

Praxisorientierte Lernfabrik zur Bewältigung der Herausforderungen im Remanufacturing

RemanLab – Lernfabrik für Remanufacturing

J. Koller, J. Große Erdmann, E. Ahmeti, R. Wolf, R. Miehe, F. Döpper, A. Sauer

ZUSAMMENFASSUNG Remanufacturing gewinnt im Kontext von Ressourcenknappheit und Nachhaltigkeit weiter an Bedeutung. Forschung und Kompetenzentwicklung am realen Objekt sind dabei zentral, um die spezifischen Herausforderungen zu bewältigen. Im RemanLab wird das etablierte Konzept der Lernfabrik auf das Remanufacturing übertragen und die Prozesskette praxisnah vermittelt. Dies ermöglicht Wissenstransfer, Produktbewertungen und die Entwicklung effizienter Prozessketten, insbesondere mittels digitaler Technologien.

STICHWÖRTER

Kreislaufwirtschaft, Lernfabrik, Remanufacturing

RemanLab – Learning Factory for Remanufacturing

ABSTRACT Remanufacturing is becoming increasingly important in the context of resource scarcity and sustainability. Research and skills development on real objects are key to overcoming the specific challenges. RemanLab transfers the established concept of learning factory to remanufacturing while teaching the process chain in a practical way. This enables knowledge transfer, product evaluations, and the development of efficient process chains, particularly via digital technologies.

1 Remanufacturing: Werterhaltungsstrategie der Kreislaufwirtschaft

Die Linearwirtschaft in der heutigen industriellen Produktion basiert auf einem kontinuierlichen Rohstoffabbau, der Transformation dieser Rohstoffe in Produkte und der finalen Entsorgung als Abfälle oder Emissionen am Ende des Nutzungszyklus [1]. Dies hat gravierende Folgen, darunter die miteinander verwobenen und sich verstärkenden Auswirkungen des Klimawandels, der Umweltverschmutzung und des Verlusts der biologischen Vielfalt, die gemeinsam eine „dreifache planetare Krise“ darstellen. [2]

Um diese ökologischen und sozialen Herausforderungen zu bewältigen, ist eine Transformation des Wirtschaftssystems zur Kreislaufwirtschaft nötig. In einer Kreislaufwirtschaft werden Ressourcen effizient genutzt, Produkte wiederverwendet und Abfälle vermieden, was zur nachhaltigen Nutzung der natürlichen Ressourcen führt. Ein zentraler Bestandteil dieser Transformation sind Werterhaltungsprozesse, auch als „R-Strategien“ bekannt, die darauf abzielen, den Wert von Produkten und Materialien über die gesamte Lebensdauer hinweg zu bewahren. Diese Werterhaltungsprozesse reichen von der Wiederverwendung und Reparatur bis hin zum Remanufacturing, das eine besonders vielversprechende Option darstellt, um den Produktwert zu erhalten und die Lebensdauer von Produkten deutlich zu verlängern.

1.1 Definition und Abgrenzung

Nach DIN SPEC 91472 bezeichnet Remanufacturing einen werterhaltenden, standardisierten Prozess, bei dem aus aufge-

arbeiteten Bestandteilen eines oder mehrerer Gebrauchteile sowie Neukomponenten ein aufgearbeitetes Produkt mit mindestens der Funktionalität und Leistungsfähigkeit des ursprünglichen Produkts erzeugt wird [3]. Durch Remanufacturing werden somit Produktkreisläufe geschlossen und unter Wahrung beziehungsweise Wiederherstellung der Produktgestalt sowie der Produkteigenschaften eine Wiederverwendung gebrauchter Produkte am Ende der Nutzungsphase ermöglicht [4, 5].

Dadurch unterscheidet sich Remanufacturing von anderen Werterhaltungsprozessen wie Reparatur und Recycling. Während die meist handwerklich geprägte Reparatur auf die Behebung einzelner Defekte abzielt und das Recycling auf die Rückgewinnung von Materialien ausgerichtet ist, zielt Remanufacturing darauf ab, ein Produkt in seinen ursprünglichen Zustand zurückzuversetzen, um einen vollständig neuen Produktlebenszyklus zu ermöglichen. Daher bietet Remanufacturing deutliche ökonomische, ökologische sowie soziale Vorteile gegenüber anderen Werterhaltungsprozessen [3].

1.2 Potenziale und Produktbeispiele

Remanufacturing reduziert den Bedarf an neuen Rohstoffen und verringert die Umweltbelastung, da weniger Energie und Material für die Aufarbeitung von Produkten als zur Neuproduktion benötigt werden. Studien zeigen, dass Remanufacturing bis zu 90 % weniger Energie und 55 % weniger Material benötigt [6, 7]. Ökonomisch erlaubt Remanufacturing erhebliche Kostenersparnisse, da die Preise für aufgearbeitete Produkte bis zu 60 % unter denen von Neuprodukten liegen [6]. Aufarbeitungsunter-

nehmen profitieren somit von reduzierten Produktionskosten und einer höheren Wettbewerbsfähigkeit, während gleichzeitig innovative Geschäftsmodelle, wie Serviceverträge oder Leasingmodelle, neue Einkommensquellen erschließen können [8].

