

Vorgehen zur Analyse der Upgrade-Circular-Economy-Fähigkeit von Produkten, Prozessen und Planung

Re-X-Assessment

G. Schuh, S. Schmitz, A. Hermann, T. Hommen, F. Wintzer

ZUSAMMENFASSUNG Produzierende Unternehmen stehen vor wachsenden Herausforderungen. Die Upgrade Circular Economy, insbesondere Re-Assembly, bietet großes Potenzial zur Kosten- und Emissionsreduktion. Dieser Beitrag stellt das Re-X-Assessment zur Bewertung der Upgrade-Circular-Economy-Fähigkeit vor, indem Produkte, Prozesse und Planung analysiert werden. Ein zentraler Bestandteil des Vorgehens sind Demontageworkshops, für die in der DFA Demonstrationsfabrik Aachen eine geeignete Infrastruktur geschaffen wurde.

STICHWÖRTER

Nachhaltigkeit, Strategie, Produktionsmanagement

Re-X-Assessment: Procedure for analyzing the upgrade circular economy capability of products, processes and planning

ABSTRACT Manufacturing companies are facing growing challenges. The Upgrade Circular Economy, in particular re-assembly, offers great potential for reducing costs and emissions. This article presents Re-X assessment as an approach to evaluate the upgrade circular economy capability by analyzing products, processes and planning. Disassembly workshops, for which a suitable infrastructure has been created at the DFA Demonstration Factory Aachen, are a central component of the procedure.

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen stehen vor großen Herausforderungen wie Ressourcenknappheit, strengen Regulierungen und steigendem Umweltbewusstsein der Konsumenten. Diese Entwicklungen erfordern, dass Unternehmen ihre wirtschaftlichen Aktivitäten nicht nur ökonomisch, sondern auch ökologisch ausrichten. Traditionelle lineare Wirtschaftsmodelle, die dem „Take-Make-Waste“-Prinzip folgen, erweisen sich zunehmend als nicht zukunftsfähig [1]. In diesem Kontext gewinnt die Kreislaufwirtschaft an Bedeutung. Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung zu entkoppeln. Ein zentraler Ansatz ist die Minimierung des Ressourcenverbrauchs und die Schließung von Materialkreisläufen [2].

In der Kreislaufwirtschaft werden R-Strategien wie das Reduzieren (Reduce), Wiederverwenden (Reuse), Recycling, Reparieren (Repair) und Remanufacturing genutzt, um dies zu erreichen [4]. Besonders vielversprechend für produzierende Unternehmen ist die Upgrade Circular Economy, welche eine Wertsteigerung der Produkte vorsieht. Beim Re-Assembly werden Produkte durch die Nutzung der demontierten, rückgewonnenen Komponenten industriell wieder montiert. Dies ermöglicht die Herstellung neuer oder verbesserter Produkte in einem geschlossenen Kreislauf [5]. Laut dem Verband Deutscher Ingenieure (VDI) können durch Re-Assembly die CO₂-Emissionen um bis zu 90 % und der Energieverbrauch um etwa 56 % gesenkt werden [6]. Darüber hinaus führt der geringere Material- und Energieeinsatz zu bis zu dreifach höheren Gewinnmargen [7]. Diese Zahlen verdeutlichen, dass ReAssembly sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Perspektive erstrebenswert ist.

Trotz dieser Vorteile wird die Upgrade Circular Economy und Re-Assembly von Unternehmen bisher nur zögerlich umgesetzt,

da viele Produkte und Prozesse nicht auf Demontage und Wiederaufwertung ausgelegt sind. Unternehmen haben häufig Schwierigkeiten, notwendige Anpassungsbedarfe und aus Re-Assembly resultierende Potenziale abzuschätzen, was die Implementierung erschwert [8]. Es braucht daher geeignete Methoden, um das Upgrade-Circular-Economy-Potenzial gezielt und unternehmensspezifisch zu analysieren und umzusetzen. Dieser Beitrag befasst sich mit der Identifikation des Upgrade-Circular-Economy-Potenzials produzierender Unternehmen und stellt ein Vorgehen vor, mit dem Unternehmen dieses Potenzial bewerten können. In Abschnitt 2 werden die maßgeblichen Handlungsfelder für die erfolgreiche Implementierung von Re-Assembly aufgezeigt, worauf folgend in Abschnitt 3 ein Vorgehen zur Analyse und Ableitung konkreter Handlungsmaßnahmen vorgestellt wird. In Abschnitt 4 wird das Konzept des Demontageworkshops und die Umsetzung von diesem in der Demonstrationsfabrik Aachen vorgestellt. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse zusammen und zeigt zukünftige Anwendungsfelder und aktuelle Forschungsthemen auf.

2 Herausforderungen bei der Einführung von Re-Assembly

Die Einführung des Re-Assembly-Ansatzes stellt linear produzierende Unternehmen vor eine Vielzahl von Herausforderungen. Nicht nur neue oder angepasste Prozesse in der Produktion müssen implementiert werden, wie beispielsweise das Demontieren und Wiederaufwerten von Komponenten, sondern bereits im Vorfeld sollten Anforderungen an die Produktgestaltung, insbesondere im Hinblick auf die Demontierbarkeit und Wiederaufwertbarkeit, berücksichtigt werden [9]. Abhängig von der individuellen Ausgangssituation eines Unternehmens ergeben sich dabei unter-

schiedliche Anpassungsbedarfe [10]. Der Grad, in dem die bestehende Produkt- und Produktionskonfiguration für die Umsetzung von Re-Assembly geeignet ist, wird als Re-Assembly-Potenzial bezeichnet. Ein hohes Potenzial erleichtert die Einführung, während ein geringes Potenzial gezielte Maßnahmen erfordert, um Defizite zu beheben und die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Implementierung zu schaffen.

Die Bewertung des Re-Assembly-Potenzials stützt sich auf drei zentrale Handlungsfelder: Produkt, Prozess und Planung. Diese Handlungsfelder bilden den Rahmen für die Identifikation von Anpassungsbedarfen und die Anpassung der Unternehmensstruktur an die Anforderungen von ReAssembly.

