manuellen Demontageprozesse ist mit hohem Aufwand verbunden. So müssen die Rückläufer per Hand sortiert und bewertet sowie manuell demontiert werden. Dies beinhaltet die Demontage der Zählerhauben, Zählwerke (inkl. Deckeldemontage und Demontage von Platine und Batterie) sowie der Hydraulikmodule.

Da der Austausch von Wasserzählern nicht als isolierter Vorgang, sondern als kontinuierlich wiederkehrender Prozess innerhalb des Gesamtsystems betrachtet werden muss, ist der Einsatz von Messingwerkstoffen aufgrund der Wiederverwendbarkeit zwar ökologisch und ressourcenseitig sinnvoll; die ökonomischen Belastungen durch aufwändige Demontage-, Sortier- und Rückführungsprozesse führen jedoch dazu, dass in der Praxis überwiegend weiterhin auf polymerbasierte Einwegkomponenten zurückgegriffen wird. Durch die Verwendung von Messinggehäusen ergibt sich ein hohes Potenzial zur technischen Aufbereitung der Geräte. Zur Umsetzung einer technischen Aufbereitung ist eine Überprüfung der Geräte notwendig, was eine Demontage erfordert. Für die Umsetzung einer manuellen Demontage der Wasserzähler, ist ein hoher Personalaufwand notwendig. Aufgrund der hohen Personalkosten ergeben sich daraus hohe Prozesskosten für die manuelle Demontage. Zudem steht aufgrund der hohen Stückzahl an Rückläufern und zeitaufwändigen Demontageprozessen eine manuelle Demontage der Altgeräte in keinem Verhältnis zum Aufwand, daher ist eine Prozessautomatisierung erforderlich.

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Entwicklung einer automatisierten Demontagelösung und technischen Aufbereitung von Wasserzählern dargestellt. Hierbei werden die Remanufacturing-Prinzipien der Kreislaufwirtschaft eingesetzt, um zukünftig Wasserzähler im Kreislauf führen zu können.

2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

2.1 CIRCULAR ECONOMY

Die Circular Economy (CE, dt. Kreislaufwirtschaft) ist ein Wirtschaftssystem, mit dem Ziel, die Nutzung der Ressourcen durch die Kreislaufführung zu maximieren und somit möglichst wenig Abfall zu erzeugen [13]. Mehrere miteinander verbundene Konzepte wie das Schließen des Kreislaufs, Ökodesign, Industrielle Ökologie, Industrielle Symbiose, Lebenszyklusanalyse (LCA) und Leistungsökonomie tragen zum Konzept der CE bei [13].

Für die Schließung der Kreisläufe oder die Aufrechterhaltung der produktiven Nutzung von Materialien wurde u. a. die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie der Bundesrepublik Deutschland ins Leben gerufen. Demnach soll der Verbrauch neuer primärer Rohstoffe verringert, Stoffkreisläufe geschlossen sowie die Abhängigkeit von Rohstoffimporten weiter reduziert und Abfall vermieden werden [14]. Die einzelnen Strategien bieten unterschiedliche Möglichkeiten zur Kommerzialisierung von Ansätzen der CE. Dennoch ist davon auszugehen, dass es für eine flächendeckende, wirksame Umsetzung politische Impulse und Anreize für die Bürger und Unternehmen erfordert [13]. Gleichwohl sind die Unternehmen durch die Obhutspflicht aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ebenfalls in der Pflicht, Ressourcen zu schonen [15]. Obwohl die CE als Weg zur Umsetzung einer nachhaltigeren Entwicklung angesehen wird, sind die Erreichung und Verteilung der sozialen Vorteile im Rahmen der CE derzeit höchst ungewiss [13].

Mit dem Europäischen Green Deal hat sich die Europäische Union (EU) das Ziel gesetzt, bis 2050 die Klimaneutralität zu erreichen und großen ökologischen Herausforderungen wie der globalen Erwärmung, der Erschöpfung von Ressourcen, dem Verlust der biologischen Vielfalt und der Verschmutzung lebenswichtiger Ökosysteme entgegenzuwirken. Um diese Ziele zu erreichen, wird der Übergang zu einer CE als eine Voraussetzung angesehen [16]. Daher hat die EU den Aktionsplan für die CE ins Leben gerufen, der darauf abzielt, Wirtschaftswachstum vom Verbrauch natürlicher Ressourcen zu entkoppeln [17]. Allerdings ist die CE-Agenda für viele Unternehmen noch neu und die meisten Branchen stehen erst am Anfang der Umsetzung von CE-Strategien [18], [19]. Auch auf regulatorischer Seite wird die Transformation zur CE stark fokussiert. Unter dem europäischen Green Deal werden neue regulatorische Auflagen entwickelt, deren Anforderungen sukzessive von großen Unternehmen auch auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ausgeweitet werden [20]. Die neue Ökodesign-Richtlinie, die im Juli 2024 in Kraft trat und der bestehenden Ökodesign-Richtlinie zur Verbesserung der Ressourceneffizienz von Produkten aufbaut, zielt darauf ab, nachhaltige Produkte zur Norm auf dem EU-Markt zu machen und ihre Gesamtumweltauswirkungen sowie Klimaauswirkungen zu verringern [21].

Die CE und das damit in Zusammenhang stehende 9R-Modell nach Potting lässt sich nur realisieren, wenn verschiedene Schlüsselfaktoren eingehalten werden [22]. Zu den Trägern der CE zählen u. a. zirkuläre Geschäftsmodelle, mit denen sich die Umsetzung der CE-Strategien organisieren und integrieren lassen. Dadurch können Innovationen gefördert werden [23].

2.2 DAS 9R-FRAMEWORK NACH POTTING ZUR IMPLEMENTIERUNG DER CE

Zur Umsetzung der CE sind die R-Strategien ein weit verbreitetes Modell, welches u. a. im Kategorisierungssystem der EU für die CE angewandt wird [24]. Sie beschreiben verschiedene Optionen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs sowie zur Kreislaufführung von Produkten und Materialien. Die hierarchischen Strategien des 9R-Frameworks beschreiben den Grad der Zirkularität einer Maßnahme, das heißt, je früher eine Maßnahme in der Wertschöpfungskette Anwendung findet, desto höher ihr Beitrag zur Zirkularität [22], [25], [26]. Während in der Literatur weitere Unterteilungen von 3R bis 10R zu finden sind, bietet das 9R-Framework (siehe Abbildung 1) eine hohe Granularität und erlaubt dadurch die gezielte, spezifische Differenzierung der Aktivitäten [22], [25], [26] und wird daher im weiteren Verlauf verwendet.

2.3 DEMONTAGE IM RAHMEN DES REMANUFACTURING

Die Demontage wird als die Gesamtheit aller Vorgänge definiert, die den Zusammenhalt geometrisch bestimmter Körper auflöst. Im Gegensatz zur Montage, die das Zusammenfügen von Komponenten und eine Sicherstellung der Funktionsfähigkeit von Produkten umfasst [27], beschreibt „die Demontage den Prozess, Baugruppen, Bauteile oder Materialien aus Mehrkörpersystemen für die weitere Verwendung oder Wiederaufbereitung zu gewinnen“ [28]. Allerdings ist die Demontage nicht als inverser Prozess zur Montage zu verstehen, denn der Demontageprozess ist meist mit einem höheren Aufwand verbunden. Dies liegt u. a. daran, dass die Produkte oft nicht drauf ausgelegt sind, am Ende des Lebenszyklus demontiert zu werden [28]. Weiterhin existieren viele unterschiedliche Varianten und Zustände der jeweiligen Produkte [28]. Um festzustellen, wie weit ein Produkt demontiert werden kann, ist die Demontagetiefe zu betrachten. Dies ist ein Maß für die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit eines Demontageprozesses [29]. Die minimale Demontagetiefe wird durch gesetzliche Rahmenbedingungen festgelegt, denn hiermit wird eine höhere Schadstoffentsorgung definiert. Im Gegensatz dazu beschreibt die maximale Demontagetiefe die vollständige Zerlegung des Altprodukts. Die Herausforderung liegt darin, ein Optimum der Demontagetiefe hinsichtlich des wirtschaftlichen und nachhaltigen Faktors zu erzielen [28].