Remanufacturing ausgewählter Komponenten ist in der Automobil-, Luftfahrt- und Elektroindustrie sowie dem Maschinenbau bereits etabliert. Klassische Beispiele für aufgearbeitete Produkte in der Automobilindustrie sind Motoren, Getriebe, Anlasser, Lichtmaschinen oder Turbolader [9]. Weil diese Komponenten im Rahmen der Transformation zu Elektromobilität zunehmend nicht mehr gebraucht werden, steht das Remanufacturing vor Veränderungen. Die neuen spezifischen Komponenten der Elektrofahrzeuge, wie Batteriesysteme, elektrische Traktionsmotoren oder Leistungselektronik bieten ein zukünftiges Wachstumspotenzial für den europäischen Ersatzteilmarkt in Höhe von 6,2 bis 7,3 Milliarden Euro im Jahr 2040 [10].

Neben der technologischen Weiterentwicklung rückt auch die regulatorische Entwicklung in den Fokus. Beispielsweise wird das „Recht auf Reparatur“ dazu beitragen, dass Produkthersteller die Reparierbarkeit, die Verfügbarkeit und den Zugang zu Ersatzteilen verbessern. Unter diesen Rahmenbedingungen gilt es, entsprechende Prozessketten für das Remanufacturing zu entwickeln.

1.3 Herausforderungen

Remanufacturing hat Vorteile, birgt jedoch im Vergleich zur Neuproduktion zusätzliche Herausforderungen. Insbesondere Unsicherheiten und Schwankungen hinsichtlich der Menge, des Zeitpunkts und des Zustands der zurückgeführten Gebrauchteile stellen eine wesentliche Schwierigkeit dar und erschweren die Planung und Prozesssteuerung. Ursache sind beispielsweise verschiedene Nutzungsmuster und Umwelteinflüsse, die zu unterschiedlichen Zuständen der Gebrauchteile führen, was wiederum zu variablen Prozesszeiten und einer reduzierten Prozesseffizienz führen kann [11, 12]. Zudem ist die hohe Variantenvielfalt eine weitere Schwierigkeit für Aufarbeitungsunternehmen. Aufgrund der genannten Herausforderungen werden in der industriellen Praxis viele Tätigkeiten entlang der Prozesskette manuell durchgeführt.

Der Fachkräftemangel und der demografische Wandel verstärken die Notwendigkeit, neue Ansätze für die Kompetenzentwicklung im Remanufacturing zu etablieren. Das Remanufacturing erfordert ein breites Spektrum an Fähigkeiten, von der Analyse komplexer Prozessketten bis hin zum Einsatz digitaler Technologien wie künstlicher Intelligenz und Automatisierung. Das „RemanLab“ bietet eine praxisnahe Schulungsumgebung, in denen Mitarbeitende und Studierende diese Fähigkeiten erlernen und weiterentwickeln können. Beispiele hierfür sind der Einsatz von Augmented Reality zur Unterstützung von Montage- und Demontageprozessen oder die Verwendung von KI für die visuelle Prüfung und Klassifikation von Komponenten.

Um die Potenziale des Remanufacturing auszuschöpfen, gilt es, innovative Ansätze aus dem Bereich Industrie 4.0 und künstliche Intelligenz sowie Automatisierung an die Gegebenheiten des Remanufacturing anzupassen. Für diese Anforderungen und Kompetenzprofile der Mitarbeitenden bedarf es eines eigenen Lernkonzepts, das im RemanLab umgesetzt wird. Außerdem ist es wichtig, zukünftige Entscheidungsträger frühzeitig mit den notwendigen Kompetenzen auszustatten, um die steigende Komplexität und die Bewertung der wirtschaftlichen, ökologischen und

sozialen Auswirkungen entlang der Prozesskette effektiv zu bewältigen [13]. Im RemanLab werden somit die spezifischen Anforderungen des Remanufacturing dargestellt, um innovative Lösungen für die Komplexität und Unsicherheiten zu entwickeln.

2 RemanLab – Die Lernfabrik für Remanufacturing

Lernfabriken haben sich in den letzten Jahren als effektive Lernumgebungen an der Schnittstelle zwischen Ausbildung und Forschung etabliert [14]. Sie fördern Handlungs- und Problemlösekompetenzen, indem sie eine praxisnahe Verbindung zwischen Theorie und realen Produktionsprozessen schaffen. Abele *et al.* beschreiben etablierte Lernfabriken, die sich bereits mit nachhaltigen Produktionssystemen, Ressourceneffizienz und Digitalisierung befassen [15].

Das RemanLab grenzt sich von diesen Lernfabriken ab, indem die Herausforderungen und Potenziale des Remanufacturing gezielt adressiert werden. Eine Einordnung des RemanLab in die Lernfabrik-Morphologie nach Tisch *et al.* [16] erfolgt in [17].

Das RemanLab wird vom Fraunhofer-Institut für Produktions-technik und Automatisierung IPA in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl „Umweltgerechte Produktionstechnik“ der Universität Bayreuth entwickelt und betrieben. Übergeordnetes Ziel dieses Kompetenzzentrums für Remanufacturing ist die angewandte Forschung zur Entwicklung eines nachhaltigen und zukunftsorientierten Remanufacturing. Der Fokus des RemanLab liegt auf drei Schwerpunkten:

- Wissenstransfer: Vermittlung des notwendigen Wissens über einzelne Prozessschritte des Remanufacturing und den damit verbundenen Herausforderungen
- Best Practices: Untersuchung geeigneter Digitalisierungs- und Automatisierungsansätze entlang der Prozesskette zur Steigerung der Effizienz
- Produktbewertung: Analyse und Bewertung von Produkten hinsichtlich ihrer Eignung für das Remanufacturing sowie die Entwicklung zugehöriger Prozessketten

Im RemanLab werden unterschiedliche Zielgruppen angesprochen, darunter Studierende, Fachkräfte und Führungspersonal aus der Industrie. Dabei werden spezifische Kompetenzen vermittelt, die für das Remanufacturing essenziell sind:

- Analytische Fähigkeiten: Schulungen zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Komponenten und zur Optimierung von Prozessketten
- Technologisches Know-how: Praktische Erfahrungen mit innovativen Technologien wie KI-gestützter Variantenklassifikation und AR-gestützter (De-)Montageprozesse
- Systemisches Denken: Entwicklung eines Verständnisses für die Integration von Remanufacturing in die Kreislaufwirtschaft, einschließlich der Auswirkungen auf Lieferketten und Ressourcenutzung

Darüber hinaus unterstützt das RemanLab Unternehmen bei der Anpassung ihrer Geschäftsmodelle und Prozessketten an die Anforderungen der Kreislaufwirtschaft. Diese Weiterbildung ist vor allem vor dem Hintergrund des demografischen Wandels wichtig.