2.1 Produkt

Die Produktgestaltung ist der erste große Herausforderungskomplex für die Umsetzung von ReAssembly. Hier spielen verschiedene Aspekte eine Rolle, welche die Eignung von Produkten für diesen Ansatz beeinflussen. Zunächst sind die Materialzusammensetzung und das Alterungsverhalten wesentliche Faktoren [11]. Materialien, die für die lineare Bereitstellung geeignet sind, wie sie aktuell in vielen Unternehmen verwendet werden, sind oft schwer trennbar oder recycelbar [12]. Dies erschwert ihre Wiederverwertbarkeit und stellt eine große Herausforderung im Re-Assembly dar. Es ist daher wichtig, zu prüfen, ob Materialien auch für mehrfache Nutzungsphasen ausgelegt sind [11].

Ein weiterer Aspekt ist die Demontierbarkeit von Komponenten und deren Wiederverwendbarkeit [13]. Die Produktgestaltung richtet sich oft ausschließlich nach Kundenanforderungen und den Zielsetzungen der Serienproduktion, was dazu führen kann, dass eine zerstörungsfreie Demontage nicht möglich ist [14]. Dies schränkt die Wiederverwendung von Bauteilen erheblich ein. Eine der größten Herausforderungen in diesem Bereich besteht darin, die Demontierbarkeit der Produkte mit anderen Anforderungen, wie Kosteneffizienz und Langlebigkeit, in Einklang zu bringen [15].

Zudem entstehen Herausforderungen aus der qualitativen Bewertung genutzter Produkte. In stark regulierten Märkten müssen Re-Assembly-Produkte die gleichen Anforderungen erfüllen wie Neuprodukte, was durch die heterogene Qualität der zurückgeführten Komponenten erschwert wird. Dies betrifft insbesondere die Einhaltung von Zertifizierungsanforderungen, die bei einer rein linearen Produktion mit neuen Materialien einfacher zu erfüllen sind [16].

2.2 Prozess

Neben den Produktanforderungen bringt der Re-Assembly-Ansatz erhebliche Herausforderungen für den gesamten Produktionsprozess mit sich [17]. Für Unternehmen, die traditionell nach einem linearen Modell arbeiten, bedeutet die gezielte Rückgewinnung von Produkten eine völlig neue Aufgabe [18]. Es muss eine umfassende Reverse-Logistik, die alle Beteiligten am Produkt einschließt, etabliert werden, um gebrauchte Produkte systematisch zurückzuführen. Diese Rückführungsprozesse müssen so gestaltet sein, dass eine planbare und sachgerechte Rückgabe der Produkte sichergestellt wird [19]. Dies erfordert häufig den Aufbau neuer Strukturen wie Rücknahmezentren, Zwischenlager und speziali-

sierten Transportwege [20] sowie Prozesse zur Verfolgung der Produkte während der Nutzungsphase.

Darüber hinaus erfordert der Re-Assembly-Ansatz eine Anpassung bestehender Produktionsprozesse. Neue Abläufe wie Demontage- und Reinigungsprozesse müssen integriert werden, um die wiedergewonnenen Komponenten für die Wiederverwendung vorzubereiten [13]. Gleichzeitig müssen auch Prozesse in der Beschaffung und im Bestandmanagement angepasst werden, da neue Komponenten und Rohmaterialien integriert mit den wiederverwendbaren Anteilen aus zurückgeführten Produkten betrachtet werden müssen. [21]. Andere Prozesse, wie etwa die Wareneingangskontrolle, müssen ebenfalls angepasst werden, um die zurückgeführten Produkte auf ihre Eignung für die Wiederaufwertung zu prüfen und entsprechend zu sortieren [22].

Bei der Anpassung der existierenden und der Implementierung der erforderlichen neuen Prozesse ist eine sorgfältige Kosten-Nutzen-Analyse notwendig, um sicherzustellen, dass die neuen Abläufe die bestehenden Prozesse nicht überlasten. Zudem ist entscheidend, die erforderlichen Ressourcen und Kapazitäten wie z.B. Mitarbeiter, Zusatzmaterialien und Zeit frühzeitig zu identifizieren und zu berücksichtigen, um eine reibungslose Integration zu gewährleisten [23].

2.3 Planung

Das dritte zentrale Handlungsfeld, Planung, bezieht sich auf die Unsicherheiten in Bezug auf die Verfügbarkeit und Qualität der zurückgeführten Produkte hinsichtlich der Produktionsplanung und -steuerung [24]. In traditionellen, linearen Geschäftsmodellen endet der Einfluss des Herstellers auf das Produkt in der Regel, sobald es die Produktion verlässt. Mit Ausnahme weniger Fälle, wie etwa im After-Sales-Service, hat der Hersteller keine direkte Kontrolle mehr über den Zustand oder die Nutzung der Produkte während ihrer Lebensdauer [23]. Dies führt dazu, dass bei der Rückführung von Produkten erhebliche Unsicherheiten bestehen, da der Zustand der zurückgeführten Artikel stark variieren kann [25].

Diese Unsicherheiten wirken sich direkt auf die Produktionsplanung aus [26]. Die Menge an Rückläuferprodukten, die für den Re-Assembly-Prozess benötigt wird, kann stark schwanken. Gleichzeitig variiert die Belastung einzelner Prozessschritte je nach Zustand der zurückgeführten Produkte. Gut erhaltene Produkte erfordern weniger Aufwand bei der Wiederaufwertung, während stark abgenutzte Komponenten aufwendigere Verfahren wie Reinigung und Reparatur durchlaufen müssen [27].

Eine weitere Herausforderung ist, dass während der Nutzungsphase der Produkte nur wenige Zustandsinformationen gesammelt werden, was die Planbarkeit der zirkulären Produktion zusätzlich erschwert. Ohne präzise Informationen zur Nutzung ist es schwierig, die Verfügbarkeit und Qualität der zurückgeführten Produkte vorherzusagen [28]. Diese Informationslücken erschweren eine genaue Planung und machen es schwierig, die Produktionskapazitäten effektiv anzupassen [29].

Die erfolgreiche Einführung des Re-Assembly-Ansatzes erfordert eine umfassende Bewertung der Chancen und Risiken in den drei Handlungsfeldern Produkt, Prozess und Planung. Unternehmen müssen ihre aktuelle Ausgangslage genau analysieren, um die notwendigen Anpassungsmaßnahmen gezielt ergreifen zu können.