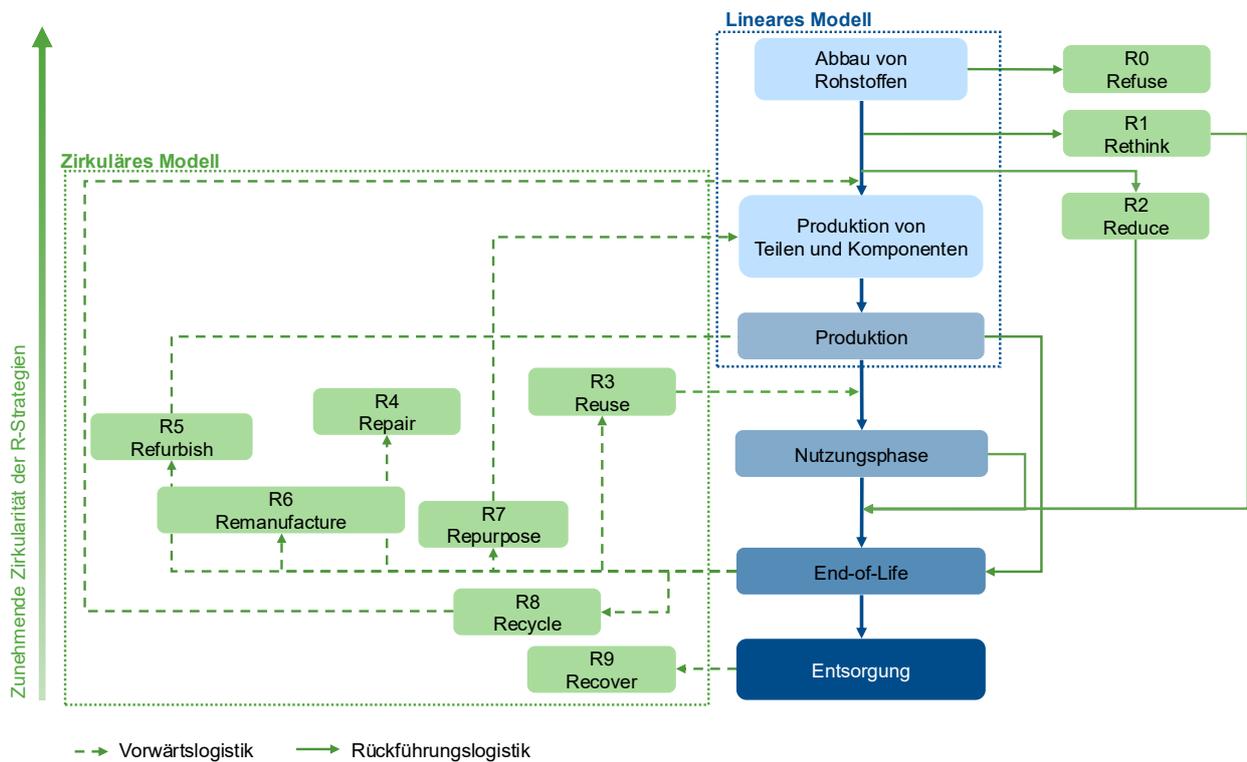


Abbildung 1: 9R-Framework nach Potting [22]

Eine zerstörende Demontage wird hauptsächlich für Komponenten durchgeführt, welche recycelt werden und aufgrund irreversibler Verbindungen nicht zerstörungsfrei demontierbar sind [30].

Eine zerstörungsfreie Demontage eignet sich für Komponenten, die aufbereitet oder wiederverwendet werden [30]. Eine teilzerstörende Demontage kommt für die Vorbereitung von zerstörungsfreien Demontageschritten in Frage [28]. Hierzu werden die Verbindungselemente zerstört, während das Bauteil unbeeinträchtigt bleibt [31]. Aus wirtschaftlichen und nachhaltigen Gründen wird eine zerstörungsfreie Demontage bevorzugt, denn hierdurch lässt sich eine maximale Wiederverwendbarkeit der Komponenten und eine Reduktion des Ressourceneinsatzes realisieren [32].

2.3.1 MANUELLE DEMONTAGE

Die manuelle Demontage wird als „Verwendung von Handwerkzeugen und Technologien zum Zerlegen von Gegenständen oder Geräten“ definiert [33]. Diese Technik bleibt notwendig, solange Produkte stark variieren, in unbekanntem Zustand zurückkommen, gefährliche Stoffe enthalten oder keine ausreichende Standardisierung/Datenbasis existiert. Dieser Prozess ist vor allem bei der Entsorgung von Altgeräten im Segment Elektro- und Elektronik (E/E) allgegenwärtig [28]. Laut der Norm DIN EN IEC 81346-2 zählt ein elektronischer Wasserzähler aufgrund

seiner Smart-Meter-Funktionalität (z. B. digitales Display, Impulsgeber, Funkmodul) und der Stromversorgung ebenfalls zu den E/E-Geräten [34].

Dazu werden die elektrischen Geräte physisch zerlegt, auf Wiederverwendbarkeit geprüft und die verschiedenen Komponenten und Materialien sortiert [33]. Die hohe Adaptivität der manuellen Prozesse erlaubt es, flexibel auf unvorhergesehene Situation zu reagieren [28]. Darüber hinaus erfolgt bei der manuellen Demontage eine individuelle Zustandsprüfung, denn die Mitarbeiter können eine visuelle und haptische Bewertung vornehmen. Dabei erfolgt teilweise eine erste Behandlung in Form einer Sortierung oder manueller Demontage. Nach einer ersten stofflichen Trennung werden die Bestandteile entweder direkt oder durch Zwischenhändler weiter an spezialisierte Recyclingbetriebe transportiert (z. B. Kupferrecycling) oder Kunststoffteile thermisch verwertet [35]. Diese Methode bringt aber auch klare Nachteile durch hohe Kosten, einer geringen Skalierbarkeit, niedriger Effizienz oder auch Sicherheitsrisiken [28].

2.3.2 AUTOMATISIERTE DEMONTAGE

Die Automatisierung der Demontage für E/E-Altgeräte kann in unterschiedlichem Umfang und Ausmaß erfolgen (halbautomatisierte oder vollautomatisierte bzw. roboterassistierte Demontage). Die automatisierte Demontage wird als „ein vollständig automatisiertes Demontageverfahren“ beschrieben, bei dem in erster Linie automatisierte Anlagen

und Roboter zum Einsatz kommen und nur wenig oder gar kein menschliches Eingreifen erforderlich ist [33]. Allerdings ist anzumerken, dass Automatisierung bei der Demontage derzeit nur in begrenztem Maße eingesetzt wird [33] und manuelle Demontagetechniken weiterhin für die Entfernung von Zielkomponenten, welche ein hohes Potenzial zur Wiederverwendung bieten oder erhebliche Gehalte an gefährlichen Stoffen beinhalten notwendig sind, bevor höher automatisierte Techniken eingesetzt werden können [36]. Dies liegt vor allem an den bisher geringen Skalierungseffekten der automatisierten Demontage, denn eine Automatisierung von Demontageprozessen ist oft erst bei hohen Volumina und standardisierten Varianten wirtschaftlich sinnvoll [37]. Zudem weisen die Rückläufer, welche sich grundsätzlich für eine automatisierte Demontage eignen, eine hohe Zustandsvarianz auf (z. B. fehlende Schrauben, deformierte Teile, unterschiedliche Produktgenerationen etc.), daher scheitern vollautomatisierte Demontagezellen oft an dieser Unsicherheit [38]. Ein weiterer Grund ist die Organisation der Rückführungsprozesse, denn die Sammlung, Sortierung, Identifikation und Vorbehandlung sind volatil und fragmentiert [39].

2.3.3 ROBOTERGESTÜTZTE DEMONTAGE

Weitere Potenziale ergeben sich bei der Demontage von E/E-Altgeräten mit Roboterunterstützung, einer Form der vollautomatisierten Demontage. Dabei können je nach Art der auszuführenden Demontageaufgaben verschiedene Robotertypen zum Einsatz kommen. Der spezifische Robotertyp wird daher in Abhängigkeit der Demontageaufgabe ausgewählt [33].

Der Einsatz von Roboterarmen zum Bewegen und Transportieren des Geräts für die vorhergesehenen Demontagerbeiten ist ein anschauliches Beispiel dafür, wie die robotergestützte Demontage den Prozessablauf der Demontage unterstützen kann. Dabei werden verschiedene technische Merkmale solcher Roboter, z. B. die Freiheitsgrade unter Berücksichtigung der Besonderheiten der Demontageaktivitäten, für die sie vorgesehen sind, speziell kalibriert [33].

Es gibt zahlreiche Beispiele, in denen robotergestützte und andere automatisierte Demontagetechniken eingesetzt werden, die eine Optimierung der Demontage von E/E-Altgeräten ermöglichen; dazu zählt auch der Einsatz bestimmter Manipulatoren, z. B. Roboterarme zum Tragen der erforderlichen Werkzeuge zur Durchführung festgelegter Demontageaktivitäten [33]. Weiterhin eignen sich auch sogenannte Handhabungsgeräte zum Platzieren der Altgeräte in die Demontagestation. Um die Präzision zu maximieren, mit der die vorhergesehenen Demontagewerkzeuge auf die Zielkomponente bzw. den Zielverbinder ausgerichtet werden und das gewünschte Ergebnis erzielt wird, können gesicherte oder flexible Vorrichtungen verwendet werden, um die Position und das Gleichgewicht des Altgeräts zu regulieren.