Das didaktische Konzept des RemanLab kombiniert praktische Demonstrationen mit theoretischem Wissen. In einer realistischen Produktionsumgebung werden die Abläufe am Beispiel von Elektrofahrradmotoren veranschaulicht und durch den Einsatz

moderner Technologien wie Augmented Reality und künstlicher Intelligenz ergänzt. Das RemanLab ermöglicht es somit, Theorie und Praxis zu verbinden und das Potenzial des Remanufacturing durch den Einsatz moderner Technologien und effizienter Prozesse weiter auszubauen.

2.1 Anwendungsfall: Elektrofahrradmotoren

Im RemanLab bilden Elektrofahrradmotoren den ersten Anwendungsfall. Sie bieten eine besonders praxisnahe und vielseitige Möglichkeit, um das Remanufacturing in einem realen Kontext zu demonstrieren und zu erforschen. Elektrofahrräder erfreuen sich in den letzten Jahren zunehmender Beliebtheit. Im Jahr 2023 wurden in Deutschland 2,1 Millionen Elektrofahrräder verkauft und damit erstmalig mehr Fahrräder mit Elektromotor (53 %) als ohne (47 %) [18].

Ein wesentlicher Bestandteil von Elektrofahrrädern sind bürsstenlose Gleichstrommotoren (BLDC-Motoren), welche je nach Modell bis zu 50 % der Gesamtkosten eines Elektrofahrrads ausmachen. Besonders verbreitet sind Mittelmotoren, die in das Tretlager und die Kurbel integriert sind und sich durch ihre Effizienz und das ausgeglichene Fahrverhalten auszeichnen. Die Auswahl von Elektrofahrradmotoren als Anwendungsfall im RemanLab basiert neben dem Praxisbezug auf weiteren Eigenschaften:

- Ergonomie: Aufgrund kompakter Größe und geringen Gewichts können die Motoren von einer einzelnen Person gehandhabt, montiert und demontiert werden.
- Komplexität: Die Vielzahl an Komponenten und Baugruppen (von mechanischen Verschleißteilen über elektronische Steuerung bis hin zu potenziell additiv gefertigten Bauteilen) ermöglicht die Integration vielfältiger Konzepte und Prozesse im Remanufacturing.
- Variantenvielfalt: Die hohe Variantenvielfalt und die Ähnlichkeit der Motoren spiegeln die Realität wider, mit der sich viele Aufarbeitungsunternehmen konfrontiert sehen und erlauben praxisnahe Bedingungen bei der Entwicklung geeigneter Entscheidungsunterstützungssysteme.
- Demontagefreundlichkeit: In der Regel kommen in Elektrofahrradmotoren lösbare Verbindungen zum Einsatz, was die Demontage erleichtert und die Wiederverwendbarkeit der Komponenten in der Lernfabrik fördert.

Die technische Umsetzbarkeit des Remanufacturing von Elektrofahrradmotoren wurde im Forschungsprojekt „AddRE-Mo“ untersucht und die zugehörige Prozesskette entwickelt [8, 19, 20].



Bild 1. Gebrauchter und aufgearbeiteter Elektrofahrradmotor.
Foto: Fraunhofer IPA

Bild 1 zeigt einen gebrauchten (links) und einen aufgearbeiteten Elektrofahrradmotor (rechts) im RemanLab.

Inzwischen wird die Aufarbeitung von Elektrofahrradmotoren auch in der industriellen Praxis umgesetzt. Beispielsweise bietet Brose Antriebstechnik GmbH & Co. KG einen Remanufacturing-Antrieb an, der etwa ein Drittel der CO₂-Emissionen im Vergleich zur Neuproduktion einspart [21].

Elektrofahrradmotoren veranschaulichen als Anwendungsfall im RemanLab die Komplexität und Herausforderungen des Remanufacturing und erlauben eine praxisnahe Vermittlung. Im Folgenden wird die zugehörige Prozesskette und Infrastruktur im RemanLab näher beschrieben.

2.2 Prozesskette

Die erweiterte Remanufacturing-Prozesskette wird in **Bild 2** dargestellt.

Der vorgelagerte Prozess beginnt mit der Beschaffung der Gebrauchteile, welche nach Produktgruppen vorsortiert und vorübergehend gelagert werden. Im Zentrum befinden sich die Hauptprozesse des Remanufacturing nach Steinhilper, die für die Aufarbeitung von Produkten notwendig sind [22]. Sie bilden den Kern des Remanufacturing und werden im RemanLab praxisnah vermittelt.