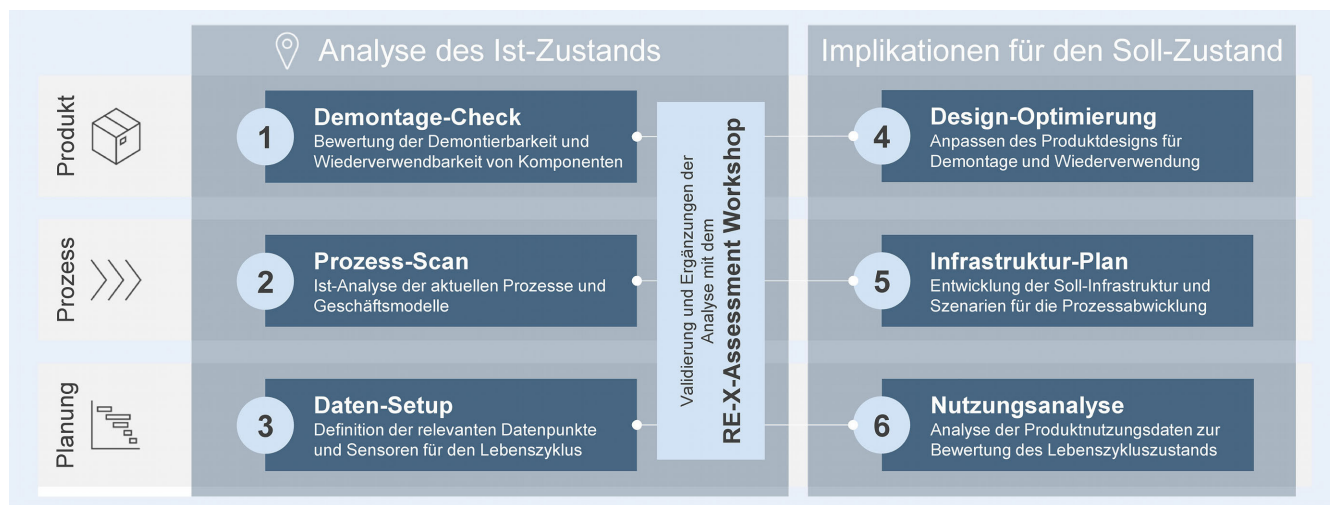


Bild 1. Vorgehen des Re-X-Assessments. Grafik: RWTH Aachen

3 Re-X-Assessment

Zur Bewertung der Herausforderungen in den Handlungsfeldern Produkt, Prozess und Planung im Hinblick auf das Re-Assembly-Potenzial produzierender Unternehmen hat das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen mit dem Re-X-Assessment ein Vorgehen entwickelt, welches eine initiale Bewertung der Eignung von Produkten und deren Produktion für Re-Assembly ermöglicht. Dieses Vorgehen bietet ein strukturiertes Framework zur Bewertung des ReAssembly-Potenzials und unterstützt dabei, Handlungsempfehlungen auszusprechen. Das Ziel des Re-X-Assessments besteht darin, Optimierungspotenziale in bestehenden Strukturen aufzudecken, Risiken und Herausforderungen bei der Implementierung von Re-Assembly frühzeitig aufzudecken und fundierte Entscheidungen für die Einführung von Re-Assembly zu treffen.

Das Re-X-Assessment gliedert sich in sechs Fokusbereiche, die in die Analyse des Ist-Zustandes und die auf dieser basierten Ableitung von Handlungsempfehlungen unterteilt sind. Dabei wird die Analyse des Ist-Zustandes maßgeblich durch das Konzept des Demontage-Workshops gestützt. In diesem wird systematisch die Re-Assembly-Eignung durch praktische Demontagen in einer geeigneten Produktionsumgebung untersucht. Die Durchführung des Demontage-Workshops ist detailliert in Abschnitt 4 beschrieben. Bild 1 zeigt eine Übersicht über die Fokusbereiche des Re-X-Assessments.

In Fokusbereich 1 wird die Demontierbarkeit existierender Produkte im Status Quo analysiert. Das Ergebnis dieses Demontage-Checks ist Transparenz über Herausforderungen für die Demontage existierender Produkte und eine Beurteilung über die allgemeine Wiederverwendbarkeit der Komponenten. Durch die Aufnahme der Demontageaufwände und Einschätzung der Potenziale für die Wiederverwendung kann die für das Produkt geeignete Demontagetiefe identifiziert werden. Der Demontage-Check liefert wichtige Einblicke in die technische Machbarkeit des Re-Assembly-Prozesses und bildet die Grundlage für die Optimierung des Produkts im späteren Verlauf. In Fokusbereich 2 erfolgt in einem Prozess-Screening eine Ist-Aufnahme der aktuellen etablierten Prozesse. Hierbei steht zunächst die etablierte lineare Auftragsabwicklung im Fokus. Darüber hinaus werden

insbesondere existierende Serviceprozesse und -strukturen untersucht, da diese Implikationen für die zu etablierenden Prozesse während der Nutzung, für die Rückführung zum Unternehmen sowie die Demontage besitzen. Des Weiteren sollte auch das etablierte Geschäftsmodell untersucht werden, da die Einführung von Re-Assembly von einem Wandel vom Buy-And-Own zum Produkt-Service-System profitiert und integriert betrachtet werden sollte. Ziel ist es, die bestehenden Geschäfts- und Produktionsprozesse auf ihre Eignung für eine zirkulär ausgerichtete Produktion zu überprüfen und Handlungsbedarfe zu identifizieren. Fokusbereich 3 widmet sich der Daten-Verfügbarkeit. Es wird eine Übersicht über die aktuell zur Verfügung stehenden Daten erstellt. Dies betrifft unter anderem die verfügbaren Daten in der Produktion sowie in der Nutzung. Die Informationen sind für die Planung und Steuerung im Re-Assembly von hervorgehobener Bedeutung, um mit der Unsicherheit von Zustand und Zeitpunkt der Rückläufer umgehen zu können. Daher wird die Verfügbarkeit von Daten ebenfalls in der Aufnahme des Re-Assembly-Potenzials berücksichtigt, um mögliche Handlungsbedarfe und Potenziale zu identifizieren. Bei der Durchführung der Analyse des Ist-Zustandes können bestehende Dokumente, beispielsweise Stücklisten oder Prozessbeschreibungen, analysiert und Interviews mit den Know-how-Trägern im Unternehmen durchgeführt werden. Als sinnvolles Kernelement, um systematisch und mit hohem Praxisbezug den Ist-Zustand zu erfassen, wurde ein Vorgehen für Demontageworkshops entwickelt, welches in Abschnitt 4 vorgestellt wird.