2.4 DIGITALER ZWILLING

Digitale Zwillinge werden als lebenszyklusweite, datengetriebene Abbilder von Produkten oder Anlagen bezeichnet, welche die R-Strategien (z. B. Reparatur, Remanufacturing oder Recycling) mit konkreten Informationsbedarfen der Stakeholder verbinden. Damit lassen sich zirkuläre Entscheidungen operationalisieren [40]. Weiterhin eignen sich Digitale Zwillinge für Szenarien in der Fertigung. Das Technology-Readiness-Level (TRL) zeigt typische Hürden, wie die unterschiedlichen Digitalisierungsgrade oder nicht durchgängige Datenflüsse. Dazu wird ein holistisches Scoping-Konzept für Digitale Zwillinge im Kontext der CE vorgeschlagen [41]. Zudem wird deutlich, dass Digitale Zwillinge die Nachhaltigkeit und Zirkularität (z. B. Energie, Materialien, Planung und Instandhaltung) in der Produktion treiben [42]. Eine weitere Anwendung von Digitalen Zwillingen ist die virtuelle Inbetriebnahme technischer Systeme [43].

3 METHODISCHER ANSATZ

Im weiteren Verlauf des Beitrags wird das 9R-Framework nach Potting auf den vorliegenden Use-Case angewandt, um so die geeignete Strategie zu ermitteln. Basierend auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik, wird die Forschungslücke abgeleitet. Diese soll durch Forschungsaktivitäten zur automatisierten Demontage von Wasserzählern (Analyse des aktuellen Produktdesigns und einem Konzept zur Automatisierung der Demontage) geschlossen werden. Das Fazit inkl. Ausblick bildet den Abschluss des Beitrags.

3.1 AUSWAHL UND BEGRÜNDUNG DER R-STRATEGIE FÜR DEN AUSGEWÄHLTEN USE-CASE

Gemäß dem 9R-Framework nach Potting [22] existieren verschiedene R-Strategien, die nachfolgend auf ihre Anwendbarkeit für den ausgewählten Use-Case geprüft werden sollen. Dabei soll herausgefunden werden, welche Strategien für die zirkuläre Wasserzähler am besten geeignet sind.

Refuse (R0): Bei dieser Strategie wird der Produktnutzen durch ein Ersatzprodukt erfüllt oder die Notwendigkeit des Produkts ist durch Konsumverzicht nicht mehr gegeben [22]. Für den Anwendungsfall Wasserzähler, sind Ersatzprodukte oder Konsumverzicht jedoch nicht möglich, denn gemäß § 43 (2) der Musterbauordnung (MBO), muss in jeder Wohnung ein eigener Wasserzähler vorhanden sein, um den Wasserverbrauch korrekt erfassen zu können [44].

Rethink (R1): Diese Strategie hat das Ziel, die Intensität der Produktnutzung zu verstärken [22], z. B. durch Sharing-Konzepte. Dies ist jedoch bei Wasserzählern nicht möglich, da gemäß der MBO jede Wohnung über einen eigenen Wasserzähler verfügen muss, um den Wasserverbrauch korrekt zu erfassen [44].

Reduce (R2): Bei dieser Strategie sollen Rohstoffe und Materialien bei der Herstellung von Produkten eingespart werden, um so die Ressourcen zu schonen [22]. Für den gewählten Anwendungsfall wäre diese Strategie zwar anwendbar, allerdings hat diese Strategie eine Änderung des aktuellen Produktdesigns zur Folge. Demnach würde die Umsetzung der Änderungen jedoch erst bei Umstellung auf die nächste Produktgeneration realisiert werden.

Reuse (R3): Diese Strategie strebt die Wiederverwendung des hergestellten Produkts durch einen anderen Verbraucher an [22]. Die Anwendung der Strategie ist bei einem Wasserzähler nur bedingt einsatzfähig, da die Geräte nicht als Ganzes wiederverwendbar sind. Demnach müssen die Zählwerke überprüft und ggf. ausgetauscht werden. Für die Hydraulikmodule ist diese Strategie geeignet, diese können nach einem Wechsel der Gummidichtungen wiederverwendet werden. Die durch Oxidation der Oberflächenschicht von Messing entstehende Patina lässt sich durch entsprechende Reinigung entfernen.

Repair (R4): Mit dieser Strategie soll die Funktionsfähigkeit der Produkte wiederhergestellt werden [22]. Dies ist bei Wasserzählern nicht notwendig, da diese Geräte eine hohe technische Zuverlässigkeit aufweisen und mechanische Defekte sind daher nur selten zu verzeichnen. Die Mehrheit der Austauschvorgänge erfolgt vielmehr vorsorglich im Rahmen gesetzlicher Eichzyklen, da mit zunehmendem Alter statistisch eine Verschlechterung der Messgenauigkeit zu beobachten ist [45]. So wurde bei einer Überprüfung der Rückläufer festgestellt, dass ca. 92,5 % in betriebsfähigem Zustand befinden [46].

Refurbish (R5): Bei Anwendung dieser Strategie sollen Altprodukte generalüberholt werden [22]. Das Refurbishment stellt allerdings kein Neuprodukt dar, sondern beschränkt sich lediglich auf einzelne Module [47] und geht nicht über ein zuvor definiertes Qualitätslevel hinaus, was den Unterschied zum Remanufacturing darstellt. Demnach ist der Zustand nicht mit einem Neuprodukt vergleichbar und deshalb werden diese Produkte meist zu einem geringeren Preis weiterverkauft [48]. Dementsprechend ist dieser Ansatz für die Wasserzähler nur bedingt geeignet. Es werden zwar Ansätze zur CE verfolgt, jedoch können diese Geräte nicht als Neugeräte verkauft werden, was allerdings von den Kunden aufgrund der geforderten Garantieleistungen erwartet wird.

Remanufacturing (R6): Beim Remanufacturing werden die Produkte nicht nur auf Modulebene aufbereitet, sondern als Komplettprodukt einer technischen Aufbereitung unterzogen [22]. Dies stellt den Unterschied zum Refurbishment (R5) dar, denn die Hauptprozesse des Remanufacturing sind Demontage, Reinigung, Prüfung/Diagnose, technische Aufbereitung und Zusammenbau der Endprodukte [48]. Da Produkte nach Abschluss des Remanufacturing-Prozesses als Neuprodukte deklariert werden dürfen [48], eignet sich

diese Strategie für Wasserzähler und erfüllt nötige Vorgaben hinsichtlich der Produktgarantie.

Repurpose (R7): Diese Strategie strebt an, dass einzelne Teile eines Produkts zur Weiterverwendung in ein anderes Produkt integriert werden [22]. Dieses Vorgehen eignet sich nicht für Wasserzähler, da die speziellen Bauteile der Wasserzähler nicht in andere Produkte integriert werden können.

Recycle (R8): Beim Recycling wird die Rückgewinnung der verwendeten Rohstoffe angestrebt [22]. Dies ist bei den Wasserzählern bedingt anwendbar, beschränkt sich aber auf Komponentenebene, denn beispielsweise die durchsichtigen Zählerhauben aus Kunststoff können nur zerstörend demontiert werden, da sie dem Manipulationsschutz dienen. Diese Zählerhauben werden am Ende des Produktlebenszyklus zu Kunststoffgranulat zermahlen. Beim Hydraulikgehäuse lässt sich im Allgemeinen keine genaue Lebensdauer ermitteln, da die Wasserzähler in Deutschland aufgrund der gesetzlichen Eichfrist bereits nach sechs Jahren ausgetauscht werden. Während deutsche Hersteller (z. B. Qundis [49] oder Lorenz Meters [6]), auf Hydraulikgehäuse aus Messing, ein langlebiges/rostfreies Material, das hohen Belastungen standhält [1], setzen, gibt der chinesische Hersteller VIEWSHINE auf seiner Webseite eine Lebensdauer von 15 Jahren bei Kunststoffgehäusen an [50].

Recover (R9): Dieses Verfahren beschreibt die thermische Verwertung von Produkten am Ende des Lebenszyklus [22]. Durch die thermische Verwertung erfolgt eine Hygienisierung, denn Bakterien, Pilzsporen und Viren werden verbrannt. Weiterhin werden organische Schadstoffe zerstört, Schwermetalle konzentriert und damit sicher aus der Umwelt und dem Wirtschaftskreislauf entfernt. Die verwendeten Anlagen unterliegen den Anforderungen der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung und werden permanent überwacht [51]. Die thermische Verwertung ist die letzte Stufe der Abfallverwertung, wenn das Recycling nicht mehr möglich ist und bietet eine weitere Möglichkeit zur Energiegewinnung. Der Nachteil im Sinne der CE liegt in der Verschwendung der Materialien, da diese durch die Verbrennung komplett zerstört werden. Zudem erfordert die Rentabilität der Müllverbrennungsanlagen ein hohes Abfallaufkommen, was mit den Zielen der CE konkurriert [52]. Die thermische Verwertung würde theoretisch für die Wasserzähler ebenfalls in Frage kommen, ist jedoch mit dem Ziel der CE nicht vereinbar.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für den Anwendungsfall aufgrund unterschiedlicher Bestimmungen (gesetzlich sowie technisch) die Strategien **Refuse**, **Rethink (R0 und R1)** sowie **Repair (R4)** sowie **Repurpose (R7)** nicht anwendbar sind. Weiterhin fällt auf, dass für die Strategie **Reduce (R2)** eine Änderung des Produktdesigns zur Realisierung der Materialeinsparung nötig ist. Die modul-

weise Aufbereitung des **Refurbishments (R5)** ist nur bedingt geeignet, denn die Kunden fordern zuverlässige Neuprodukte inkl. Garantieleistungen. Deshalb ist diese Strategie nicht geeignet. Die Strategie **Recycling (R8)** ist zwar anwendbar, allerdings für den Anwendungsfall nicht geeignet. Demnach beschränkt sich die Anwendbarkeit nur auf die Rückgewinnung der Materialien. Zudem beträgt die Nutzungsdauer der Wasserzähler pro Eichzyklus nur sechs Jahre, folglich kann nach dieser Zeit noch keine Aussage über die generelle Haltbarkeit der Materialien getroffen werden.