Im Folgenden werden die Hauptprozessschritte des Remanufacturing am Anwendungsfall von Elektrofahrradmotoren und deren Umsetzung im RemanLab beschrieben:

- **Eingangsprüfung:** Ziel ist die Klassifikation und Bewertung der angelieferten Gebrauchteile hinsichtlich ihrer Variante,

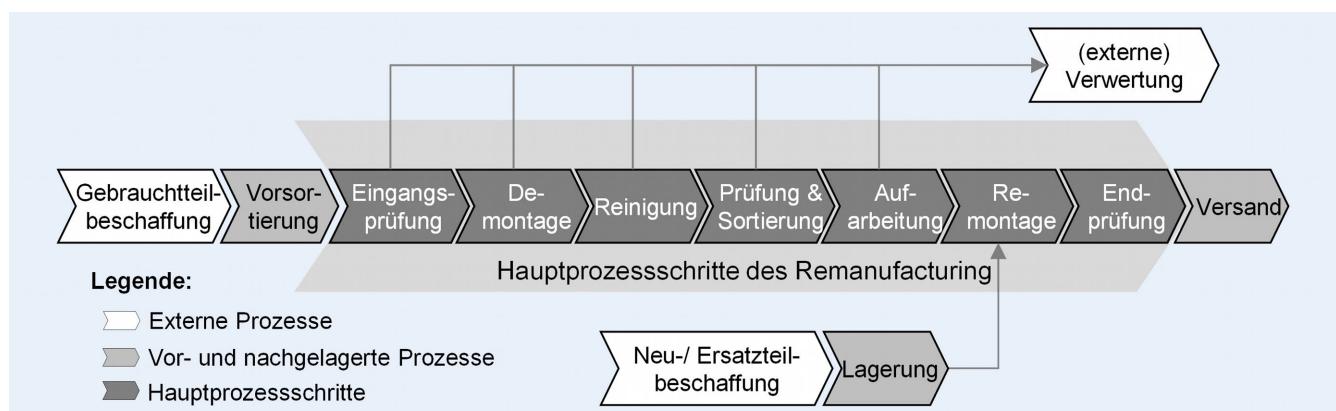


Bild 2. Erweiterte Prozesskette des Remanufacturing. Grafik: [6]

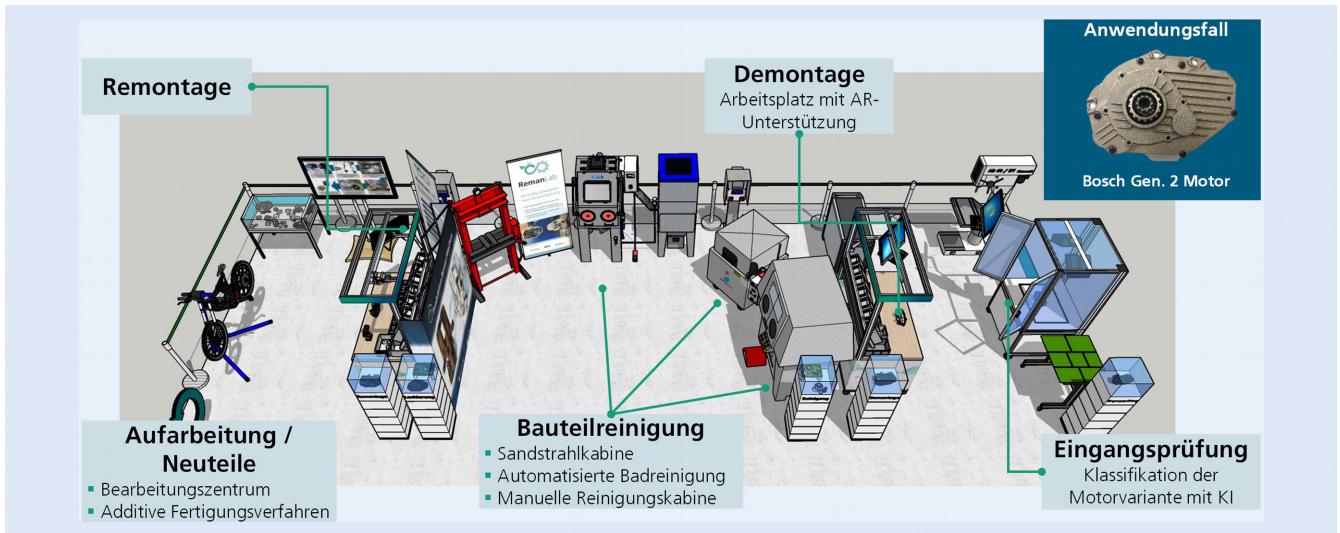


Bild 3. Übersicht des RemanLab. Grafik: Fraunhofer IPA

ihres Typs und ihres Zustands. Nicht geeignete Gebrauchteile, zum Beispiel aufgrund zu starker Beschädigungen, werden bereits in diesem Prozessschritt aussortiert. Die Eingangsprüfung der Gebrauchteile ist somit der erste der drei wichtigsten Prüfschritte in der Prozesskette des Remanufacturing neben der Prüfung und Sortierung der Komponenten sowie der Endprüfung des aufgearbeiteten Produkts [23].

