Bild: © Sutthiphong – stock.adobe.com

DiCES:

Kreislaufwirtschaft umsetzen: DiCES als Leuchtturm

Ermittlung der Herausforderungen von produzierenden Unternehmen bei der Umsetzung von ReX-Strategien

Die Kreislaufwirtschaft bietet erhebliche Potenziale im Kampf gegen den Klimawandel und Ressourcenknappheit, stellt jedoch auch produzierende Unternehmen vor bedeutende Herausforderungen. Die Neugestaltung der Produktionsprozesse revolutioniert den Produktlebenszyklus und verringert den Ressourcenverbrauch in der Produktion. Dennoch sehen sich produzierende Unternehmen bei der Umsetzung dieser Maßnahmen mit zusätzlichen Herausforderungen konfrontiert. Dazu zählen etwa die sinkende Zahlungsbereitschaft der Kund*innen für nachhaltige Produkte, eine geringere Wettbewerbsfähigkeit aufgrund fehlender langfristiger Profitabilität sowie ein erhöhter Produktionsaufwand. Bekannte Herausforderungen in Bezug auf den Produktionsaufwand sind unter anderem die Entwicklung effizienter Produktionsprozesse für Remanufacturing und Refurbishment (auch ReX-Prozesse genannt), einschließlich eines optimierten Demontageprozesses und einer funktionierenden rückwärtsgerichtete Logistik (engl. *Reverse Logistics*). Trotzdem sind noch nicht alle Herausforderungen bekannt, da viele erst während der Implementierung des ReX-Prozesses erkannt werden können. Daher wurden im Austausch mit verschiedenen Industriepartnern aus dem produzierenden Gewerbe die Herausforderungen bei der Implementierung von ReX-Prozessen identifiziert und kategorisiert. Dies unterstützt eine effiziente Einführung von ReX-Prozessen in einem produzierenden Unternehmen. >

DiCES:

Implementing the Circular Economy: DiCES as a Flagship Initiative

Identifying Challenges for Manufacturers Implementing ReX Strategies

The circular economy holds significant promise in addressing climate change and resource scarcity, but also presents significant challenges for manufacturing companies. Redesigning production processes can revolutionize product lifecycle and reduce resource consumption in production. However, manufacturing companies implementing these measures face numerous obstacles, including declining customer decreasing willingness to pay for sustainable products, reduced competitiveness due to limited long-term profitability, and increased production costs. Known cost-related challenges include developing efficient processes for remanufacturing and refurbishment – also known as ReX processes – which require optimized disassembly procedures and effective reverse logistics systems. Importantly, not all challenges are apparent upfront; many only become apparent during the actual implementation of ReX processes. To address this, challenges related to ReX implementation were identified and categorized in collaboration with various industry partners from the manufacturing sector. These insights support the efficient introduction of ReX processes in manufacturing companies. >

Die Die aktuelle lineare industrielle Wertschöpfung endet bei den Kunen und koppelt das wirtschaftliche Wachstum mit dem Ressourcenverbrauch. Im Projekt DiCES, unter der Leitung des *FIR e. V. an der RWTH Aachen* und in Zusammenarbeit mit Unternehmen und Instituten aus der Industrie, darunter *Miele & Cie. KG, Klima. Metrix GmbH*, *Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen, IconPro GmbH*, *All-for-One Group SE* sowie *Forcam Enisco GmbH*, wird ein datenbasiertes, integriertes Wertschöpfungssystem für die multidimensionale Kreislaufwirtschaft entwickelt. Im Artikel „DiCES: Kreislaufwirtschaft realisieren" wurde ein Einblick in die Anforderungsanalyse für die Umsetzung einer multidimensionalen Kreislaufwirtschaft gegeben. Dabei wurde verdeutlicht, dass die Gestaltung eines datenbasierten Wertschöpfungssystems für die multidimensionale Kreislaufwirtschaft flexibel, modular und agil erfolgen sollte.[1] Neben der Anforderung eines datenbasierten Wertschöpfungssystems müssen auch diverse Anforderungen durch das Produktionssystem erfüllt werden, um sicherzustellen, dass sowohl die ökonomischen als auch die ökologischen Potenziale berücksichtigt werden. Da die praktische Umsetzung der Transformation bestehender Produktionssysteme hin zu einer multizirkulären Kreislaufwirtschaft noch nicht ausreichend entwickelt sind, bleiben die damit verbundenen Herausforderungen weitgehend unberücksichtigt.[2]