Die Strategie **Reuse (R3)** ist für die Messingbauteile des Hydraulikmoduls anwendbar. Diese Bauteile werden jedoch vor der Zuführung in den Produktionskreislauf gereinigt, um Ablagerungen durch Kalk oder Oxidation zu entfernen.

Die Anwendung der Strategie **Recover (R9)** wäre theoretisch möglich, die Umsetzung durch thermische Verwertung der Materialien widerspricht jedoch dem Gedanken der CE und sollte deshalb nicht umgesetzt werden. Demnach verbleibt für den ausgewählten Anwendungsfall nur die Strategie des **Remanufacturing (R6)**.

Unter der Maßgabe, die Strategie der CE zu erfüllen, ist zuvor Genanntes für die Strategien R0-R5 sowie R7 und R9 materialunabhängig gültig. Bei einer zusätzlichen Unterscheidung zwischen Kunststoffgehäusen und Messinggehäusen, fällt auf, dass bei den Kunststoffgehäusen das Remanufacturing (R6) nicht möglich ist, daher besteht für die verwendeten Materialien nur die Recyclingmöglichkeit (R8). Bei Verwendung von Messing ist jedoch das Remanufacturing (R6) aufgrund der hohen Zirkularität zu bevorzugen.

4 DARSTELLUNG DER FORSCHUNGSLÜCKE

Trotz regulatorischer und technologischer Fortschritte fehlen bisher wirtschaftlich umsetzbare Konzepte für die automatisierte Demontage von Wasserzählern.

Bestehende Ansätze zur Demontage im E/E-Bereich sind überwiegend manuell, insbesondere wenn es sich um Zielkomponenten mit hohem Wiederverwendungspotenzial oder Bauteilen mit gefährlichen Inhaltsstoffen handelt. Demnach erfolgt auch die Vorsortierung bzw. der erste Schritt zur Demontage von zu entsorgenden E/E-Altgeräten überwiegend manuell (siehe 2.3.1).

Die Überlegungen im Bereich der automatisierten Demontage konzentrierten sich in der Vergangenheit vorwiegend auf den Bereich der Unterhaltungselektronik, um das Recycling dieser Geräte zu verbessern [31].

Die früheren Prozesse werden immer mehr durch digitale Technologien (3D-Kameras, Künstliche Intelligenz etc.)

ergänzt. Mit Hilfe von Kameras lassen sich so die Herstellerangaben, Produkttyp und Seriennummer erfassen. Zudem wird die Geometrie, Oberflächen oder der Zustand der Verbindungselemente, wie z. B. Schrauben oder Nieten erkannt. Weiterhin helfen Machine-Learning-Algorithmen dabei, Sensordaten auszuwerten oder verdeckte / verrostete Schrauben zu erkennen. Diese Informationen fließen dann in den Digitalen Zwilling des Demontagesystems ein. Basierend auf dem Digitalen Zwilling führt ein Roboter im Anschluss die zuvor definierten Demontageschritte durch [53].

Zudem existieren bereits Forschungsaktivitäten zur effizienten Steuerung von Aufbereitungsprozessen von Kühlgeräten. Das Interesse an der Rückgewinnung von Rohstoffen aus den Geräten ist groß, da es sich oft um teure Materialien wie z. B. Kupfer handelt. Weiterhin sind in den Altgeräten Kältemittel enthalten, welche sich je nach Typ, negativ auf Umwelt und Gesundheit auswirken [54].

Innerhalb der eigenen Forschungseinrichtung werden in Zusammenarbeit mit einem Automobilhersteller wirtschaftliche Konzepte zur sortenreinen Demontage von Fahrzeugen am Ende des Lebenszyklus erforscht. Diese beinhalten die Identifikation und Sortierung der verwendeten Materialien (z. B. Gummi, Glas oder Metall). Weiterhin werden dabei auch Prozesse, welche vor und nach der Demontage ablaufen auf Optimierungspotenziale betrachtet [55].

Trotz der vorhandenen Überlegungen zur automatisierten Demontage im Rahmen der CE, sind diese Forschungsansätze nicht auf Wasserzähler übertragbar, da es sich bei Wasserzählern um kompakte Kleingeräte der Haustechnik handelt, welche insbesondere durch den Schutz vor Manipulation diverse Herausforderungen bei der Demontage mit sich bringen.

5 ANALYSE DES PRODUKTDESIGNS

Nachfolgend werden die einzelnen Montageschritte des Zählwerks bei einem Wasserzähler dargestellt. Das Zählwerk besteht aus den Komponenten Platine, Batterie, Abtastspulen, Zählwerksbecher und Zählwerksdeckel (Abbildung 2).



Abbildung 2: Komponenten eines Zählwerks

Abbildung 3 zeigt die in den Zählwerksbecher eingelegte Batterie.

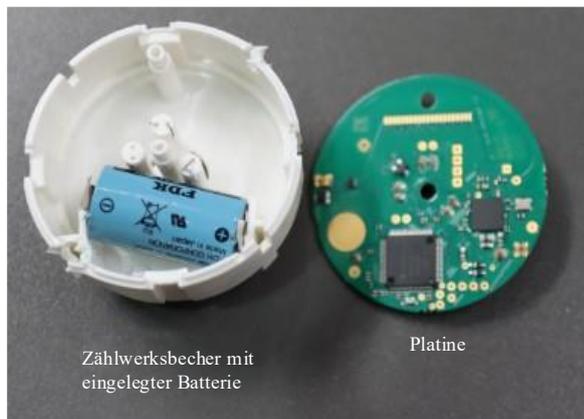


Abbildung 3: Einlegen der Batterie in den Zählwerksbecher

Abbildung 4 zeigt den Zählwerksdeckel, zerlegt in seine Einzelteile.



Abbildung 4: Zählwerksdeckel, in Einzelteile zerlegt

Der nächste Schritt ist in Abbildung 5 dargestellt und zeigt die formschlüssige Fixierung der Platine im Zählwerksbecher.



Abbildung 5: Platine ist formschlüssig im Zählwerksbecher fixiert

Der letzte Montageschritt (siehe Abbildung 6) ist die Montage der Abtastspulen. Diese werden auf der Unterseite des Zählwerks so montiert, dass die Anschlussdrähte der Abtastspulen durch die Platine geführt und etwas darüber hinausragen. Abschließend werden die Anschlussdrähte der Abtastspulen und die Kontakte der Batterie von oben verlötet. Dadurch sind die Komponenten der Baugruppe stoffschlüssig verbunden und können nicht ohne Weiteres getrennt werden.



Abbildung 6: Montage der Abtastspulen auf der Unterseite des Zählwerks

Das Entlöten von Hand birgt einen großen Zeitaufwand und erfordert geschultes Personal. Dabei stellt diese Eigenschaft des Produkts eine Herausforderung im Hinblick auf ein demontagefähiges Produktdesign dar, während es bei der sicheren Montage der Baugruppe vorteilhaft ist.

Mit den Informationen laut Montagebeschreibung, lassen sich die auftretenden Herausforderungen bei der Demontage besser nachvollziehen.

Sollte im Falle einer Aufbereitung des Wasserzählers bzw. Zählwerks eine der Komponenten repariert oder getauscht werden müssen, ist das Zählwerk komplett zu entlöten. Das gilt auch für den Austausch der Batterie. Dies liegt im Montageprozess begründet, bei dem die Platine durch das Verlöten mit den Abtastspulen eine Einheit bildet, welche mit dem Zählwerksbecher formschlüssig verbunden ist.

Abbildung 7 zeigt die Hydraulik eines Flügelradzählers (Variante: Messkapsel) inkl. Gehäuse aus Messing. Diese Variante wird insbesondere für die Unterputzinstallation verwendet.



Abbildung 7: Hydraulik eines Messkapselzählers [56]

Eine weitere Variante des Flügelradzählers ist der Einstrahler (siehe Abbildung 8), welcher für den Einbau in Rohrleitungen mittels Anschlussverschraubungen konzipiert ist. Das Messwerk erfasst dabei kleinste Durchlaufmengen [57].



Abbildung 8: Zähler der Variante „Einstrahler“ mit aufgesetztem Zählwerk [56]

6 KONZEPTIONIERUNG EINER AUTOMATISIERTEN DEMONTAGELINIE FÜR WASSERZÄHLER

Da die aktuellen Überlegungen zur automatisierten Demontage von E/E-Geräten keine Anwendung auf die speziellen Anforderungen in der Haustechnik finden, wurde unter Berücksichtigung der im vorherigen Kapitel genannten Herausforderungen eine spezielle Demontagelinie für Wasserzähler entwickelt.