Aufbauend auf der Analyse des Ist-Zustandes werden in den Fokusbereichen 4 bis 6 Handlungsempfehlungen für die Dimensionen Produkt, Prozess und Planung abgeleitet. Im Fokusbereich 4 werden Anpassungen des Produktdesigns untersucht, um die Demontage und Wiederverwendbarkeit der Komponenten zu fördern. Durch die Analyse bestehender Designs und die Entwicklung von Leitlinien für ein „Design for Re-Assembly“ werden spezifische Kriterien formuliert, die die Modularität, Materialwahl und Verbindungsarten in den Vordergrund stellen. Ziel ist die systematische Integration unternehmens- und produktspezifischer zirkulärer Prinzipien in den Produktentwicklungsprozess. Im Fokusbereich 5 erfolgt die Entwicklung von Soll-Prozessen, die zirkuläre Prinzipien in der Produktion und Rückführung ope-

rationalisieren. Hierbei kann zunächst ein Fokus auf die Kernprozesse gelegt werden und eine moderate Granularität, beispielsweise auf Teilprozessebene, gewählt werden. Anforderungen an notwendige infrastrukturelle Voraussetzungen wie Rückführungslogistik und Zwischenlagerung werden identifiziert. Ergänzend werden Automatisierungspotenziale und wirtschaftliche Rahmenbedingungen analysiert, um ein praxistaugliches Prozessmodell zu entwickeln, das den Übergang zu zirkulären Geschäftsmodellen unterstützt. Fokusbereich 6 adressiert die Definition zusätzlicher Datenpunkte für eine digitale Produktakte, die eine datenbasierte Planung und Steuerung von Re-Assembly-Prozessen ermöglicht. Hierzu werden die Erkenntnisse aus Fokusbereich 5 berücksichtigt. Hierbei werden relevante Informationen zu Materialzusammensetzung, Nutzungshistorie und Wartung definiert sowie entsprechende Informationsflüsse modelliert. Ziel ist die Minimierung von Unsicherheiten bei der Rückführung und Wiederverwendung durch eine verbesserte Datenverfügbarkeit und Interoperabilität bestehender Systeme. Durch eine Gap-Analyse auf Basis der in Fokusbereich 3 identifizierten verfügbaren Daten wird der Handlungsbedarf aufgezeigt.

Das Resultat des Re-X-Assessments ist eine detaillierte Übersicht über das gegenwärtige Re-X-Potenzial eines Unternehmens und zeigt konkrete Handlungsbedarfe für die Einführung von ReAssembly auf. Durch die systematische Analyse in den Fokusbereichen werden sowohl technische als auch organisatorische Handlungsfelder identifiziert, die für die Implementierung zirkulärer Prinzipien entscheidend sind. Ein Schlüssel zur fundierten Analyse ist der Demontageworkshop, der praxisnah die Eignung von Produkten für die Demontage und Wiederverwendung untersucht. Die Erkenntnisse aus diesem Workshop bilden die Grundlage für die Analyse des Ist-Zustandes sowie den abgeleiteten Handlungsbedarfen in den Fokusbereichen 4 bis 6.

4 Demontageworkshop an der Re-X-Assessment-Line der Demonstrationsfabrik Aachen

Nachfolgend wird die Demonstrationsfabrik Aachen (DFA) und die dort aufgebaute Re-X-Line vorgestellt und im Anschluss das in Abschnitt 3 eingeführte Workshopkonzept beschrieben.

4.1 Re-X-Assessment-Line in der Demonstrationsfabrik Aachen

Die DFA bietet eine einzigartige Plattform, um Innovationen in Lean Production, Industrie 4.0 und Re-Assembly praxisnah zu gestalten und voranzutreiben. Als Teil des RWTH Aachen Campus arbeitet sie eng mit den anliegenden Clustern und Instituten wie dem WZL und dem FIR an der RWTH Aachen zusammen, um Forschung und industrielle Anwendungen zu verbinden. Ihr Service-Portfolio umfasst die drei Säulen Demonstrationsumgebung, Auftragsfertigung und Pilotierungspartnerschaften. In der Demonstrationsumgebung können reale Produktionsszenarien durch Schulungen, Seminare und Führungen erlebbar gemacht werden. Die Auftragsfertigung fokussiert auf Prototypen und Kleinserien in der Metallbearbeitung und gewährleistet einen hohen Praxisbezug der entwickelten Lösungen. Als Pilotierungspartner unterstützt die DFA Unternehmen bei der Umsetzung individueller Lösungen in einem realen Produktionsumfeld. Die moderne, 1600 m² große Produktionsumgebung wird kontinuier-

lich durch neue, praxisnahe Anwendungsfälle erweitert. Im Themenbereich Re-Assembly kann die DFA die aufgebaute Expertise in Montage und Digitalisierung nutzen, um Lösungen für die zirkuläre Produktion zu adoptieren und Unternehmen bei der Einführung von Re-Assembly zu unterstützen.

Die Re-X-Assessment-Line wurde als spezialisierte Umgebung zur systematischen Demontage und Bewertung von Rückläuferprodukten entwickelt. Hierfür wurden geeignete Stationen in einer U-Form aufgebaut, die auf die besonderen Anforderungen der Demontageprozesse ausgerichtet sind. Eine Übersicht der Stationen ist dem **Bild 2** zu entnehmen. Die Umgebung verfolgt einen Dual-Use-Ansatz: Zum einen dient sie als Rahmen für Demontageworkshops, in denen systematisch Informationen gesammelt werden, die Unternehmen bei der Entwicklung einer fundierten Re-Assembly-Strategie unterstützen – ein Schwerpunkt, der in diesem Abschnitt detailliert beschrieben wird. Zum anderen ermöglicht die Re-X-Assessment-Line Unternehmen, Re-Assembly-Prozesse in einer praxisnahen Umgebung zu pilotieren, bevor diese in die eigene Produktionslandschaft integriert werden.