Im Rahmen des DiCES-Projekts entwickeln und realisieren die Projektpartner einen Demonstrator, der ein funktionsfähiges hybrides ReX-Produktionsstationskonzept präsentiert, das sowohl Remanufacturing als auch Refurbishment umfasst. Dabei agiert DiCES als Vorreiter für die Umsetzung einer multidimensionalen Kreislaufwirtschaft: Das Projektteam identifiziert zahlreiche Herausforderungen, die während der Implementierung eines hybriden ReX-Produktionsstationskonzepts auftreten können. Der DiCES-Demonstrator wird in der *Demofabrik Aachen (DFA)* aufgebaut, wo Besucher*innen die Gelegenheit haben werden, eine funktionierende Kreislaufwirtschaft in der Produktion hautnah zu erleben. Der Demonstrator soll zeigen, dass Kreislaufwirtschaft in produzierenden Unternehmen erfolgreich umgesetzt werden kann. Dazu soll die Integration dezentraler OEMs und Kundenhaushalte innerhalb des DiCES-Wertschöpfungssystems veranschaulicht und die multizirkuläre Auftragsabwicklung dargestellt werden.[3] Ein weiterer Fokus wird auf der Integration der Kundenperspektive im Gesamtprozess liegen – „vom Kunden zurück zum Kunden". Das Konzept umfasst vier Hauptbereiche, die eine interaktive Kreislaufwirtschaft ermöglichen: den Kundenbereich, den Entscheidungsbereich, das ReX-Cockpit und die ReX-Produktion.

[1] s. Gaillard et al. 2024, S. 12
[2] s. Riesener et al. 2024, S. 137
[3] s. Perau et al. 2023, S. 10 – 11

The current linear industrial value chain ends with the customer and links economic growth to resource consumption. The DiCES project, led by FIR e. V. at RWTH Aachen University in collaboration with industrial companies and research institutes – including *Miele & Cie. KG, Klima.Metrix GmbH, Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen, IconPro GmbH, All-for-One Group SE*, and *Forcam Enisco GmbH* – aims to develop a data-driven, integrated value creation system tailored to a multidimensional circular economy. Our earlier article, "DiCES: Realizing the Circular Economy," explored the requirements for implementing such a system and highlighted the need for a flexible, modular, and agile approach. In addition to establishing a data-based value creation system, the production system itself must also meet several criteria to balance both economic and ecological potential. As the practical implementation of the transforming existing production systems towards a multi-loop circular economy remains underdeveloped, many associated implementation challenges have yet to be fully addressed.

As part of the DiCES project, the project partners are developing and implementing a demonstrator that showcases a functional hybrid ReX production station concept, combining both remanufacturing and refurbishment processes. DiCES serves as a pioneer in advancing the multidimensional circular economy by identifying numerous challenges that can emerge during the implementation of a hybrid ReX production station concept. The DiCES demonstrator will be installed at the *Demofabrik Aachen (DFA)*, where visitors can experience a functioning circular economy in production firsthand. The demonstrator aims to show that circular economy concepts can be successfully implemented in manufacturing companies. To this end, it will illustrate the integration of decentralized OEMs and customer households within the DiCES value creation system and present multi-circular order processing. Another focus will be on integrating the customer perspective throughout the entire process "from the customer back to the customer". The concept comprises four main areas that enable an interactive circular economy: the customer area, the decision-making area, the ReX cockpit, and ReX production.

During the visit to the demonstrator, which remains in the design phase, core challenges facing manufacturing companies in ReX processes from various industrial sectors were analyzed and identified in collaboration with leading industrial partners. These challenges were mapped to the individual sub-processes of

[1] see Gaillard et al. 2024, p. 12
[2] see Riesener et al. 2024, p. 137
[3] see Perau et al. 2023, p. 10 – 11

Während des Besuchs des Demonstrators, der sich noch in der Konzeptionsphase befindet, wurden gemeinsam mit renommierten Unternehmen die Kernherausforderungen von produzierenden Unternehmen im ReX-Prozess aus verschiedenen Industriebereichen analysiert und identifiziert. Diese Herausforderungen wurden in die einzelnen Teilprozesse des Remanufacturing-Prozesses unterteilt. Das ReX-Produktionskonzept sollte die sieben generischen Schritte eines Remanufacturing-Prozesses gemäß DIN SPEC 91472 umfassen (s. Figure 1): Demontage & Dokumentation, Identifizierung von Komponenten, Reinigung, Inspektion & Bewertung, Aufarbeitung, Re-Assembly und End-of-Line-Prüfung.[4] Zudem wurden die Herausforderungen in jedem Schritt des Remanufacturing-Prozesses anhand von vier verschiedenen Kriterien kategorisiert: Verfügbarkeit von Informationen, IT-Systeme, Mitarbeitendenqualifikation und Produktionsplanung und -steuerung. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden vorgestellt.