6.1 DARSTELLUNG DES AUFBEREITUNGSPROZESSES

Diese Ausarbeitung entstand im Rahmen des Forschungsprojekts AutoDis, welches in Kooperation mit den beiden Partnern Lorenz GmbH sowie der ITQ GmbH durchgeführt wurde [58]. Die nachfolgend genannten Prozessschritte bei der Aufbereitung sind sowohl für den manuellen Demontageprozess als auch für die automatisierte Variante gültig [46].

Am Wareneingang treffen die Rückläuferprodukte ein, anschließend werden diese manuell sortiert und erfasst. Im Anschluss durchlaufen die Geräte das Bewertungssystem, welches nur speziell für Geräte des Herstellers Lorenz GmbH konzipiert ist. Die leere Gitterboxen, welche lediglich als Ladehilfsmittel fungieren sowie weitere Produkte (Rauchmelder, Wärmemengenzähler und Geräte von anderen Herstellern) können derzeit nicht berücksichtigt werden. Für Lorenz-Zähler lässt sich mit Hilfe des Bewertungssystems in Abbildung 9 (oben, mittig dargestellt), spezifisch für jedes Bauteil die spätere R-Strategie bestimmen. Der erste Schritt ist das Aufstechen der Haube. Dadurch wird die Verbindung zwischen dem Zählwerk und Hydraulik, welche fest miteinander verbunden sind, getrennt. Die Hydraulikmodule sind ebenfalls Bestandteil des Rückläuferprodukts. Die Messingbauteile werden gereinigt und wiederverwendet. Anschließend werden die Baugruppen Zählwerk und Hydraulik zum nächsten Prozessschritt geführt, die Haube wird aufgrund der zerstörenden Demontage, entsorgt.

Demnach lässt sich die Reuse-Strategie (R3) für alle Komponenten, die als Gutteil klassifiziert wurden, anwenden. Die weiteren Bearbeitungsschritte unterscheiden sich jedoch. Demnach gelangen die **Wasserzähler (WZ)** im nächsten Schritt zur Eichung. Die **Zählwerke (ZW)** werden zur Druckstation transportiert und erhalten dort ein neues Label (Aufdruck der Seriennummer, Datamatrix-Code, Produkttyp, Produktionsdatum etc.). Die als funktionsfähig klassifizierte **Platinen (PCB)** werden neu programmiert. Funktionierende Hydraulikmodule werden nach der Reinigung direkt zur Wasserzähler-Montage transportiert. Bei den Bauteilen Zählwerk (ZW) und Hydraulik wird eine technische Aufbereitung im Sinne der Remanufacturing-Strategie (R6) durchgeführt. Nach Abschluss der Aufbereitung können diese Bauteile wieder in den Produktionskreislauf eingeschleust werden und als Neuprodukt verkauft werden. Dieser Prozess ist in Abbildung 10 dargestellt.

6.1.1 FÖRDERTECHNIK

Nachfolgend wird in Abbildung 11 die gesamte Demontageanlage dargestellt. Das Transportband bildet das zentrale Element, welches die einzelnen Module (Deckeldemontage sowie Platinen- und Batterieentnahme) miteinander verbindet. Dabei handelt es sich um ein Transfersystem des Typs „Bosch Rexroth, TS2plus“ mit einer Gesamtlänge von 8000 mm und einer Breite von 600 mm, die Laufhöhe beträgt dabei 950 mm. Das Transfersystem, angetrieben durch einen Zahnriemen, bewegt sich im Uhrzeigersinn mit einer Maximalgeschwindigkeit von 12 m pro Minute. Auf dem Transportband sind einzelne Werkstückträger des Typs „Bosch Rexroth, WT2“ angeordnet, die jeweils ein Zählwerk in einer speziellen Aufnahme fassen.

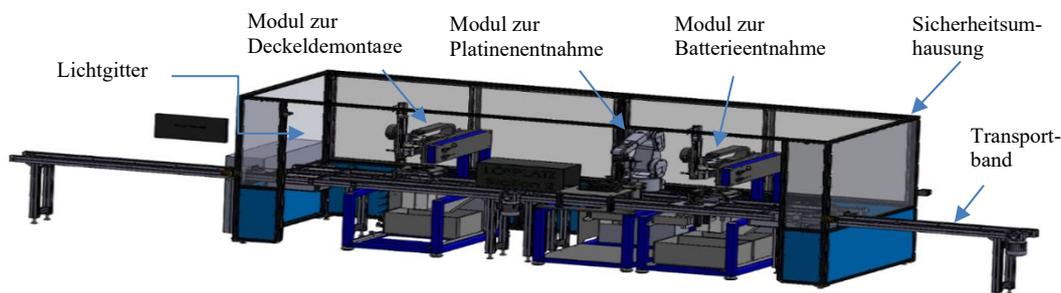


Abbildung 11: Darstellung des Demontagesystems [59]

In Abbildung 12 ist ein Werkstückträger abgebildet, welcher mit einer speziellen Aufnahme für Zählwerke bestückt ist.

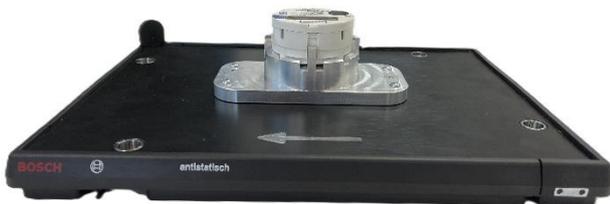


Abbildung 12: Werkstückträger mit spezieller Aufnahme für Zählwerke [60]

6.1.2 ZÄHLWERKSDEMONTAGE

Die Zählwerksdemontage bildet den nächsten Baustein der Demontagestrecke und umfasst mehrere Teilschritte (Deckeldemontage, Entlötprozess, Entnahme der Platine und der Batterie). Dazu wird der Deckel des Zählwerks abgenommen. Dies geschieht mit einem Vierfingergreifer, des Typs „SCHUNK, PZV64“. Die zusätzlich nötigen Greiferfinger sind eine Eigenentwicklung der Lorenz GmbH.

DECKELDEMONTAGE

Dabei wird der Zählwerksdeckel von einem am Linearportal des Typs „Festo, YXCL-2“ befestigten Vierfingergreifer (SCHUNK, PZV64) abgenommen. Abbildung 13 zeigt

Über Hub-Quereinheiten des Typs „Bosch Rexroth, HQ2/O“ in Verbindung mit Modulen zum elektrischen Quertransport des Typs „Bosch Rexroth, EQ2/TR“ können die Werkstückträger entweder auf der Hauptspur weiterverfahren oder auf die Nebenspur ausgeschleust werden, sodass die darauf befindlichen Zähler dort von den Bearbeitungsstationen demontiert werden können. So wird sichergestellt, dass Zählwerke, die bei der Bewertung als „gut“ deklariert wurden, die Bearbeitungsstrecke ohne Demontage passieren, um als Ganzes wiederverwendet werden zu können. Aufgrund der beweglichen Kinematiken ist die Anlage an drei Seiten von einer Sicherheitsumhausung umschlossen. Die Vorderseite ist durch ein Lichtgitter vor Eingriffen geschützt.

das Modul zur Deckeldemontage. Für defekte Bauteile (z. B. Platinen, Hauben) oder Kleinmaterial (Dichtungen, Displays etc.) wird die Strategie zum Recycling (R8) genutzt.

Dabei wird der Werkstückträger mit dem zu demontierenden Zählwerk hier zunächst von einem Stopper angehalten und anschließend von einer Hubpositioniereinheit des Typs „Bosch Rexroth, HP2/L“ angehoben und exakt positioniert, wodurch die präzise Demontage ermöglicht wird. Eine Vorrichtung über dem Werkstückträger fixiert dann den Zählwerksbecher, um sicherzustellen, dass nur der Deckel angehoben wird. Unter dem Modul befindet sich eine Auffangbox für die Zählwerksdeckel, welche in einem nachgelagerten Prozess demontiert werden, um einzelne Komponenten z. B. das Display wiederzuverwenden.

ENTLÖTEN

Danach beginnt der Entlötprozess, bei dem die insgesamt acht Verbindungsstellen des Zählwerks entlötet und die einzelnen Komponenten getrennt werden.

Wie bereits beschrieben, handelt es sich beim manuellen Entlöten um einen komplexen und aufwändigen Prozess. Im Laufe der Entwicklung durchgeführte Recherchen zeigten auf, dass derzeit keine passenden Anlagen zum automatisierten Entlöten verfügbar sind. Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojekts entschieden, den Entlötvorgang

hier zu simulieren, indem der Werkstückträger mit dem Zählwerk in einer kleinen Umhausung stoppt und anschließend weitertransportiert wird.