- **Demontage:** In diesem Schritt werden die Elektrofahrradmotoren an einem manuellen Demontagearbeitsplatz in Komponenten oder Einzelteile zerlegt. Die Demontage erfolgt möglichst zerstörungsfrei, um die Wiederverwendbarkeit der Komponenten sicherzustellen. Dazu wurden im Vorfeld Untersuchungen hinsichtlich der Demontagefähigkeit von Elektrofahrradmotoren unterschiedlicher Hersteller durchgeführt [24].
- **Reinigung:** Die Komponenten werden von Verschmutzungen wie Rost, Fett oder Lackresten befreit. Dazu ist das RemanLab mit einer manuellen Hochdruckreinigungskabine zur Entfernung grober Verschmutzung und einer automatischen Teilereinigungsanlage ausgestattet. Zusätzlich wird eine Sandstrahlkabine eingesetzt, um zum Beispiel Lack am Gehäuse zu entfernen.
- **Prüfung und Sortierung:** Die gereinigten Komponenten werden auf ihre Wiederverwendbarkeit geprüft und in drei Kategorien eingeteilt: direkt wiederverwendbar, wiederverwendbar nach Aufarbeitung und nicht wiederverwendbar. Im Prozessablauf aussortierte Komponenten werden dem Recycling zugeführt. Daher müssen einige Neuteile oder Ersatzteile für die Remontage beschafft und parallel gelagert werden.
- **Aufarbeitung und/oder Ersatz durch Neuteile:** Verschleißteile von geringem Wert wie Schrauben oder Dichtungen werden in der Regel ohne weitere Prüfung durch Neuteile ersetzt. Außerdem werden auch die Lager der Elektrofahrradmotoren ohne weitere Prüfung ersetzt. Eine besondere Herausforderung stellt die Variantenvielfalt der verbauten Zahnräder dar, die sich aus unterschiedlichen Abmessungen und Geometrien ergeben. Da es nicht immer möglich ist, diese Zahnräder zu beschaffen, etwa weil Hersteller nicht mehr auf dem Markt aktiv sind oder diese Komponenten nicht zum Verkauf anbieten, wird die additive Fertigung zur Nachfertigung der Zahnräder eingesetzt. Die direkte Herstellung eines physischen

Bauteils aus einer 3D-CAD-Datei ermöglicht es, Komponenten bedarfsgerecht zu produzieren und die Daten anstelle von Ersatzteilen digital zu speichern [20]. Dementsprechend bietet sich die additive Fertigung vor allem bei geringen Stückzahlen und hoher Variantenvielfalt als Ergänzung zum konventionellen Remanufacturing an. In einem extern durchgeführten Prozessschritt werden zudem die Gehäuse der Elektrofahrradmotoren neu lackiert, wodurch diese nicht nur technisch, sondern auch optisch in einen neuwertigen Zustand versetzt werden.

- **Remontage:** Die aufgearbeiteten und neuen Komponenten werden zu einem funktionsfähigen Produkt zusammengefügt.
- **Endprüfung:** Die abschließende Endprüfung stellt als letzter Schritt der Prozesskette sicher, dass das Produkt die geforderten Spezifikationen erfüllt.

Sobald die aufgearbeiteten Produkte die Endprüfung bestehen, werden sie verpackt und für den Versand im nachgelagerten Prozess vorbereitet [6, 22]. Bild 3 zeigt das RemanLab und wie die einzelnen Prozessschritte sowie die zugehörige Infrastruktur implementiert wurde.

Das RemanLab vermittelt Einblicke in bestehende Herausforderungen des Remanufacturing. Außerdem bietet es die geeignete Infrastruktur, um weitere Anwendungsfälle zu untersuchen und die zugehörige Prozesskette zu entwickeln. Aktuell wird beispielsweise die technische Umsetzbarkeit des Remanufacturing von elektrischen Traktionsmotoren im Forschungsprojekt „Reassert“ und von Rasenmäh- und Staubsaugrobotern im Forschungsprojekt „Desire4Electronics“ untersucht.

Neben neuen Anwendungsfällen werden geeignete Digitalisierungs- und Automatisierungsansätze entlang der Prozesskette zur Steigerung der Effizienz im Remanufacturing erforscht. Darauf wird im Folgenden näher eingegangen.

2.3 Digitale Technologien im RemanLab

In der industriellen Praxis ist Remanufacturing durch manuelle, kostenintensive und meist schwer automatisierbare Prozesse geprägt. Digitale Technologien stellen einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Effizienz, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit des Remanufacturing zu steigern [25, 26]. Das RemanLab bietet

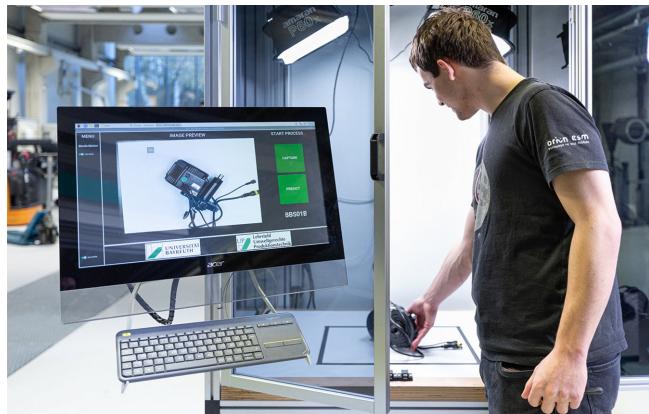


Bild 4. Demonstrator zur KI-gestützten Variantenklassifikation im Reman-Lab. Foto: Fraunhofer IPA

eine praxisorientierte Plattform, um das Potenzial digitaler Technologien im Remanufacturing zu erforschen und an realen Anwendungsfällen anzuwenden. Im Folgenden werden ausgewählte digitale Technologien vorgestellt, die entlang der Prozesskette des Remanufacturing erfolgreich im RemanLab implementiert und erprobt wurden.

Im RemanLab wird die Eingangsprüfung der Elektrofahrradmotoren durch den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) unterstützt, die eine automatisierte Klassifizierung der Produktvarianten erlaubt. Neuronale Netze, die auf visuellen Bildern verschiedener Varianten von Elektrofahrradmotoren trainiert wurden, werden zur automatischen Unterscheidung der Motoren verwendet. Dieser automatisierte Prozess reduziert die Prüfzeit und minimiert die Fehleranfälligkeit, insbesondere bei Varianten, die mit bloßem Auge schwer zu differenzieren sind.