1. Demontage & Dokumentation

Im ersten Schritt des Remanufacturing-Prozesses werden die gebrauchten Komponenten erfasst, um ihre Produktidentität zu bestimmen. Anschließend erfolgt die Zerlegung

[4] s. DIN SPEC 91472, S. 7

the remanufacturing workflow. The ReX production concept should incorporate the seven generic steps of a remanufacturing process as defined in DIN SPEC 91472 (see Figure 1): Disassembly & Documentation, Component Identification, Cleaning, Inspection & Evaluation, Refurbishment, Reassembly, and End-of-Line Testing. In addition, the challenges associated with each step of the remanufacturing process were categorized according to four key dimensions: Availability of information, IT systems, employee qualification, and production planning and control. Each step is detailed in the following sections.

1. Disassembly & Documentation

The first step of the remanufacturing process involves recording the used components to determine their product identity. The parts are then disassembled into their individual components, either completely or to the extent necessary for remanufacturing. Initial challenges arise at this stage, both during the product's entry into the remanufacturing process and throughout disassembly. The challenges that arise can be categorized into the four dimensions described above:

[4] see DIN SPEC 91472, p. 7

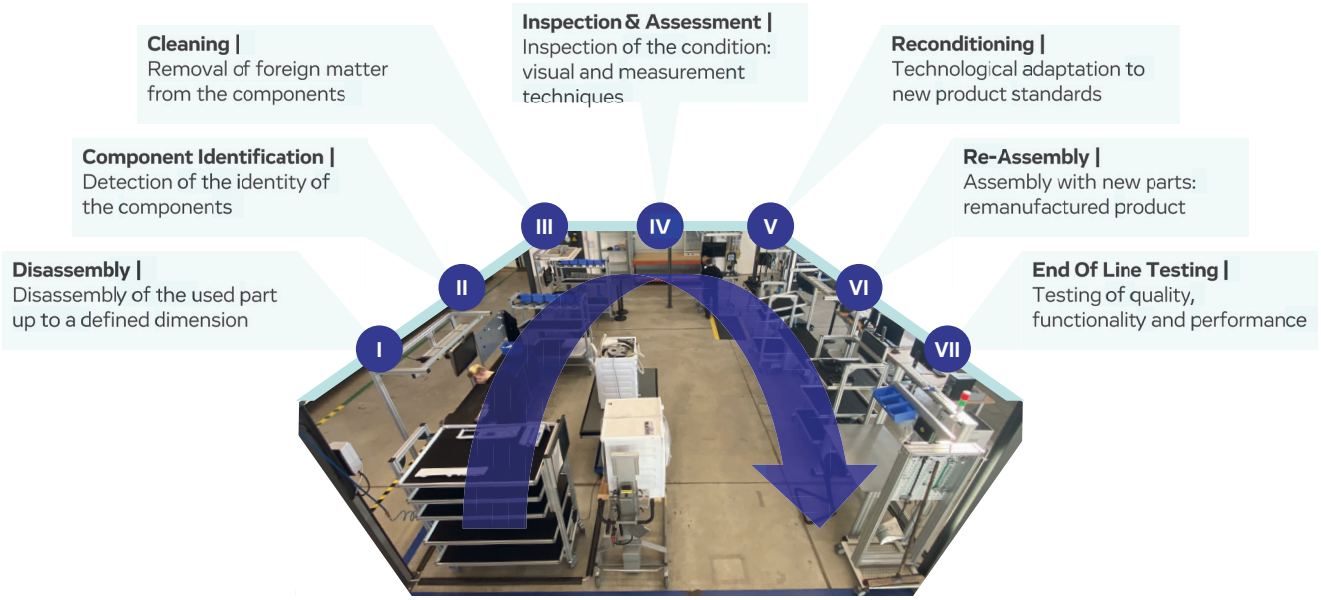


Figure 1: Structure of the ReX-Assessment-Line

der Teile in ihre Einzelkomponenten, entweder vollständig oder bis zu einem für das Remanufacturing ausreichenden Maß. Während dieser Schritte treten die ersten Herausforderungen beim Eintritt des Produkts in den Remanufacturing-Prozess sowie während des Demontageprozesses auf. Die entstehenden Herausforderungen lassen sich hier, wie oben beschrieben, in vier Kategorien unterteilen:

Verfügbarkeit von Informationen: Die Vollständigkeit der Stückliste des Produkts sowie die Eingangsprüfung, die alle relevanten Informationen aus dem Nutzungszyklus des Produkts umfasst, stellen hier die erste Herausforderung dar.

IT-Systeme: Identifikation der eingegangenen Produkte in MES und/oder ERP.

Mitarbeitendenqualifikation:
Umfasst die Sicherstellung eines reibungslosen Rücknahmeprozesses sowie die Überprüfung des Produktdesigns im Hinblick auf Wiederverwendbarkeit (ReX-Strategien).