Die Re-X-Assessment-Line umfasst sieben Stationen, die eine strukturierte Bewertung und Bearbeitung von Rückläuferprodukten ermöglichen. Am Arbeitsplatz Demontage werden Rückläuferprodukte bis auf ein vordefiniertes Stücklisten (BOM)-Level demontiert. Dazu steht neben einem ergonomischen Hubtisch mit Drehscheibe ein Arbeitstisch zur Demontage mit integrierter Werkerführung zur Verfügung. Der gesamte Bereich ist für die Dokumentation der Demontage mit Kameras ausgestattet, mit denen aus verschiedenen Winkeln Foto- und Videoaufnahmen angefertigt werden. Die Behälter, in welche die demontierten Komponenten platziert werden, sind mit Indoor-RTLS ausgestattet, welche eine lückenlose Nachverfolgbarkeit der demontierten Komponenten innerhalb der DFA ermöglichen. Am Arbeitsplatz Komponentenidentifikation erfolgt die Erfassung der Identität der Komponenten, auch hier steht ein Kamerasystem für eine Bilderfassung zur Verfügung. Nach der Identifikation der Komponente kann geprüft werden, ob der Bauteilrelease aktuell und die Wiederverwendung zulässig ist. Die Reinigungszelle dient der Befreiung der Komponenten von Fremdstoffen und bereitet sie auf die weiteren Schritte vor. Am Arbeitsplatz Inspektion & Bewertung werden die Komponenten visuell sowie durch Messverfahren geprüft. Komponenten, deren Zustand nicht beurteilbar ist, deren Materialqualität nicht ausreicht oder deren Aufbereitung als zu aufwendig bewertet wird, werden nicht aufbereitet oder wiederverwendet. Geeignete Komponenten durchlaufen die Aufarbeitung, bei der sie technologisch an Neuprodukt-Standards angepasst werden. In der Montage werden wiederverwendete, aufbereitete und neue Teile zu fertigen Produkten kombiniert. Die abschließende End-of-Line-Prüfung sichert die Qualität, Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Endprodukte. Durch den Aufbau der Re-X-Assessment-Line wird ein effizienter Durchlauf der Bauteile gewährleistet, da Bauteile, die nicht für eine Wiederverwendung oder Aufbereitung geeignet sind, so früh wie möglich im Prozess identifiziert und einer anderen Verwendung, zum Beispiel dem Recycling, zugeführt werden.

4.2 Workshopvorgehen

Im Folgenden wird das methodische Vorgehen zur Durchführung eines Demontage-Workshops in der Re-X-Assessment-Line

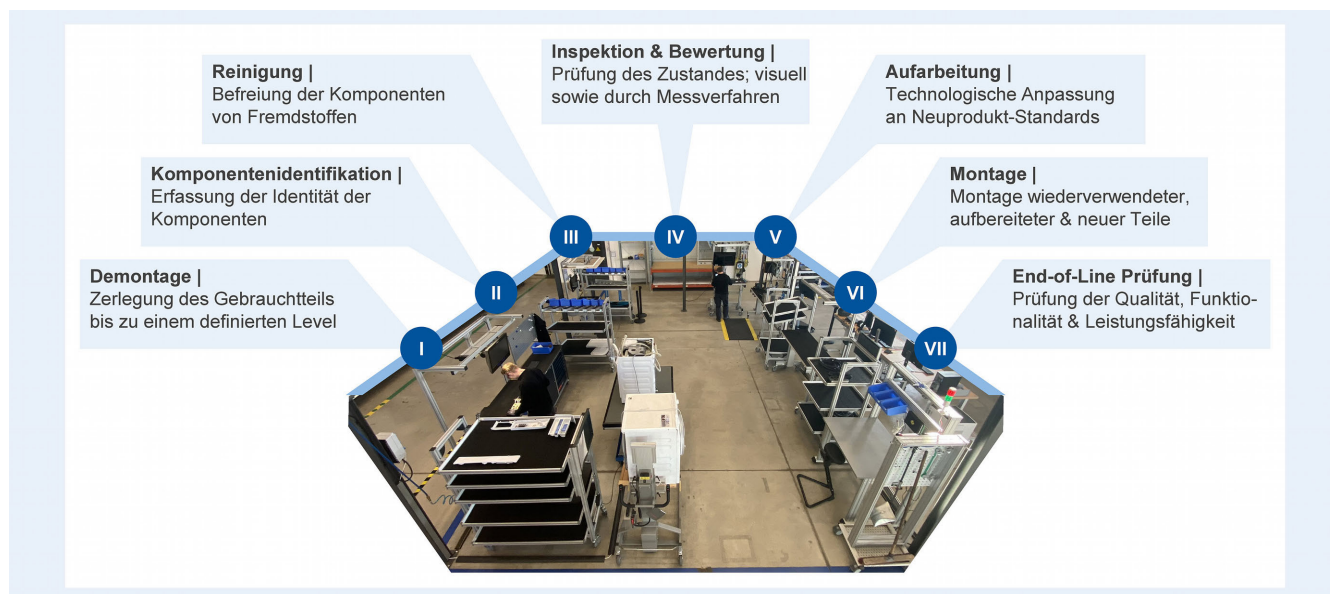


Bild 2. Aufbau Re-X-Assessment-Line in der DFA. Grafik: RWTH Aachen

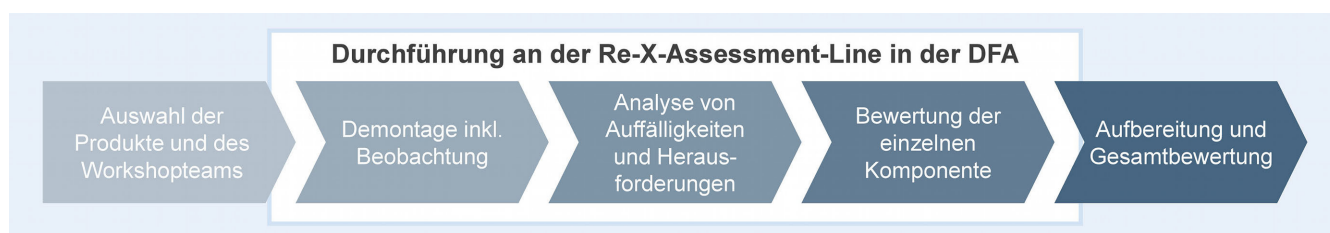


Bild 3. Vorgehen des Demontage-Workshops. Grafik: RWTH Aachen

beschrieben. Ziel des Workshops ist es, mit hohem Praxisbezug Informationen zur Analyse des Ist-Zustandes zu generieren (siehe Abschnitt 3). Demontage-Workshops können sowohl als Einstieg in die Thematik, um Herausforderungen und Potenziale im Kontext des ReAssembly zu identifizieren, als auch zur detaillierten Bewertung für die Umsetzung dienen. Eine Übersicht der Schritte ist in **Bild 3** dargestellt.

Auswahl der Produkte und des Workshopteams: Im Vorfeld des Workshops werden die zu analysierende Produkte ausgewählt. Eine Clusterbildung von Produktgruppen kann hierbei hilfreich sein, um repräsentative Produkte auszuwählen und allgemein anwendbare Erkenntnisse zu gewinnen. Ebenso bietet der Vergleich von aktuellen und älteren Produktgenerationen wertvolle Einblicke. Basierend auf Stücklisten (BOM) können Ziel-Demontagetiefen definiert werden, um beispielsweise Baugruppen ab einer bestimmten Hierarchieebene nicht weiter zu zerlegen. Die BOM dient zudem als Grundlage für die Workshop-Dokumentation und zur Identifikation möglicher benötigter Spezialwerkzeuge neben den in der DFA vorhandenen Werkzeugen. Für den Workshop wird ein interdisziplinäres Team zusammengestellt, das Mitarbeitende aus verschiedenen Unternehmensbereichen wie Produktion, Service, Produktentwicklung, Vertrieb sowie unterschiedlichen Hierarchieebenen umfasst. Die Einbindung von Mitarbeitenden unterschiedlicher Teams fördert den Austausch von Wissen und Perspektiven, wodurch ein besonderer Mehrwert erzielt wird.

Demontage inkl. Beobachtung: Im Workshop werden die festgelegten Produkte unter Berücksichtigung der zuvor definierten

Demontagetiefen demontiert. Die Demontage kann von Unternehmensmitarbeitenden oder TechnikerInnen der DFA durchgeführt werden. Wiederholte Untersuchungen eines Produkts können durch unterschiedliche Mitarbeitende durchgeführt werden und ermöglichen die Analyse von Schwankungen in Zeitaufwänden sowie den Vergleich unterschiedlicher Demontagevorgehensweisen. Die Demontierenden haben die freie Wahl der Werkzeuge, während die Beobachtenden Auffälligkeiten dokumentieren. Zeitstempel für Beginn und Ende der Demontage einzelner Komponenten werden digital erfasst, was eine spätere Analyse der Prozesszeiten erlaubt. Kamerasysteme ermöglichen die Identifikation und Dokumentation der demontierten Komponenten in Abgleich mit den Zeitstempeln. Jede Komponente erhält ein Etikett mit einer eindeutigen ID, die auch mit dem zugehörigen Behälter verknüpft wird. Zusätzlich werden die eingesetzten Werkzeuge dokumentiert, um Rückschlüsse auf den Demontageaufwand zu ermöglichen.

Analyse der Auffälligkeiten und Herausforderungen: Im Anschluss werden während der Demontage beobachtete Herausforderungen und Anomalien systematisch dokumentiert. Beispiele hierfür sind unerwartet austretende Restflüssigkeiten, Verunreinigungen oder schwer zugängliche Verbindungen. Die analysierten Auffälligkeiten liefern wertvolle Implikationen, beispielsweise für die Optimierung des Produktdesigns oder die ergonomische Gestaltung von Demontagearbeitsplätzen. Gemeinsam werden mögliche Lösungsansätze und Implikationen für die Gestaltung der Re-Assembly diskutiert und dokumentiert.