Im Rahmen eines Deep-Learning-Ansatzes wurde dazu ein Bilddatensatz von 1200 Bildern pro Produktvariante verwendet, für eine präzise Klassifizierung von vier Motorvarianten. Der entwickelte Ansatz erreicht unter Laborbedingungen eine Genauigkeit von 98 %, was die Effizienz der Eingangsprüfung erheblich steigert. **Bild 4** zeigt den Demonstrator zur Klassifizierung der Motorvariante im RemanLab.

Ein weiterer Schritt in der Weiterentwicklung dieser KI-gestützten Systeme ist die Integration generativer KI zur Erstellung zusätzlicher, synthetischer Trainingsdaten. Im Projekt „Versatile-KI“ wird aktuell daran geforscht, auf Basis von 3D-Scans und generativer KI synthetische Bilder zu generieren, die typischen Verschleiß- und Abnutzungerscheinungen entsprechen. Diese künstlich erzeugten Bilddaten dienen als Trainingsgrundlage für neuronale Netze und ermöglichen es, das KI-Modell mit geringem Aufwand zu trainieren, während eine Vielzahl möglicher Produktzustände berücksichtigt wird. Die Nutzung solcher generativer Modelle wird auch im RemanLab angestrebt, um neben der Variantenklassifikation auch die Eignung der Gebrauchtteile für ein Remanufacturing visuell prüfen zu können.

In der industriellen Praxis ist die Demontage im Remanufacturing durch einen geringen Automatisierungsgrad, kleine Losgrößen und eine hohe Variantenvielfalt gekennzeichnet. Da sich die Demontagereihenfolge je nach Produktvariante ändern kann, ist neben dem erforderlichen Werkzeug auch die Bereitstellung der nötigen Informationen vor allem für unerfahrene Mitarbeitende erforderlich. Derzeit wird das Personal in der Praxis meist durch statische Anleitungen und Beschreibungen unterstützt, die oft



Bild 5. Demontage mit Augmented-Reality-Unterstützung. Foto: Fraunhofer IPA

mehrdeutig sind und so zu Fehlern führen können. Im RemanLab ist der Demontagearbeitsplatz daher neben digitalen Anleitungen mit einer Augmented-Reality-Brille ausgestattet, die den Mitarbeitenden anhand visueller Anweisungen systematisch durch den Demontageprozess führt. **Bild 5** zeigt die Nutzung der Augmented-Reality-Brille im Demontageprozess eines Elektrofahrradmotors. Dies verbessert die Standardisierung der Prozesse, reduziert Fehler und verkürzt Schulungszeiten, da missverständliche, statische Anleitungen vermieden werden.

Im RemanLab werden KI-basierte visuelle Systeme ebenfalls im Prozessschritt Prüfung und Sortierung eingesetzt, um die Effizienz und Genauigkeit zu verbessern. Ein Beispiel für die Anwendung dieser Technologie ist die Entwicklung eines KI-Modells zur Erkennung defekter Pins in elektrischen Steckverbindern im Projekt „Desire4Electronics“. In diesem Forschungsprojekt liegt der Fokus auf der Erkennung defekter Steckverbinder am Beispiel von Staubsaugrobotern. Dabei kommen verschiedene Versionen des YOLO-Objekterkennungsmodells zum Einsatz, die auf einem Datensatz aus realen und synthetischen Bildern trainiert wurden. Das Modell erzielt aktuell eine Erkennungsgenauigkeit von 98 %, was die Effektivität der automatisierten Prüfung im Vergleich zur manuellen Inspektion erheblich steigert. **Bild 6** zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Klassifikation eines elektrischen Steckverbinder mit sechs Pins, von denen drei beschädigt sind.

Zukünftig soll das System um weitere Defekte ergänzt werden und eine Integration in eine robotergestützte Demontagestation erfolgen, um den Prozessschritt der Demontage zu automatisieren. [27]

Im RemanLab wird das ebenso am Fraunhofer IPA entwickelte Lean Data Acquisition (LeanDA) Prozessoptimierungsset als Demonstrator in der Remontage eingesetzt [28]. Dieses modulare Sensorsystem kombiniert drahtlose Sensorpakete mit KI-basierten Algorithmen zur Prozesserkennung, um wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Tätigkeiten präzise zu analysieren. Die Sensoren können flexibel an Werkzeugen wie einem Akkuschrauber, an Werkstücken oder an Werkstückträgern befestigt werden und erfassen etwa Daten zu Bewegung, Orientierung und Position. **Bild 7** zeigt ein Werkzeug mit angebrachtem Sensorpaket bei der Remontage des Elektrofahrradmotors.