Produktionsplanung und -steuerung: Die erste Herausforderung dieser Kategorie besteht in der präzisen Definition der Demontagetiefe und der Erstellung von Demontagearbeitsplänen. Dabei müssen unvorhersehbare Demontagezeiten einkalkuliert und Flexibilität in den Arbeitsplänen eingeplant werden, während sicherheitsrelevante Schritte stets berücksichtigt werden müssen. Zudem ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Demontagetiefe erforderlich, um zu entscheiden, bis zu welchem Punkt eine Demontage sinnvoll ist.

Die oben beschriebenen Herausforderungen können die Planung, Produktivität und Qualität der Arbeit erheblich beeinflussen. Als Lösungsansatz für die Herausforderungen bei der Eingangsprüfung wurde ein KI-gestütztes Entscheidungstool vorgeschlagen, das die Wiederverwendbarkeit des Produkts bewertet. Für die Herausforderungen in der Produktionsplanung und Mitarbeitendenqualifikation konzentrieren sich Lösungsansätze auf: Mitarbeitendenschulungen zur Qualitätssteigerung, Arbeitspläne für verschiedene Demontagestufen, eine dynamische Betrachtung der Arbeitspläne sowie der Pflege der Planzeiten.

2. Identifizierung von Komponenten

Nach der Demontage werden die Teile identifiziert und anhand ihrer Produktidentität, Recyclingfähigkeit sowie des erforderlichen Aufwands für die Wiederaufarbeitung bewertet und sortiert. Für diesen Schritt wurden zwei Hauptkategorien von Herausforderungen identifiziert:

Availability of information: The first challenge here is the completeness of the product's parts list and the incoming inspection, which must include all relevant information from the product's usage cycle.

IT systems: Identifying incoming products in MES and/or ERP systems.

Employee qualification: Ensuring a smooth take-back process and assessing the product design for reusability (ReX strategies) are essential tasks.

Production planning and control: The primary challenge is determining the appropriate disassembly depth and the creation of disassembly work plans. Unpredictable disassembly times must be accounted for and flexibility must be planned into the work schedules, while safety-relevant steps must be considered at all times. In addition, a profitability analysis of the dismantling depth is necessary to evaluate the economic feasibility of further disassembly steps.

These challenges can significantly affect planning reliability, productivity, and quality of work. An AI-supported decision tool has been proposed to assist in the incoming inspection by evaluating product reusability. To address challenges relating to production planning and employee qualification, solution approaches include employee training to improve work quality, work plans for different disassembly stages, dynamic work planning approaches, and the consistent maintenance of planned times.

2. Component Identification

Following disassembly, the individual parts are identified, evaluated and sorted based on product identity, reusabilty, and the effort required for remanufacturing. Two main categories of challenges were identified for this step:

Availability of information: Item number identification is often incorrect or entirely missing, making traceability difficult and hindering accurate product identification. This applies in particular to the associated bill of materials (BOM).

Production planning and control: The interaction between quality inspection and identification presents a challenge, as the residual value and reusability of the part must be determined and aligned.

To address these challenges, several solution approaches were proposed. These include intelligent hardware for

Verfügbarkeit von Informationen: Die Artikelnummer-Identifikation ist oft fehlerhaft oder fehlt ganz, was die Nachverfolgbarkeit erschwert und die genaue Identifikation der Produkte beeinträchtigt. Dies betrifft insbesondere die zugehörige Stückliste (BOM).

Produktionsplanung und -steuerung: Das Zusammenspiel von Qualitätsprüfung und Identifikation stellt eine Herausforderung dar, da der Restwert und die Wiederverwendbarkeit des Teils ermittelt und miteinander abgestimmt werden müssen.

Hierfür wurden Intelligente Hardwarelösungen zur Teilerkennung, wie beispielsweise Kameras und QR-Codes, als mögliche Maßnahmen vorgeschlagen. Zusätzlich wurde die Verwendung einer Stückliste mit verschiedenen Abstufungen der Bauteilstadien – 'as returned', 'as built' und 'as maintained' – empfohlen. Zudem wurden eine Bewertung des notwendigen Aufwands im Verhältnis zum verbleibenden Nutzen sowie eine eindeutige Zuordnung von Teilen anhand der Seriennummer als Maßnahmen empfohlen. Zur Sicherstellung der Speicherung der Produktdaten wurde auch ein digitaler Produktpass vorgeschlagen.