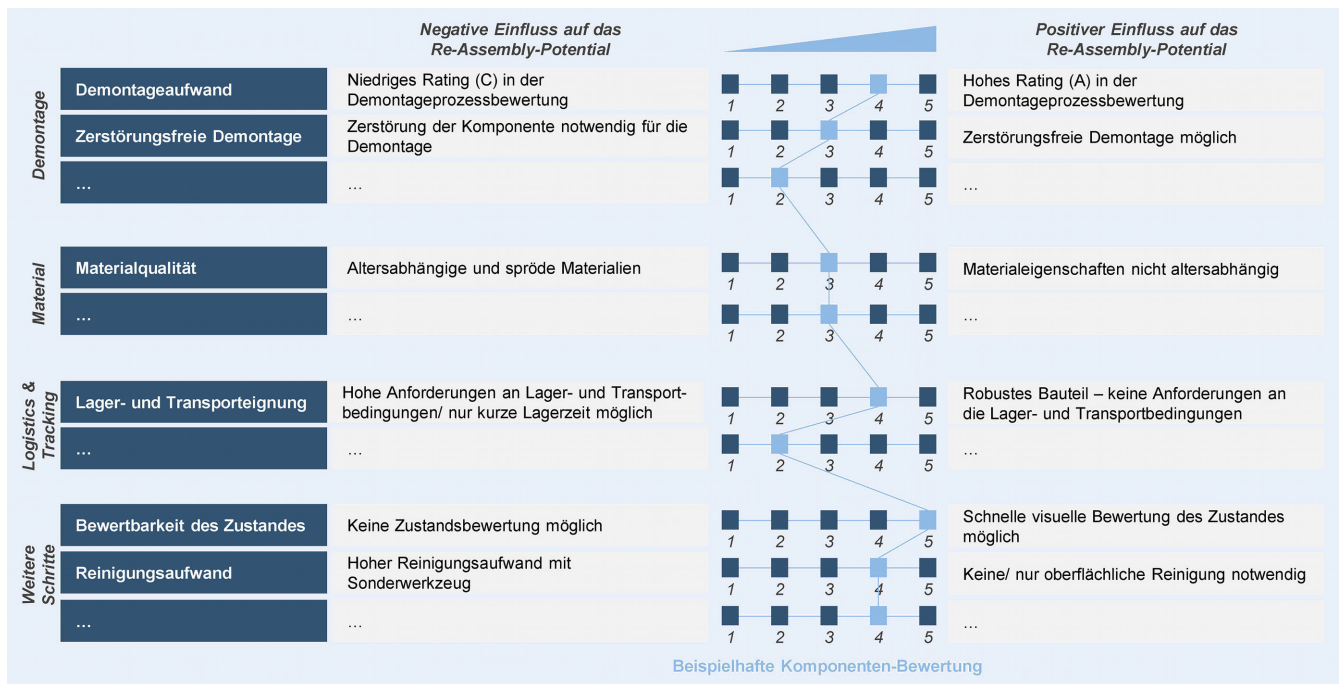


Bild 4. Auszug des Bewertungsschemas für die Demontage. Grafik: RWTH Aachen

Bewertung der einzelnen Komponenten: Die Bewertung der Komponenten erfolgt anhand eines entwickelten Bewertungsschemas mit einer fünfstufigen Likert-Skala. Bewertet werden Kategorien wie „Demontage“, „Material“, „Logistik & Tracking“ sowie „Weitere Schritte“. Das Bewertungsschema kann um unternehmensspezifische Kriterien ergänzt werden, wobei die Gewichtung der Kategorien vorab festgelegt werden kann. Die Bewertung erfolgt gemeinschaftlich durch die Workshopteilnehmenden und gewährleistet eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den analysierten Komponenten. Im Anschluss wird mit der Demontage der nächsten Komponente fortgefahren. Ausschnitte des Bewertungsschemas sind in **Bild 4** abgebildet.

Aufbereitung und Gesamtbewertung: Die vollständige Dokumentation des Workshops bildet eine wertvolle Datenbasis für die Auswertung. Neben den aufgenommenen Daten wie den Zeiten, den Werkzeugen und der Bewertung umfasst die Dokumentation auch alle identifizierten Herausforderungen und Auffälligkeiten inklusive der erarbeiteten Lösungsideen sowie die während der Demontage entstandenen Fotos und Videos. Hierdurch können Handlungsbedarfe in der Produktgestaltung identifiziert, der Gesamtaufwand der Demontage quantifiziert und Herausforderungen direkt an zuständige Abteilungen adressiert werden. Zudem ermöglicht die Priorisierung der Komponenten eine gezielte Weiterentwicklung der Re-Assembly-Strategie. Durch die Einbindung einer Kostensicht in der Nachbereitung kann eine wirtschaftlich geeignete Demontagetiefe bestimmt und ein Demontagetiefe-Graph abgeleitet werden (siehe **Bild 5**). Das so erarbeitete Gesamtbild bildet die Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen und Konzepten in den Fokusbereichen Produkt, Prozess und Planung.

5 Zusammenfassung / Ausblick

Die Fertigungsindustrie steht vor erheblichen Herausforderungen durch Ressourcenknappheit, strenge Regulierungen und ein

wachsendes Umweltbewusstsein der Konsumenten. Traditionelle lineare Wirtschaftsmodelle werden zunehmend als nicht zukunftsfähig erkannt, was die Bedeutung der Upgrade Circular Economy hervorhebt. Insbesondere das Re-Assembly bietet vielversprechende Ansätze zur Reduktion von CO₂-Emissionen und Energieverbrauch, während gleichzeitig ökonomische Vorteile wie höhere Gewinnmargen erzielt werden können. Dennoch stehen viele Unternehmen vor Hindernissen bei der Implementierung, da ihre Produkte, Prozesse und Planungsstrukturen häufig nicht auf diese Anforderungen ausgelegt sind.

Dieser Beitrag stellt das Re-X-Assessment als strukturierte Methode zur Bewertung des Re-Assembly-Potenzials vor. Es umfasst die Analyse der Re-Assembly-Fähigkeit bestehender Produkte, die Bewertung bestehender Prozesse sowie die Identifikation notwendiger Planungsanpassungen. Unterstützt wird die Anwendung des Assessments durch ein Demontageworkshop-Konzept, das in der Demonstrationsfabrik Aachen auf der Re-X-Assessment-Line umgesetzt wird. Die Workshops liefern praxisnahe Informationen zur Analyse des Ist-Zustandes und bieten Unternehmen eine Plattform, um Potenziale und Herausforderungen von Re-Assembly in einem realitätsnahen Umfeld zu erproben.

Für die Weiterentwicklung der vorgestellten Methode und der Re-X-Assessment-Line eröffnen sich vielversprechende Perspektiven. Eine zentrale Rolle spielt die Weiterentwicklung des Demontageworkshop-Konzeptes, insbesondere die datenbasierte Ableitung von Implikationen für die Gestaltung industrieller Demontagekonzepte. Darüber hinaus wird die Re-X-Assessment-Line durch neue Use Cases erweitert. Dazu zählen unter anderem die nahtlose Integration von Buchungen demontierter Teile in ERP-Systeme sowie deren Kopplung an bestehende MES-Systeme, um die Transparenz und Rückverfolgbarkeit zu erhöhen. Roboter-gestützte Demontageprozesse und KI-gestützte Bilderkennung zur Zustandsanalyse können Automatisierungspotenziale gezielt untersucht und in der Prototypenproduktion genutzt werden. Adaptive Arbeitsplanung, die auf den unsicheren Zuständen

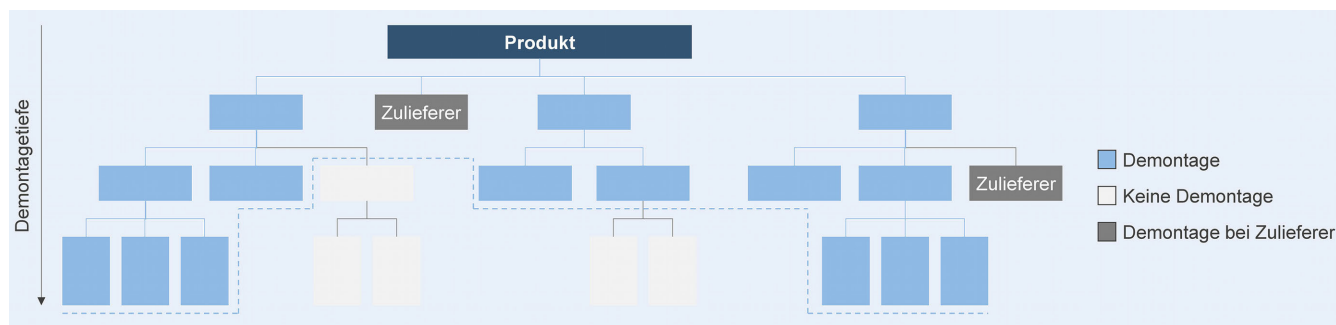


Bild 5. Demontagetiefe-Graph Grafik: RWTH Aachen

zurückgeführter Komponenten basiert, sowie die Anbindung an AGV-gestützte Intralogistiksysteme bieten zusätzliches Potenzial, um eine flexible und effiziente Produktion zu realisieren.