Während der Remontage werden die gesammelten Daten drahtlos an ein Edge Device übertragen, das die Informationen in Echtzeit auswertet. So wird beispielsweise erkannt, wann und wie lange ein Werkzeug genutzt oder wie effizient ein Prozessschritt

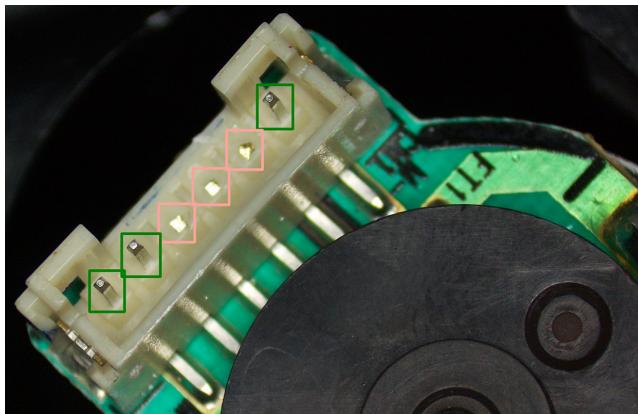


Bild 6. Ergebnis der Klassifikation eines elektrischen Steckverbinder mit Hervorhebung defekter (rot) und nicht defekter (grün) Pins.
Foto: Fraunhofer IPA



Bild 7. Remontage des Elektrofahrradmotors. Foto: Fraunhofer IPA

durchgeführt wurde. Die Analyse liefert Kennzahlen (KPIs) und identifiziert Optimierungspotenziale, wodurch Verschwendungen gezielt aufgedeckt werden kann. LeanDA ermöglicht es somit, Prozesse datenbasiert zu bewerten und weiterzuentwickeln, ohne dass bestehende IT-Infrastrukturen angepasst werden müssen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Remanufacturing ist ein essenzieller Werterhaltungsprozess in der Kreislaufwirtschaft, welcher darauf abzielt, einen vollständig neuen Produktlebenszyklus zu ermöglichen und den Ressourceneinsatz nachhaltig zu reduzieren. Remanufacturing hat gegenüber anderen Werterhaltungsprozessen wie Recycling oder Reparatur deutliche ökologische und ökonomische Vorteile, ist jedoch auch mit spezifischen Herausforderungen wie unsicheren Rücklaufmengen und einer hohen Variantenvielfalt verbunden.

Um diesen Herausforderungen mit technologischen Ansätzen zu begegnen, wurde das RemanLab als innovative Lernfabrik für Remanufacturing entwickelt. Es bietet eine praxisorientierte Plattform zur Vermittlung von Wissen, zur Erprobung digitaler Technologien und zur Bewertung der Eignung von Produkten für ein Remanufacturing. In einer realitätsnahen Produktionsumgebung werden sowohl die Komplexität als auch die besonderen Anforderungen des Remanufacturing entlang der gesamten Prozesskette sichtbar gemacht. Dabei dienen Elektrofahrradmotoren als exemplarischer Anwendungsfall, da sie Einblicke in sämtliche Prozessschritte des Remanufacturing ermöglichen und gleichzeitig die Komplexität realer Anwendungen widerspiegeln.

Die bisherigen Schulungen im RemanLab zeigen, dass der integrative Ansatz, reale Produktionsumgebungen mit theoretischem Wissen zu kombinieren, die Motivation und den Lernerfolg der Teilnehmenden signifikant steigert. In Zukunft sollen Weiterbildungen verstärkt auf die sich verändernden Kompetenzanforderungen eingehen, besonders im Hinblick auf den Einsatz datengetriebener Technologien und die Anpassung an eine zunehmend digitalisierte Arbeitswelt. Damit leistet das RemanLab nicht nur einen Beitrag zur Forschung, sondern bildet auch Fachkräfte für die Transformation zur Kreislaufwirtschaft aus.

Das RemanLab wird stetig weiterentwickelt, um zusätzliche Anwendungsfälle und Technologien zu integrieren. Aktuelle Erkenntnisse aus Forschungsprojekten, wie der automatisierten Demontage von Elektrokleingeräten, fließen in die Gestaltung der

Lernfabrik ein. Im Mittelpunkt stehen dabei die Erforschung und Erprobung innovativer Technologien wie Digitalisierung, Automatisierung und Methoden der Industrie 4.0. Besonders der Einsatz von Simulationsmodellen und Künstlicher Intelligenz eröffnet vielfältige Möglichkeiten, beispielsweise um Prozessketten in Echtzeit zu analysieren und zu optimieren. Geplante Änderungen können zunächst digital getestet werden, wodurch das Risiko von Fehlentscheidungen reduziert und die Effizienz gesteigert wird.

Durch die enge Verzahnung mit der universitären Lehre und praxisorientierten Schulungsangeboten wird das RemanLab zu einem zentralen Baustein für die Förderung der Kreislaufwirtschaft. Die kontinuierliche Weiterentwicklung eröffnet neue Perspektiven für Forschung, Lehre und industrielle Praxis und leistet einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Transformation der Wirtschaft.

L iteratur

- [1] Ellen MacArthur Foundation: Towards the Circular Economy Volume 1. Economic and business rationale for an accelerated transition. Stand: 2013. Internet: emf.thirdlight.com/file/24/xTyQj3oxiYNMO1xTFs9xT5LF3C/Towards%20the%20circular%20economy%20Vol%201%3A%20an%20economic%20and%20business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf. Zugriff am 28.03.2025
- [2] European Commission: Commission Staff Working Document – Impact Assessment. Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC. Stand: 2022. Internet: https://environment.ec.europa.eu/system/files/2022-03/SWD_2022_82_1_EN_impact_assessment_part3_v2.pdf. Zugriff am 28.03.2025
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung: DIN SPEC 91472:2023-06 Remanufacturing (Reman) – Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse. Berlin: Beuth Verlag 2023
- [4] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2010
- [5] VDI Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2243:2002-07: Recyclingorientierte Produktentwicklung. Berlin: Beuth Verlag 2002
- [6] Lange, U.: Ressourceneffizienz durch Remanufacturing – Industrielle Aufarbeitung von Altteilen. Berlin: VDI ZRE Kurzanalyse 2017
- [7] Köhler, D. C. F.: Regenerative Supply Chains. Regenerative Wertschöpfungsketten. Aachen: Shaker Verlag 2011
- [8] Koop, C.; Grosse Erdmann, J.; Koller, J. et al.: Circular Business Models for Remanufacturing in the Electric Bicycle Industry. Frontiers in Sustainability 2021, doi.org/10.3389/fsus.2021.785036
- [9] Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S. et al.: Remanufacturing Market Study. Stand: 2015. Internet: www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/remanufacturing-market-study.pdf. Zugriff am 28.03.2025
- [10] Roland Berger; CLEPA European Association of Automotive Suppliers: The Electrification of Light Vehicles. Boon or bane for the European