3. Reinigung

In diesem Schritt werden die demontierten Komponenten von Fremdstoffen, die bei einem Neuteil nicht vorhanden sind, befreit. Dabei sind die zu entfernenden Stoffklassen und die Vollständigkeit des Prozessergebnisses branchen- und produktspezifisch festzulegen. Die folgenden Kategorien von Herausforderungen wurden hier identifiziert:

Mitarbeitendenqualifikation: Die allgemeine Qualifikation der Mitarbeitenden stellt in diesem Schritt eine Herausforderung dar, um sicherzustellen, dass keine zusätzlichen Probleme in Bezug auf die Arbeitssicherheit auftreten und der Prozess sowohl reibungslos abläuft als auch erfolgreich abgeschlossen wird.

Produktionsplanung und -steuerung: Dynamische Arbeitspläne und Prüfverfahren können eine Herausforderung darstellen, insbesondere wenn die Mitarbeitenden nicht ausreichend über die Prozessdurchführung informiert sind.

Ähnlich wie bei der Demontage liegt der Fokus der Lösungsansätze hier auf Schulungen und Zertifizierungen der Mitarbeitenden. Darüber hinaus sollten die Art der Reinigung und die erforderlichen Ressourcen in dynamischen Arbeitsplänen berücksichtigt werden. Es ist außerdem ratsam, während und nach der Reinigung Qualitätsmerkmale sowie, falls vorhanden, Schadensklassen eindeutig zu definieren.

part recognition, such as cameras and QR codes, as well as the use of a BOM with different component stages - 'as returned', 'as built', and 'as maintained'. Additional measures include assessing the necessary effort in relation to the remaining value and clearly assigning parts based on serial numbers. A digital product passport was also recommended to ensure the storage of product data.

3. Cleaning

In this step, the disassembled components are cleaned of foreign substances that would not be present in a new part. The classes of materials to be removed and the required completeness of the process result must be defined specifically for each industry and product. The following categories of challenges were identified:

Employee qualification: Ensuring that employees are critical in this step, both to maintain occupational safety and to ensure that the process both runs smoothly and is completed successfully.

Production planning and control: Dynamic work plans and test procedures can pose challenges, especially when employees are not sufficiently informed about process requirements.

As with disassembly, the focus of proposed solutions is on training and certification of employees. In addition, the cleaning methods and resources required should be specified in dynamic work plans. It is also advisable to clearly define quality criteria during and after cleaning and, where available, damage classifications.

4. Inspection & Evaluation

Following cleaning, the disassembled components are inspected and evaluated for their reprocessability. Depending on product requirements, this inspection may be visual and/or using measuring methods. The aim is to capture the actual condition values of the components. To identify deviations, target data and reference values of the components must be available. The participants have identified the following challenges:

Availability of information: A lack of product history or data, which provides an overview of the materials used and information on product's life cycle, can present a challenge when essential information is missing. In

4. Inspektion & Bewertung

Nach der Reinigung erfolgen die Inspektion und Bewertung, wobei die demontierten Komponenten inspiziert und auf ihre Recyclingfähigkeit geprüft werden. Die Untersuchung erfolgt je nach Produktanforderung visuell und/oder mittels Messverfahren. Das Ziel besteht darin, die Ist-Werte der Komponenten zu erfassen. Dafür müssen die Soll-Daten und -Werte der Komponenten bereitgestellt werden, um Abweichungen erkennen zu können. Dazu wurden verschiedene Herausforderungen für diesen Schritt identifiziert:

Verfügbarkeit von Informationen: Die Produkthistorie/-daten, die einen Überblick über die verwendeten Materialien und Informationen zum Lebenszyklus des Produkts bieten sollten, kann/können eine Herausforderung darstellen, wenn nicht alle notwendigen Informationen zur Verfügung stehen. Zudem kann ohne eine Übersicht über die Originalartikel eine Risikoabschätzung für die Wiederverwendung sowie die Datensammlung für zukünftige Analysen erschwert sein.

IT-Systeme: Integration der erforderlichen Systeme und die Digitalisierung der Station, um die Ergebnisse der Inspektion und Bewertung zu speichern.

Mitarbeitendenqualifikation: Die allgemeine Qualifikation der Mitarbeitenden stellt in diesem Schritt wieder eine Herausforderung dar, um die Inspektion und Bewertung der Komponenten durchzuführen.

Produktionsplanung und -steuerung: Während der Inspektion steht die Planbarkeit des Arbeitsschritts im Vordergrund, um Herausforderungen effektiv zu meistern. Besonders herausfordernd sind hierbei der Grad der Inspektion sowie die festzulegenden Kriterien für Visuelle- und Messverfahren. Weitere Herausforderungen umfassen die Lagerung von Gebrauchtteilen sowie die präzise Funktionsbeschreibung der Teile.

Einige Lösungsansätze für die Verfügbarkeit von Informationen und IT-Systeme beinhalten die technische Dokumentation mittels eines digitalen Zwillings, eine Risikobewertung für die Wiederverwendung sowie die Fähigkeit, Daten aus verschiedenen Systemen zu kombinieren.