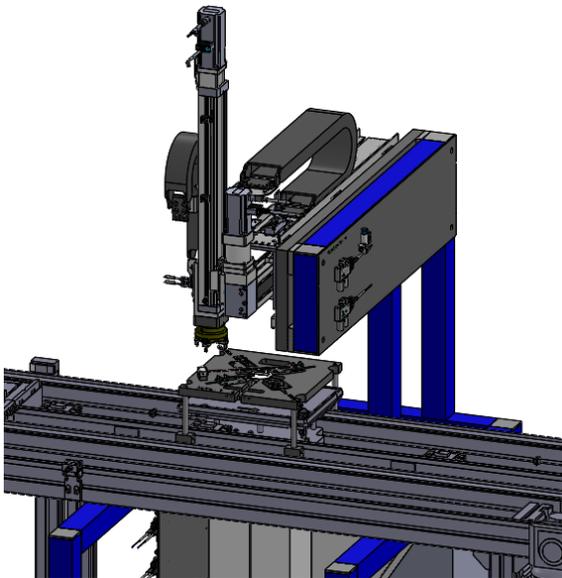


Abbildung 13: Modul zur Deckeldemontage [59]

PLATINENENTNAHME

Im nächsten Schritt wird die Platine aus dem Zählwerk entnommen. Um eine exakte Position des Zählwerks zu gewährleisten, wird der Zählwerksbecher durch vier Rastnasen geklemmt und von der Unterseite durch die Hubeinheit an die Rastnasen herangedrückt. Ein Sechssachsroboter vom Typ „Mitsubishi, RV-7FRLM“, der ebenfalls mit einem Vierfingergreifer vom Typ „SCHUNK, PZV64“ ausgerüstet ist, hebt die Platine ein kleines Stück an, woraufhin ein Keil (dabei fungieren drei Pneumatikzylinder als Stabilisatoren) zwischen Batterie und Platine einfährt, die in Öffnungen des Zählwerksbeckers zwischen diesen und die Platine eingreifen.

So wird verhindert, dass die Batterie an der Platine hängen bleibt. Der Roboter legt die Platine auf einem Zwischenplatz ab und greift sie erneut mit einem Zweifingergreifer des Typs „Festo, HGPM-08-EO-G6“. Die Platine wird dann in einer speziellen, bereits bei der Lorenz GmbH für die Produktion der Wasserzähler verwendeten Transportbox abgelegt. Platinen, mit der Bewertung „Schlechtteil“, werden dabei vor dem Umgreifen durch einen Schacht in einen Recyclingbehälter abgeworfen. Die Abbildung 14 veranschaulicht das Modul zur Platinenentnahme.

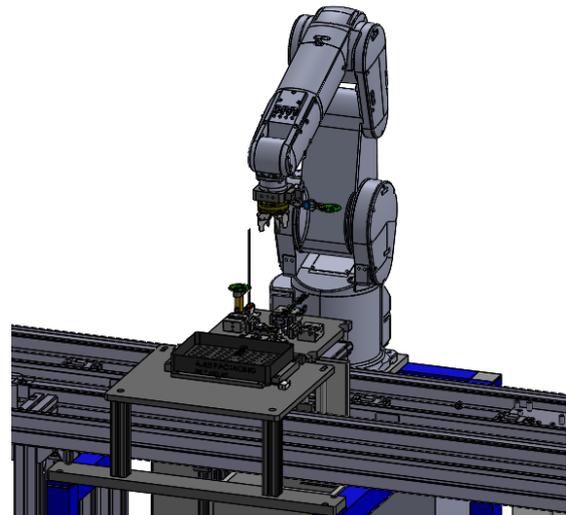


Abbildung 14: Modul zur Platinenentnahme [59]

BATTERIEENTNAHME

Das letzte Modul der Demontage ist die Batterieentnahme. Hier befindet sich ein weiteres Linienportal, welches nach dem Positionieren und Arretieren der Komponenten entsprechend der vorherigen Schritte zunächst die Batterie in eine federnde Vorrichtung am Manipulator einklemmt. Über einen Vierfingergreifer, der auch bei den anderen Modulen des Systems im Einsatz ist, wird anschließend der Zählwerksbecher gegriffen. Beide Komponenten werden in ihre jeweiligen Sammelbehälter sortiert, wobei die Batterie an einer Hakenvorrichtung abgestreift wird. Der Zählwerksbecher wird auf einer Rampe abgelegt, welche zum entsprechenden Behälter führt. Abbildung 15 veranschaulicht das Modul zur Batterieentnahme. Nach dem letzten Demontageschritt wird nun der leere Werkstückträger zurück auf die Hauptstrecke geschleust, was den letzten Schritt des Ablaufs darstellt.

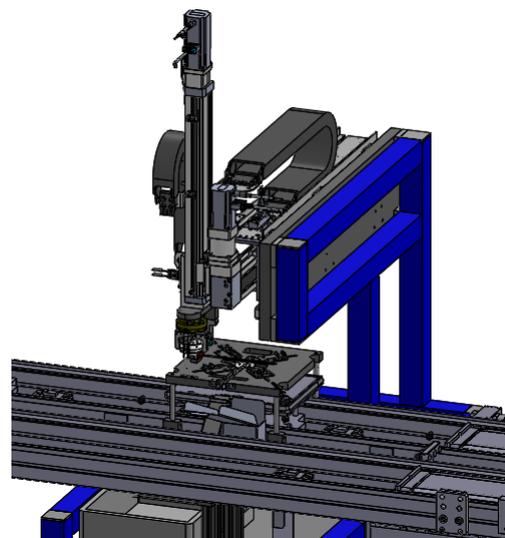


Abbildung 15: Modul zur Batterieentnahme [59]

7 DIGITALER ZWILLING DER DEMONTAGEANLAGE

Als Digitaler Zwilling (DZ) wird ein virtuelles Abbild eines physischen Objekts, Prozesses oder Systems bezeichnet, das dessen Eigenschaften, Zustände und Verhalten in digitaler Form widerspiegelt. Insbesondere durch die Kopplung mit realen Betriebsdaten aus Sensorik, Aktorik und IoT-Plattformen eröffnet der Digitale Zwilling neue Möglichkeiten für Planung, Betrieb und Optimierung. Simulationen innerhalb dieses Konzepts sind von zentraler Bedeutung, um das Verhalten des realen Systems virtuell zu konzipieren, zu analysieren und Entscheidungen datenbasiert abzusichern [61], [62].

Das Ziel der Simulation mit dem Digitalen Zwilling besteht in der verlässlichen Vorhersage, Optimierung und Validierung technischer Systeme. So kann der Digitale Zwilling über den gesamten Produktlebenszyklus des realen Objekts in der Konzeption, Entwicklung, Produktion, im Betrieb sowie in der Wartung und Optimierung genutzt werden [63]. Daraus ergeben sich Anforderungen für den industriellen Einsatz hinsichtlich Modelltreue (präzise Abbildung physikalischer, funktionaler und logischer Eigenschaften), Interoperabilität (Anbindung an CAD-, ERP- oder IoT-Plattformen), Skalierbarkeit (Anwendbarkeit für Einzelkomponenten bis zu kompletten Fabriken), Echtzeitfähigkeit (insbesondere für die virtuelle Inbetriebnahme oder zur Produktionsüberwachung), Datenintegration (Nutzung von Sensordaten) [43].

7.1 AUSWAHL DES SIMULATIONSTOOLS

Üblicherweise wird ein CAD-Modell in ein Simulationstool importiert und so die Informationen an das erzeugte Modell übergeben. Diese Informationen sind beispielweise Verfahrenswege von Achsen, Roboter oder Transportbändern. Diese Punkte werden vom Tool „ISG-virtuos“, der ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, größtenteils abgedeckt. Dabei handelt es sich um eine Simulationsplattform für Digitale Zwillinge zur virtuellen Inbetriebnahme. ISG-virtuos ermöglicht die Erstellung von Digitalen Zwillingen zur virtuellen Inbetriebnahme sowie die Entwicklung von Simulationsmodellen. Diese werden sowohl im digitalen Engineering als auch in der Produktivphase eingesetzt. Das Tool „ISG-virtuos“ deckt diese Voraussetzungen ab und ermöglicht die Erstellung von digitalen Zwillingen zur virtuellen Inbetriebnahme. Dabei deckt das Tool die notwendigen Bausteine für „Model-in-the-Loop-“ sowie „Hard- und Software-in-the-Loop-Simulationen“ sowie die nötige Co-Simulation ab. Da diese Software bereits in anderen Projekten bei der Lorenz GmbH genutzt wurde, war der Einsatz von „ISG-virtuos“ eine Vorgabe des Kooperationspartners, der ITQ GmbH [64]. So wurde bereits die Montagelinie für die Zählwerke mit diesem Tool konzipiert.