DANKSAGUNG

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Remanufacturing durch integrierte Produkt- und Produktionsprozessentwicklung“ erzielt. Die Autoren danken der Marga und Walter Boll-Stiftung für die Förderung des Projektes.

RE-X-ASSESSMENT UND DFA DEMONSTRATIONSFABRIK AACHEN

Kontaktpersonen für das Re-X-Assessment und die DFA Demonstrationsfabrik Aachen:
Dr.-Ing. Seth Schmitz | s.schmitz@wzl.rwth-aachen.de
Dr. Gregor Tücks | Geschäftsführer der Demofabrik Aachen | g.tuecks@demofabrik-aachen.de

Literatur

- [1] Neugebauer, R. (Hrsg.): Handbuch Ressourcenorientierte Produktion. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2013
- [2] Parker, D.; Riley, K.; Robinson, S. et al.: Remanufacturing market study, United Kingdom, 2015
- [3] Zimmermann, R.; Inês, A.; Dalmarco, G. et al.: The role of consumers in the adoption of R-strategies: A review and research agenda. Cleaner and Responsible Consumption 13 (2024), S. 100193
- [4] José Potting; Marko P. Hekkert; Ernst Worrell et al.: Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain, 2017
- [5] Riesener, M.; Kuhn, M.; Kelbel, N. et al.: Concept And Exemplary Application Of Industrialized Re-Assembly To An Automotive Use Case In The Context Of Circular Economy. Hannover : publish-Ing 2023
- [6] Lange, U.: Ressourceneffizienz durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen, 2017
- [7] Schuh, G.; Mauß, W.; Potente, T. et al.: Green Re-Assembly Upgrade Factory, 2023
- [8] Schuh, G.; Schmitz, S.; Schopen, M. et al.: Concept for Maturity Assessment of Remanufacturing Ability in Production Process Development. Procedia CIRP 120 (2023), S. 846–851
- [9] Luger, T.; Herrmann, C.; Steinborn, J. et al.: Wertschöpfung durch Mehrfachnutzung. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103 (2008) 9, S. 602–606
- [10] Vogt Duberg, J.; Johansson, G.; Sundin, E. et al.: Prerequisite factors for original equipment manufacturer remanufacturing. Journal of Cleaner Production 270 (2020), S. 122309
- [11] Jukun, Y.; Peizhi, C.; Xiaoming, W. et al.: Product Material Design Assessment Methods for Remanufacturing. 2014 Sixth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), Zhangjiajie, China, 2014, S. 459–462
- [12] Gupta, S. M.; McLean, C. R.: Disassembly of products. Computers & Industrial Engineering 31 (1996) 1-2, S. 225–228
- [13] Priyono, A.; Ijomah, W.; Bititci, U.: Disassembly for remanufacturing: A systematic literature review, new model development and future research needs. Journal of Industrial Engineering and Management 9 (2016) 4, S. 899
- [14] Kljajin, M. L.: Design for Disassembly due to Maintenance and Recycling. ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA, 2000, S. 51–59
- [15] Motevallian, B.; Abhary, K.; Luong, L. et al.: Integration and Optimisation of Product Design for Ease of Disassembly. In: Dudas, L. (Hrsg.): Engineering the Future. Sciyo 2010
- [16] Sundin, E.: Product Properties Essential for Remanufacturing, 2001
- [17] Butzer, S.; Schötz, S.; Steinhilper, R.: Remanufacturing Process Assessment – A Holistic Approach. Procedia CIRP 52 (2016), S. 234–238
- [18] Lang, E.; Fischer, M.; Metternich, J.: Anreize für die Rückführung von Produkten in der Kreislaufwirtschaft. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 119 (2024) 6, S. 406–411
- [19] J. Hall, D.; R. Huscroft, J.; T. Hazen, B. et al.: Reverse logistics goals, metrics, and challenges: perspectives from industry. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 43 (2013) 9, S. 768–785
- [20] Hansen, U.: Reverse logistics is the key for remanufacturing and a sustainable development. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE - 2000, San Francisco, CA, USA, 2000, S. 238–242
- [21] VDI-Gesellschaft für Produktion und Logistik: Reduce Complexity. Logistik für Unternehmen 35 (2021) 01-02, S. 23
- [22] Aras, N.; Boyaci, T.; Verter, V.: The effect of categorizing returned products in remanufacturing. IIE Transactions 36 (2004) 4, S. 319–331
- [23] Franck, E.; Bagschik, T.: Remanufacturing Informationelle und organisatorische Voraussetzungen. In: Nagel, K.; Erben, R. F.; Piller, F. T. (Hrsg.): Produktionswirtschaft 2000. Wiesbaden: Gabler Verlag 1999, S. 421–443
- [24] Chen, W.; Kucukyazici, B.; Verter, V. et al.: Supply chain design for unlocking the value of remanufacturing under uncertainty. European Journal of Operational Research 247 (2015) 3, S. 804–819
- [25] Behret, H.; Korugan, A.: Quality of returns: Is it a factor in remanufacturing? Optics East 2005, Boston, MA, 2005, 59970P-59970P-11
- [26] DePuy, G. W.; Usher, J. S.; Walker, R. L. et al.: Production planning for remanufactured products. Production Planning & Control 18 (2007) 7, S. 573–583
- [27] Sundin, E.: Product and Process Design for Successful Remanufacturing, 2004
- [28] Abramovici, M.; Fathi, M.; Holland, A. et al.: Integration von Feedbackdaten aus der Produktnutzungsphase im Rahmen des PLM-Konzepts, 2008
- [29] Wiederkehr, I.; Dumitrescu, R.; Koldewey, C. et al.: Datennutzung in der Produktionssystementwicklung/Using data for production system development. wt Werkstattstechnik online 112 (2022) 04, S. 264–268



Dr.-Ing. Seth Schmitz 

Foto: Autor

s.schmitz@wzl.rwth-aachen.de

Tel. +49 241 80-27387

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Günther Schuh 

Annkristin Hermann, M.Sc. 

Tim Hommen, M.Sc. RWTH, M.Sc. 

Friedrich Wintzer, M.Sc. 

Werkzeugmaschinenlabor WZL
der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.wzl.rwth-aachen.de

LIZENZ



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