5. Aufarbeitung

Im Prozessschritt Aufarbeitung werden die Komponenten und gegebenenfalls deren Software durch geeignete Prozesstechnologien auf die gleiche Funktionalität und Leistungsfähigkeit wie das ursprüngliche Neuprodukt gebracht. Wenn möglich, soll hierbei der zum Zeitpunkt des Inverkehrbringens des Remanufacturing-Produkts geltende technische

addition, without an overview of the original articles, risk assessment for reuse and data collection for future analysis can be difficult.

IT systems: Integrating the required systems and digitalizing the station to store inspection and evaluation results presents a challenge.

Employee qualification: As in earlier steps, ensuring employees have the skills needed to carry out inspections accurately is essential.

Production planning and control: During the inspection, the focus is on planning the work step in order to master challenges effectively. Defining the scope of inspection and the criteria to for visual and measurement-based evaluation is particularly challenging. Other issues include storage of used parts and their precise functional description.

Proposed solutions for challenges in information availability and IT systems include technical documentation via digital twins, risk assessment for reuse, and the ability to integrate data from different systems.

5. Refurbishment

In the remanufacturing process step, components – and, if applicable, their software – are restored using appropriate process technologies to achieve the same level of functionality and performance as the original new product. If possible, the technical standard at the time the refurbished product is placed back on the market should even be further developed. The following challenges were identified during this step:

Availability of information: Challenges arise from earlier steps, such as regarding traceability of product history and component evaluation.

IT systems: A key challenge here is the provision of data for reverse logistics.

Production planning and control: Adjusting the work plan based on prior evaluations and calculating profitability are both demanding. Variability in incoming parts also presents a key challenge.

To ensure smooth refurbishment, the target condition must be clearly defined, and the final condition of each part should be documented in the system to ensure comparability of refurbished units. Furthermore, seamless data availability is essential, which requires integration of

Standard sogar weiterentwickelt werden. Bei der Aufarbeitung der Komponenten wurden die folgenden Herausforderungen identifiziert:

Verfügbarkeit von Informationen: Für diesen Schritt ergeben sich einige Herausforderungen aus bereits abgeschlossenen Prozessen, wie beispielsweise die Nachvollziehbarkeit der Produkthistorie und die Bewertung der Komponenten.

IT-Systeme: Eine Herausforderung in diesem Zusammenhang ist die Datenbereitstellung für die rückwärtsgerichtete Logistik.

Produktionsplanung und -steuerung: Die Anpassung des Arbeitsplans auf Grundlage des Assessments sowie die Wirtschaftlichkeitsberechnung sind hier auch eine Herausforderung. Zudem stellen Schwankungen bei den eingehenden Teilen eine zentrale Herausforderung dar.

Für eine reibungslose Aufarbeitung muss der Zielzustand definiert werden, zudem sollte der Endzustand des Artikels im System erfasst werden, um eine Vergleichbarkeit der aufbereiteten Geräte zu gewährleisten. Des Weiteren ist eine nahtlose Datenbereitstellung essenziell, die durch die Integration von ERP-, ME- und/oder PLM-Systemen sowie einem digitalen Produktpass sichergestellt werden muss. Dies ermöglicht eine lückenlose Rückverfolgbarkeit, verbessert die Prozesssteuerung und stellt sicher, dass alle relevanten Informationen für eine effiziente Aufbereitung verfügbar sind.

6. Re-Assembly

Im Re-Assembly werden die aufgearbeiteten, gereinigten sowie direkt wiederverwendbaren Komponenten zusammen mit gegebenenfalls notwendigen Neuteilen zu einem Remanufacturing-Produkt zusammengesetzt. Durch den Einsatz anderer Neuteile als in klassischen Gebrauchtmaschinen verwendet, kann ebenfalls ein Upgrade auf einen über den beim Inverkehrbringen des Remanufacturing-Produkts geltenden technischen Standard hinaus erreicht werden. Allerdings müssen hierfür die folgenden Herausforderungen berücksichtigt werden:

Verfügbarkeit von Informationen: Eine zentrale Herausforderung besteht in der sicheren und effizienten Bereitstellung relevanter Daten, einschließlich Montageanleitungen, um eine reibungslose und fehlerfreie Prozessdurchführung zu unterstützen.

Mitarbeitendenqualifikation: Die flexible Einsatzfähigkeit der Mitarbeitenden, um unterschiedliche Aufgaben effizient bewältigen zu können, stellt hier wieder eine Herausforderung dar.

ERP, ME and/or PLM systems, as well as the use of a digital product passport. This enables seamless traceability, improves process control, and ensures that all necessary information is available for efficient refurbishment.