aftermarket? Stand: 2022. Internet: [https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/22_2088_COP_Automotive_Aftermarket_CLEPA_online_DS_\(2\).pdf](https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/22_2088_COP_Automotive_Aftermarket_CLEPA_online_DS_(2).pdf). Zugriff am 28.03.2025

[11] Guide, V. R.: Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of Operations Management* 18 (2000) 4, pp. 467–483

[12] Kurilova-Palisaitiene, J.; Sundin, E.; Poksinska, B.: Remanufacturing challenges and possible lean improvements. *Journal of Cleaner Production* 172 (2018), pp. 3225–3236

[13] Miehe, R.; Gross, E.; Ackermann, T. et al.: Learning factories for biointelligent production – design aspects and required competencies. *SSRN Electronic Journal* (2023). Proceedings of the 13th Conference on Learning Factories (CLF 2023), dx.doi.org/10.2139/ssrn.4458036

[14] Ackermann, T.; Miehe, R.; Reimann, P. et al.: A cross-disciplinary training concept for future technologists in the dawn of biointelligent production systems. *SSRN Electronic Journal* (2023). Proceedings of the 13th Conference on Learning Factories (CLF 2023), dx.doi.org/10.2139/ssrn.4458051

[15] Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M. et al.: Learning Factories. Featuring New Concepts, Guidelines, Worldwide Best-Practice Examples. Cham: Springer International Publishing 2024

[16] Tisch, M.; Ranz, F.; Abele, E. et al.: Learning Factory Morphology – Study Of Form And Structure Of An Innovative Learning Approach In The Manufacturing Domain. *Turkish Online Journal of Educational Technology Special Issue* (2015), pp. 356–363

[17] Koller, J.; Grosse Erdmann, J.; Herold, M. et al.: RemanLab – Conceptualization and Realization of a Learning Factory for Remanufacturing. Proceedings of the 13th Conference on Learning Factories (CLF 2023), dx.doi.org/10.2139/ssrn.4469183

[18] ZIV – Die Fahrradindustrie (Hrsg.): Marktdaten Fahrräder und E-Bikes für 2023. In Kooperation mit dem VSF – Verbund Service und Fahrrad. Stand: 2024. Internet: www.mtb-news.de/news/wp-content/uploads/2024/03/0fc98eaa8cc63ccf908048a4d57a8ccb3773020.pdf. Zugriff am 28.03.2025

[19] Schlesinger, L.; Koller, J.; Oechsle, O. et al.: Remanufacturing of E-mobility Components – Five-Step Implementation Strategy to increase Sustainability within Circular Economy. 2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Erlangen, Germany, 2021, pp. 1–8

[20] Koller, J.: E-Bike Remanufacturing: potential & technical feasibility. In: Weiland, F. (Hrsg.): Remanufacturing Components of Electric Vehicles. Selbstverlag: Köln 2022, pp. 69–88, Internet: www.fjwconsulting.com/. Zugriff am 28.03.2025

[21] Brose Antriebstechnik GmbH & Co. KG: Remanufacturing-Antriebe von Brose jetzt bei RA-CO erhältlich. Stand: 2024. Internet: www.brose-ebike.com/de-de/presse/reman-ra-co/. Zugriff am 28.03.2025

[22] Steinhilper, R.: Produktrecycling. Vielfachnutzen durch Mehrfachnutzung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 1999

[23] Errington, M.; Childe, S. J.: A business process model of inspection in remanufacturing. *Journal of Remanufacturing* 3 (2013) 7, doi.org/10.1186/2210-4690-3-7

[24] Erdmann, J. G.; Koller, J.; Brimaire, J. et al.: Assessment of the Disassemblability of Electric Bicycle Motors for Remanufacturing. *Journal of Remanufacturing* 13 (2023) 2, pp. 137–159

[25] Sprenger, K.; Klein, J.-F.; Wurster, M. et al.: Industrie 4.0 im Remanufacturing. *Industrie 4.0 Management* 2021 (2021) 4, pp. 37–40

[26] Yang, S.; M. R., A. R.; Kaminski, J. et al.: Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing. *Applied Sciences* 8 (2018) 7, #1177

[27] Ahmeti, E.; Erdmann, J. G.; Herold, M. et al.: Demontage, Automation und KI: Das Remanufacturing von Elektrokleingeräten. *atp magazin* (2024) 8, pp. 20–23

[28] Kärcher, S.; Grabi, F.; Maier, J. et al.: Automatisierte Montageanalyse und -ablaufplanung. *wt Werkstattstechnik online* 110 (2020) 10, S. 722–727. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien



Dr.-Ing. Jan Koller 
 jan.koller@ipa.fraunhofer.de
 Tel. +49 921 / 78516-434
 Foto: Fraunhofer IPA

Julian Große Erdmann, M.Sc. 

Engjëll Ahmeti, M.Sc. 

Raphael Wolf, M.Sc. 

PD Dr.-Ing. Robert Miehe 

Prof. Dr.-Ing. Frank Döpper 

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer 

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)