7.2 ERSTELLUNG DES DIGITALEN ZWILLINGS IN ISG-VIRTUOS

Auf Basis des CAD-Modell des Digitalen Zwilling wird das statische Modell in ein dynamisches Modell umgewandelt. Dies geschieht in der Produktion durch 3D-Simulationen, welche den Prozessablauf automatisierter Vorrichtungen abbilden. Zusammenfassend lässt sich die Aufgabe wie folgt aufteilen:

- Kinematisierung aller Vorgänge im statischen Modell
- Darstellung des Materialflusses im Hinblick auf Transport und Materialhandling
- Einbindung von kinematischen Randbedingungen
- Programmierung einer internen Ablauflogik

Zunächst liegt als Basis ein starres CAD-Modell in ISG-virtuos vor. Jede bewegliche Komponente wird über interne KinAxis-Elemente dargestellt. Dies sind Komponenten, die Bewegung in der virtuellen Welt in eine translatorische oder rotatorische Richtung ermöglichen. Üblicherweise sind jene Aktorkomponenten als KinAxis-Element modelliert, um eine solche Bewegung zu realisieren. Damit ergibt sich zum einen die Aufgabe, passende CAD-Komponenten mit KinAxis-Elementen zu verknüpfen. Zum anderen müssen ebenfalls Geschwindigkeitsparameter korrekt an die KinAxis-Elemente übergeben werden. Diese wurden über die jeweiligen Herstellerseiten ermittelt und eingebunden.

Eine weitere Aufgabe ist die Simulation des Materialflusses. Dies umfasst Themen wie Materialtransport und Materialhandling. Zum Materialtransport werden im Simulationsmodell sowohl die Transportbänder als auch das transportierte Material (Werkstückträger mit Zählwerk) abgebildet. Im vorliegenden Fall wurden das Hauptband, Bearbeitungsband und die beiden Transportbänder bei den Hubquer-Einheiten modelliert. Komponenten wie Stopper und Induktivsensoren gelten als Teilkomponenten der Transportbänder. Werkstückträger mit Zählwerken werden am Anfang des Transportbandes generiert. Hierbei wird jedes Zählwerk als eine Baugruppe bestehend aus Zählwerksdeckel, Platine, Batterie und Zählwerksbecher abgebildet. Jede dieser Bauteile wird in den entsprechenden Bearbeitungsstationen über Pick-and-Place Mechanismen des Tools ISG-virtuos dargestellt.

Die vereinfachte Physik im Modell ist ausreichend, um ein entsprechendes Materialverhalten für die Demontagelinie zu simulieren.

Als nächstes sind die kinematischen Randbedingungen festzulegen. Dies umfasst die Integration von Endlagen und Kollisionskörpern. Mit Hilfe des physikbasierten Materialflusses im Tool ISG-virtuos lassen sich viele dieser Aufgaben im integrierten Blockdiagramm parametrieren.

8 FAZIT UND AUSBLICK

Um die Notwendigkeit der Automatisierung in Verbindung mit einer hohen Investition in eine automatisierte Demontagelinie zu begründen, sind die hohen Stückzahlen an Rückläuferprodukten zu nennen. Diese sind aufgrund des prognostizierten Fachkräftemangels in der deutschen Industrie [65] ohne Automatisierung nicht zu bewältigen.

Die entwickelte Systemarchitektur schafft neue Möglichkeiten bei der automatisierten Demontage von Produkten im E/E-Bereich. Dies ist zur weiteren Forschung im Bereich der Kreislaufwirtschaft relevant.

Außerdem eröffnet das modulare, offene Design des konzipierten Anlage Möglichkeiten und Anknüpfungspunkte für eine Weiterentwicklung des Demontageprozesses. So muss beispielsweise zu einem späteren Zeitpunkt ein automatisierter Entlötprozess in die Anlage integriert werden, damit die Prozessautomatisierung vollständig ist. Andererseits lassen sich auch die bereits entwickelten Demontagestationen und -vorgänge, wie z. B. das Trennen von Batterie und Platine, als isoliertes System in andere Anwendungen übertragen.

Weitere Schritte sind die Überlegungen zum zirkulären Produktdesign, sodass die Demontagevorgänge vereinfacht und eine Automatisierung aufwandsärmer realisierbar ist.

Markus Ludsteck M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München.

Markus Ludsteck, geboren 1991 in München, studierte Wirtschaftswissenschaften mit Schwerpunkt Logistik und ist seit Februar 2023 als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig.

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, Professor am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) an der Technischen Universität München

Adresse: **fml** Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching, Germany,
Phone: +49 89 289 15951,
E-Mail: markus.ludsteck@tum.de

9 LITERATUR

- [1] H. Keller und K. Eickhoff, *Kupfer und Kupferlegierungen* (Werkstattbücher, Für Betriebsangestellte, Konstrukteure und Facharbeiter 45). Berlin, Heidelberg: Springer, 1955.
- [2] o. V. "Die 4 Vor- und 2 Nachteile von Kunststoffwasserzählern." Zugriff am: 23. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.bmagmeter.com/de/die-4-vor-und-2-nachteile-von-kunststoffwasserzaehlern/>
- [3] Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz, *Verordnung über das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Messgeräten auf dem Markt sowie über ihre Verwendung und Eichung: MessEV*, 2021.
- [4] Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz, *Mess- und Eichgesetz: MessEG*, 2014.
- [5] G. Wendt, H. Schonlau, T. Oldörp, D. Schumann und T. Jahn, "Über das Messverhalten von Wasserzählern in kommunalen Versorgungsnetzen," 2018, doi: 10.7795/110.20180411B. Zugriff am: 23. August 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/110.20180411B>
- [6] Lorenz GmbH & Co. KG. "Ausgereift bis ins Detail." Zugriff am: 23. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.lorenz-meters.de/produkte/>
- [7] *Grundlage für Auswahl, Bemessung, Einbau und Betrieb aller Arten von Wasserzählern*, W406, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2021. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/regional/nrw/pdf/regelwerk/2-quartal-2021.ppsx>
- [8] *Wasserzähler - Anforderungen und Prüfungen*, W421, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2009. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/regional/nrw/pdf/regelwerk/2-quartal-2021.ppsx>
- [9] W. Werner und R. Turkovic, "Werkstoffe für Wasserzähler," *energie | wasser-praxis*, Nr. 9, S. 36–41, 2018. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/wasser/netze/werkstoffe-fuer-wasserzaehler-1809werner.pdf>
- [10] GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V., *Wasserzähler werden in Deutschland viel zu häufig gewechselt – Verlängerung der Eichfristen würde Haushalte bei Wohnkosten entlasten*. Berlin, 2021. Zugriff am: 23. August 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.gdw.de/pressecenter/pressemeldungen/wasserzaehler-werden-in-deutschland-viel-zu-haeufig-gewechselt-verlaengerung-der-eichfristen-wuerde-haushalte-bei-wohncosten-entlasten/>
- [11] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. Bocken und E. J. Hultink, "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?," *Journal of Cleaner Production*, Jg. 143, S. 757–768, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- [12] Ellen MacArthur Foundation. "Towards the circular economy: Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition." Zugriff am: 8. Juli 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- [13] P. Deutz, "Circular Economy," in *International Encyclopedia of Human Geography*, Elsevier, 2020, S. 193–201.
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, *Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie*, 2024. Zugriff am: 24. August 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.bundesumweltministerium.de/download/nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie-nkws>
- [15] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, *Die Obhutspflicht im Kreislaufwirtschaftsgesetz*, 2024. Zugriff am: 24. August 2025. [Online.] Verfügbar unter: <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/kreislaufwirtschaft/abfallpolitik/uebersicht-kreislaufwirtschaftsgesetz/die-obhutspflicht-im-kreislaufwirtschaftsgesetz>
- [16] Europäische Kommission, *The European Green Deal*, 2019.
- [17] Europäische Kommission, *A new circular economy action plan - for a cleaner and more competitive Europe*, 2020.
- [18] Circularity Gap, "The Circularity Gap Report 2024," 2024.
- [19] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy und F. Cluzel, "Heavy vehicles on the road towards the circular economy: Analysis and comparison with the automotive industry," *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 135, S. 108–122, 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.017.
- [20] P. Eisenhauer. "Der Green Deal und die Kreislaufwirtschaft - KMU dürfen sich auf einen Wandel einstellen." Zugriff am: 24. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.mittelstand-digital-wertnetzwerke.de/fileadmin/user_upload/Materialien/Sonstiges/210818_FB_GreenDeal_final.pdf
- [21] Europäische Kommission, *Verordnung (EU) 2024/1781 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte*, 2024.
- [22] J. Potting, M. P. Hekkert, E. Worrell und A. Hanemaaijer, "Circular Economy: Measuring innovation in the product chain," 2017. Zugriff am: 24. August 2025. [Online.] Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/319314335_Circular_Economy_Measuring_innovation_in_the_product_chain
- [23] Erik G. Hansen *et al.*, "Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen," 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.28086.22080.
- [24] P. Hirsch und C. Schempp, "Categorisation System for the Circular Economy: A sector-agnostic approach for activities contributing to the circular economy," 2020. Zugriff am: 24. August 2025.
- [25] J. Mast, F. von Unruh und W. Irrek. "R-Strategien und Innovationen im Circular Economy Management: Perspektiven. Neues zur zirkulären Wertschöpfung." Zugriff am: 24. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://prospektoleg.ruhr/wp-content/>
- [26] S. Muñoz, M. R. Hosseini und R. H. Crawford, "Towards a holistic assessment of circular economy strategies: The 9R circularity index," *Sustainable Production and Consumption*, Jg. 47, S. 400–412, 2024, doi: 10.1016/j.spc.2024.04.015.
- [27] H. Warnecke, *Montage, Handhabung, Industrieroboter: Internationaler MHI-Kongress im Rahmen der Hannover-Messe '85*. Springer Verlag, 2013.
- [28] R. H. Schmitt *et al.*, "Closing the Loop with Adaptive Automated Disassembly," 2023, doi: 10.24406/PUBLICA-943.
- [29] A. Huber, *Demontageplanung und -steuerung: Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen* (Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2001 u.d.T.:

- Huber, Alexander: Planung und Steuerung industrieller Demontageprozesse mit PPS-Systemen (Magdeburger Schriften zur Wirtschaftsinformatik). Aachen: Shaker, 2001. Zugriff am: 25. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.shaker.de/de/site/content/shop/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8265-9341-3>
- [30] M. Porta, F. Sebastiani, M. Santochi und G. Dini, "Destructive Disassembly of End-of-Life Household Appliances: A Structured Analysis of Cutting Methods of the Housing," *Jg. 486*, S. 653–662, 2005, doi: 10.1007/3-211-38053-1_64.
- [31] M. Nave, "Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubverbindungen," Dissertation, Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Universität Dortmund, Dortmund, 2003. [Online]. Verfügbar unter: <https://eldorado.tu-dortmund.de/server/api/core/bitstreams/9e0e8b81-fe8c-48f9-8246-b6fc03f75284/content>
- [32] K. Feldmann, S. Trautner und O. Meedt, "Innovative disassembly strategies based on flexible partial destructive tools," *Annual Reviews in Control*, Early Access.
- [33] Y. Lu, W. Pei und K. Peng, "State of the art of automatic disassembly of WEEE and perspective towards intelligent recycling in the era of Industry 4.0," *Int J Adv Manuf Technol*, *Jg. 128*, 7-8, S. 2825–2843, 2023, doi: 10.1007/s00170-023-12043-3.
- [34] *DIN EN IEC 81346-2: Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte*, Deutsches Institut für Normung, Okt. 2020.
- [35] J. Saenz, O. Poenicke, N. Elkmann, D. Berndt und J. Arlinghaus, "Automatisierte Demontage für Re-X Prozesse," Sep. 2023. Zugriff am: 25. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/wt-werkstattstechnik/fraunhofer-gesellschaft/automatisierte-demontage-fuer-re-x-prozesse>
- [36] E. A. Oke und H. Potgieter, "Discarded e-waste/printed circuit boards: a review of their recent methods of disassembly, sorting and environmental implications," *J Mater Cycles Waste Manag*, *Jg. 26*, Nr. 3, S. 1277–1293, 2024, doi: 10.1007/s10163-024-01917-7.
- [37] M. Choux, S. W. Pripp, F. Kvalnes und M. Hellström, "To shred or to disassemble – A techno-economic assessment of automated disassembly vs. shredding in lithium-ion battery module recycling," *Resources, Conservation and Recycling*, *Jg. 203*, S. 107430, 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107430.
- [38] J. Xiao und K. Huang, "A comprehensive review on human–robot collaboration remanufacturing towards uncertain and dynamic disassembly," *Manufacturing Rev.*, *Jg. 11*, S. 17, 2024, doi: 10.1051/mfreview/2024015.
- [39] P. K. Mallick, K. B. Salling, D. C. A. Pigosso und T. C. McAloone, "Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review," *Journal of environmental management*, Early Access. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117017.
- [40] A. Preut, J.-P. Kopka und U. Clausen, "Digital Twins for the Circular Economy," *Sustainability*, *Jg. 13*, Nr. 18, S. 10467, 2021, doi: 10.3390/su131810467.
- [41] J. Mügge, A. Seegrün, T.-K. Hoyer, T. Riedelsheimer und K. Lindow, "Digital Twins within the Circular Economy: Literature Review and Concept Presentation," *Sustainability*, *Jg. 16*, Nr. 7, S. 2748, 2024, doi: 10.3390/su16072748.
- [42] M. Timperi, K. Kokkonen und L. Hannola, "Digital twins for environmentally sustainable and circular manufacturing sector: visions from industry professionals," *Production & Manufacturing Research*, *Jg. 12*, Nr. 1, 2024, Art. Nr. 2428249, doi: 10.1080/21693277.2024.2428249.
- [43] E. Negri, L. Fumagalli und M. Macchi, "A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems," *Procedia Manufacturing*, *Jg. 11*, S. 939–948, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.
- [44] Bauministerkonferenz, *Musterbauordnung: MBO*, 2020.
- [45] F. Yazdandoost und A. Izadi, "An asset management approach to optimize water meter replacement," *Environmental Modelling & Software*, *Jg. 104*, S. 270–281, 2018, doi: 10.1016/j.envsoft.2018.03.015.
- [46] Lorenz GmbH & Co. KG, "Aufbereitungsprozess für Wasserzähler", Jul. 2023.
- [47] A. Zacharaki *et al.*, "RECLAIM: Toward a New Era of Refurbishment and Remanufacturing of Industrial Equipment," *Frontiers in artificial intelligence*, Early Access. doi: 10.3389/frai.2020.570562.
- [48] Kompetenzzentrum für zirkuläre Wirtschaft und Ressourceneffizienz (VDI ZRE). "Kreislaufführung von Produkten und Bauteilen." Zugriff am: 25. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.ressource-deutschland.de/themen/kreislaufwirtschaft/kreislauffuehrung-im-verarbeitenden-gewerbe/kreislauffuehrung-von-produkten-und-bauteilen/>
- [49] Qundis. "Qundis-Wasserzähler im Schnellüberblick." Zugriff am: 25. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://qundis.de/produkte/wasserzaehler/>
- [50] Viewshine. "Kunststoff-Wasserzähler." Zugriff am: 25. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://de.viewshinemetering.com/ultrasonic-water-meter/plastic-water-meter.html>
- [51] VKU - Verband kommunaler Unternehmen. "Die thermische Verwertung." Zugriff am: 25. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.vku.de/die-thermische-verwertung/#:~:text=Schadstoffsenke%20f%C3%BCr%20Umwelt%2D%20und%20Gesundheitsschutz,Jahren%20keine%20Rolle%20mehr%20spielen.>
- [52] P. Morsetto, "Targets for a circular economy," *Resources, Conservation and Recycling*, *Jg. 153*, S. 104553, 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104553.
- [53] M. Ciupek. "Elektrogeräte automatisiert demontieren." Zugriff am: 26. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/automation/elektrogeraete-automatisiert-demontieren>
- [54] Institut für Forschung und Transfer (RIF). "Nutzung digitaler Abbilder zur effizienten Steuerung von Aufbereitungsprozessen der Kreislaufwirtschaft am Beispiel von Kühlgeräterecyclinganlagen." Zugriff am: 26. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.rif-ev.de/artikel/dikuerec>
- [55] TUM, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. "Car2Car - Kreislauffähige, nachhaltige Verwertungskonzepte." Zugriff am: 26. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.mec.ed.tum.de/fml/forschung/aktuelle-forschungsprojekte/car2car-kreislauffaehige-nachhaltige-verwertungskonzepte/>
- [56] Lorenz GmbH & Co. KG, "Aufbau eines Wasserzählers", Mrz. 2023.

- [57] A. Jansch, "Kalt- und Warmwasserzähler im Wohnungsbau," *ikz praxis*, 7ff. Zugriff am: 29. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.ikz.de/ikz-praxis-archiv/p0004/000406.php>
- [58] VDI Technologiezentrum GmbH. "Automatisierte und intelligent vernetzte Demontage zirkulärer Smart Meters (AutoDis)." Zugriff am: 31. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.digiress.de/projekte/AutoDis>
- [59] Lorenz GmbH & Co. KG, "CAD-Modelle für Demontagelinie", Mai. 2025.
- [60] ITQ GmbH, "Abbildungen: Komponenten, Demontagesystem", Sep. 2025.
- [61] F. Tao, H. Zhang, A. Liu und A. Y. C. Nee, "Digital Twin in Industry: State-of-the-Art," *IEEE Trans. Ind. Inf.*, Jg. 15, Nr. 4, S. 2405–2415, 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [62] M. Grieves. "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication." Zugriff am: 30. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication
- [63] F. Tao, Hg. *Digital twin driven smart design*. London: Academic Press, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9780128189184>
- [64] V. Saini, "Benchmark eines Simulationssystems zur Entwicklung eines Digital Twins im Forschungsbereich der Circular Economy," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fertigungstechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2023.
- [65] A. Hammermann, J. Pimpertz und O. Stettes, "Bis 2034 fehlen 178.000 Arbeitskräfte im Maschinenbau," Köln, 2024. Zugriff am: 23. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iwkoeln.de/presse/pressemitteilungen/andrea-hammermann-jochen-pimpertz-oliver-stettes-bis-2034-fehlen-178000-arbeitskraefte-im-maschinenbau.html>