6. Reassembly

During reassembly, refurbished, cleaned and directly reusable components are combined with any necessary new parts to produce a remanufactured product. By integrating new parts – beyond those used in conventional used machinery, it becomes possible to upgrade the remanufactured product to a technical standard that may even exceed the standard in place at the time it is placed back on the market. However, the following challenges must be addressed:

Availability of information: A key challenge is ensuring the secure and efficient provision of relevant data, including assembly instructions, to support smooth and error-free process execution.

Employee qualifications: Flexible deployment of employees across different tasks is critical and presents another challenge here.

Production planning and control: A major challenge in the reassembly process lies in managing tolerance of the ReX components.

As in previous process steps, employee training and qualification are a central to addressing these challenges. Targeted capacity planning is equally important to ensure efficient production. Digital worker guidance, providing precise instructions and support, can minimize errors and increase efficiency. Technology planning and dynamic work schedules also play a crucial role in selecting optimal production technologies and ensuring precise process control.

7. End-of-Line Testing

In the final step of the process, end-of-line (EoL) testing, the quality, functionality, and performance of the remanufactured products are verified. This is done either through testing and inspection procedures or by reviewing all process parameters, so that standard market warranties can be issued as with new products. In this step, process planning is a central challenge:

Employee qualification: Employees must be able to verify the defined quality characteristics and decide whether the product meets the defined standards.

Produktionsplanung und -steuerung: Eine der größten Herausforderungen im Re-Assembly-Prozess liegt in der Toleranz der ReX-Bauteile.

Wie bereits in anderen Schritten identifiziert, bilden auch hier die Schulung und Qualifikation der Mitarbeitenden einen entscheidenden Stellhebel und Lösungsansatz. Ebenso wichtig ist es, die Auslastung gezielt zu steuern, um eine effiziente Produktion zu gewährleisten. Ein weiterer Lösungsansatz liegt in der digitalen Werkerführung, die den Mitarbeitenden präzise Anleitungen und Unterstützung bietet, um Fehler zu minimieren und die Effizienz zu steigern. Zudem spielen die Technologieplanung und dynamische Arbeitspläne eine entscheidende Rolle, um die optimalen Fertigungstechnologien auszuwählen und eine präzise Prozesssteuerung sicherzustellen

7. End-of-Line-Prüfung

Im letzten Prozessschritt, der End-of-Line-Prüfung werden die Qualität sowie die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Remanufacturing-Produkte sichergestellt. Dies erfolgt entweder durch Test- und Prüfverfahren oder durch die Kontrolle aller Prozessparameter, sodass anschließend marktübliche Gewährleistungen für Neuprodukte vergeben werden können. In diesem Schritt steht die Prozessplanung als zentrale Herausforderung im Fokus:

Mitarbeitendenqualifikation: Der*Die Mitarbeitende muss in der Lage sein, die Qualitätsmerkmale sicherzustellen und zu entscheiden, ob das Produkt den definierten Standards entspricht.

Prozessplanung/-durchführung: Die erste Herausforderung in diesem Schritt besteht darin, die zuvor definierten Qualitätsmerkmale sicherzustellen. Eine andere zentrale Herausforderung in diesem Schritt ist die Klärung der Vorgehensweise, wenn das *Remanufactured Produkt* nicht funktioniert.

In diesem Zusammenhang ist die Sicherstellung der Qualitätsmerkmale in der EoL-Prüfung von entscheidender Bedeutung. Als Lösungsansatz spielt die Softwarelösung „Computer-aided Quality Assurance“ eine zentrale Rolle, um die Einhaltung der Qualitätsstandards zu gewährleisten. Sollte die Funktionalität des Geräts am Ende nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen oder eine Überprüfung der regulatorischen Mindestanforderungen verspätet erfolgen, werden die gewonnenen Erkenntnisse als „Lessons learned“ dokumentiert, um künftige Fehler zu vermeiden.

Zusammenfassung

Obwohl die Herausforderungen an jeder Station des ReX-Prozesses spezifisch identifiziert wurden, zeigt sich, dass einige

Process planning and implementation: A key challenge in this step is ensuring that the defined quality characteristics are met. Another important issue is establishing a clear procedure for handling cases where the remanufactured product fails to function as expected.

Ensuring compliance with quality requirements during EoL testing is of crucial importance. Computer-aided quality assurance software plays a key role in maintaining these quality standards. If the product ultimately fails to meet the quality requirements or if the review of minimum regulatory requirements is delayed, the findings are documented as "lessons learned" in order to prevent future issues.

Conclusion

Although the challenges were specifically identified at each stage of the ReX process, it is evident that some of them recur across multiple steps. Key cross-cutting issues include employee qualification, the ability to plan the work steps and adapt the work plan to specific products or components. Equally important are the traceability of product history and the digitalization of process steps, which are essential to ensure that all relevant product information is available and can be transferred reliably. In addition, profitability analysis plays a critical role in assessing the long-term benefits of remanufacturing and in making informed decisions about the appropriate depth of disassembly and the potential for reuse of products or components. With all major challenges now identified, the next step is to develop suitable solutions to successfully complete the DiCES demonstrator.

Antoine Gaillard · Leticia Vicentim Perasolo · Martin Perau · Florian Schuldt

von ihnen an mehreren Stationen erneut auftreten. Im Fokus stehen die Qualifikation der Mitarbeitenden, die Planbarkeit der Arbeitsschritte sowie die Anpassung des Arbeitsplans an die spezifischen Produkte oder Bauteile. Darüber hinaus sind die Nachvollziehbarkeit der Produkthistorie und die Digitalisierung der Arbeitsschritte von zentraler Bedeutung, um sicherzustellen, dass alle relevanten Informationen zum Produkt vollständig bekannt sind und effektiv weitergegeben werden können. Zudem stellt die Wirtschaftlichkeitsberechnung eine zentrale Herausforderung dar, um den langfristigen Nutzen des Remanufacturing-Prozesses zu bewerten und fundierte Entscheidungen hinsichtlich der Demontagetiefe sowie der Wiederverwendbarkeit von Produkten oder Bauteilen zu treffen. Nachdem alle Herausforderungen identifiziert wurden, liegt der Fokus nun darauf, geeignete Lösungsansätze zu entwickeln, um den DiCES-Demonstrator effektiv und erfolgreich fertigzustellen.

Antoine Gaillard · Leticia Vicentim Perasolo · Martin Perau · Florian Schuldt

Literatur:

DIN SPEC 91472:2023-06: Remanufacturing (Reman) - Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse. DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, Juni 2023.

Gaillard, A.; Perau, M.; Özkan, C.: DiCES: Kreislaufwirtschaft realisieren. DiCES: Realising the Circular Economy. In: UdZ – The Data-driven Enterprise 4 (2024) 2, S. 46-52. DOI: 10.60571/3473.

Perau, M.; Gaillard, A.; Spindler, D.; Schuldt, F.; Özkan, C.; Schröer, T.; Boos, W.: Value Systems for the Parallel Implementation of Value-Retention Circular Strategies in the White Goods Industry. In: [Proceedings] Navigating Unpredictability: Collaborative Networks in Non-linear Worlds. PRO-VE 2024. IFIP Advances in Information and Communication Technology; Bd. 727. Hrsg.: L. M. Camarinha-Matos; A. Ortiz; X. Boucher; A. M. Barthe-Delanoë. Springer, Cham [u. a.] 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-71743-7_23.

Riesener, M.; Schukat, E.; Schäfer, N.; Obladen, A.; Göppert, A.; Kaven, L.; Gaillard, A.; Perau, M.: Die kreislauffähige Produktion. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 119 (2024) 3, S. 136–140.

DiCES

How can you and your company get actively involved?

By participating in our workshops and engaging in cross-industry dialogue, you will have the opportunity to experience solutions and challenges related to implementing the circular economy firsthand. This will better prepare you to anticipate and proactively avoid future challenges. The discussions also contribute to the further development of the DiCES project and support the development of the demonstrator, all while minimizing unforeseen obstacles.

If you are interested in the latest solutions and challenges in implementing the circular economy and would like to stay connected with DiCES experts and other leading companies, we invite you to join our regular workshops. By participating, you will not only experience the circular economy in practice, but also have the chance to share your industry-specific expertise and benefit from the insights of other participating companies.

Please contact Antoine Gaillard.

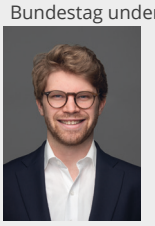
Project Title: DiCES – Digital Transformation of Circular Economy for Industrial Sustainability

Funding/Promoters: Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWK); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)

Funding no.: 01MN23022A Duration: 01.06.2023 – 30.05.2026

Website: dices.fir.de

Funded by the Federal Ministry of Economics and Climate Protection (BMWK) based on a resolution of the German Bundestag under the funding number 01MN23022A.



Antoine Gaillard M.Eng.
Project Manager
Research Unit Production Management
FIR e. V. an der RWTH Aachen
Phone: +49 177 5790040
Email: Antoine.Gaillard@fir.rwth-aachen.de

Federal Ministry for Economic Affairs and Energy

DLR Projektträger

Open Access: Dieser Artikel wird unter der Creative-Commons-Lizenz „Share Alike 4.0 International – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International" (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht.