

Umformtechnische Prozesskette für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft in der Automobilproduktion

Umformtechnische Verwertung einer Lenkungs-komponente

R. Selbmann, T. Paizs, P. A. Schmidt, R. Haase, M. Hoffmann, S. Knorn

ZUSAMMENFASSUNG In diesem Beitrag wird eine Prozesskette zur Umnutzung einer PKW-Lenkungs-komponente beschrieben. Dafür wurde die Komponente Zahnstange aus einem PKW-Lenkgetriebe demontiert und in Spurstangen für ein Lenkgetriebe der nächsten Generation umgearbeitet. Damit kann ein anschauliches Praxisbeispiel für eine zukünftige Kreislaufwirtschaft in der Automobilproduktion aufgezeigt werden.

STICHWÖRTER

Kreislaufwirtschaft, Automobilindustrie, Umformtechnik

Repurpose of a steering component by forming technology process chain

ABSTRACT This paper presents a process chain for repurposing an automotive steering component. Specifically, the rack from an existing steering gear was extracted and reengineered into tie rods for a next-generation steering gear. This serves as a tangible example of how circular economy principles can be integrated into future automotive manufacturing solutions.

1 Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden innovative Technologien und Geschäftsmodelle entwickelt, die eine hoch-ratenfähige Kreislauf-führung von Bauteilen und Materialien bei der Produktion von Kraftfahrzeugen ermöglichen sollen. Ziel war es, die Ressourceneffizienz signifikant zu steigern und die Resilienz von Lieferketten durch sekundäre Rohstoffquellen zu erhöhen. Das übergeordnete Ziel des Projekts bestand darin, Stoffkreisläufe durch eine effiziente und wirtschaftliche Demontage sowie industrielle Aufarbeitung und Wiederverwendung von Automobilkomponenten zu erweitern.

Zur Validierung der entwickelten Methoden und Technologien wurden Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Lösungsbau-steinen untersucht. Einen Anwendungsfall stellte die adaptive, teilautomatisierte und KI-gestützte Demontage einer Antriebs-strangbaugruppe dar. Ebenso wurde die gestufte Wiederaufar-beitung einzelner Bauteile dieser Baugruppe untersucht. Hierbei wurden sowohl die direkte Wiederverwertung durch lokale Nach-bearbeitung als auch die Umarbeitung betrachtet, beispielsweise durch Überarbeitung und Integration als kleineres, artgleiches Bauteil in einem Baukastensystem.

Dieser Beitrag stellt eine Prozesskette zur Umnutzung („Re-purpose“) einer Komponente im Antriebsstrang vor.

2 Stand der Technik

Das Lenkgetriebe, wie in **Bild 1** dargestellt, ist wesentlicher Bestandteil einer PKW-Lenkung [1] und überträgt die rotatori-sche Lenkradbewegung in eine lineare Bewegung von Schubstangen, welche an den Rädern des Fahrzeuges eine kontrollierte Schwenkbewegung steuern.

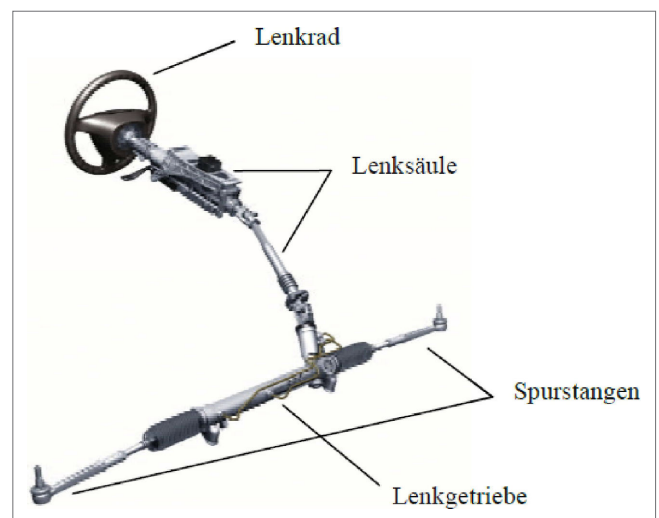


Bild 1 Bauteile einer PKW-Lenkung. Grafik: [1]

Der gewählte Demonstrator betrachtet ein elektromechanisches Lenksystem (electric power steering, EPS), welches aktuell in nahezu allen modernen Fahrzeugen zu finden ist. Je nach Fahrzeugart existieren verschiedene Lenkungstypen, die sich in Tragfähigkeit, Konstruktion und Preis unterscheiden. Für die Kraftübertragung gibt es mehrere Getriebevarianten. Allen Systemen gemein ist die Übertragung der elektrisch unterstützten Drehbewegung auf die Lenkachse. Elektrische Servolenkungen bieten vielfältige Vorteile in Automobilen. Erstens ermöglichen sie eine signifikante Reduzierung der erforderlichen Lenkkraft, wodurch der Fahrer entlastet und der Komfort während der Fahrzeugführung gesteigert wird. Zweitens kann durch die Integration in die Fahrdynamikregelung die Sicherheit erhöht werden, indem

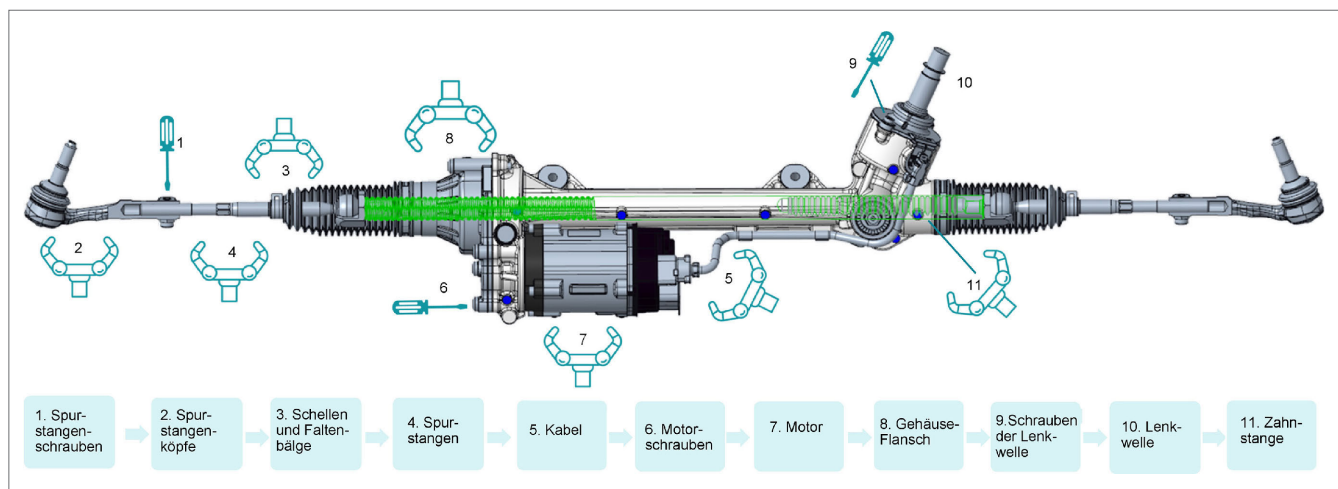


Bild 2 Workflow zur Demontage des Lenkgetriebes. Grafik: Fraunhofer IWU

gezielte Lenkeingriffe zur Stabilisierung des Fahrzeugs in kritischen Fahrsituationen vorgenommen werden. Außerdem bildet diese Technologie die Grundlage für automatisierte Lenkvorgänge, wie sie für das autonome Fahren und automatisiertes Einparken erforderlich sind. Auf diese Weise trägt die rotatorische Unterstützung von PKW-Lenkungen durch E-Motoren wesentlich zu einer erhöhten Fahrsicherheit, mehr Komfort und der Realisierung zukünftiger Mobilitätskonzepte bei.

Um diese anspruchsvollen und sicherheitskritischen Funktionen auszuführen, sind unterschiedliche hochwertige Komponenten und Sub-Komponenten integriert. Während die Gehäusebestandteile wie das Gehäuse selbst, der Motorflansch und der Getriebedeckel aus Aluminium (Al)-Druckguss bestehen, sind Ritzel, Schnecke, Zahnstange, Lenkmutter sowie Radaufhängung aus vergütetem Stahl gefertigt. Je nach erforderlicher Leistung ist ein Gleichstrom- oder Asynchronmotor verbaut, der aus verschiedenen Metallen und Magneten gefertigt ist.

Hochwertige Materialien ermöglichen über alle Lenkungsarten hinweg eine lange Lebensdauer. Zudem werden vor allem auf Komponentenebene im Wesentlichen Schraubverbindungen eingesetzt, die den Austausch defekter Teile erlauben. Lediglich die Sub-Komponenten sind nicht zerstörungsfrei demontierbar. Die dargestellten Lenksysteme sind häufig Teil der Vorderachse und müssen teilweise massiven Kräften standhalten. Daher sind die Gussbauteile entsprechend dimensioniert. Auch dieser Umstand, nicht nur die Herstellung von Zahnstange und Unterstützungsmotor, bedingt einen hohen CO₂-Fußabdruck.

Obwohl die verschiedenen Lenksysteme von vielerlei unabhängigen Firmen, wie Borg Automotive oder Remante, oder Erstausrüstern wie Bosch oder ZF aufgearbeitet werden, bestehen verschiedene Herausforderungen [2]. Zum einen handelt es sich bei der Lenkung um eine sicherheitskritische Baugruppe, bei der ein Versagen zu fatalen Konsequenzen führen kann. Zum anderen ist es ein variantenreiches Produkt, bei dem in der Regel weder Hauptbestandteile zwischen den verschiedenen Lenkungsarten noch innerhalb ihrer Produktgruppe kompatibel sind. Dies erschwert eine effiziente Planung und Steuerung der Produktion, die Lagerhaltung sowie die Auslastung der zur Verfügung stehenden Kapazität. Die Aufarbeitung von Lenkgetrieben findet bisher ausschließlich für den Bereich „Aftermarket“ statt, da sich Automobilhersteller nach Branchenstandard freiwillig dazu verpflichten, die Versorgung mit Ersatzteilen bis 10 Jahre nach Produkti-

onsende des jeweiligen Fahrzeugtyps sicherzustellen, und die Abrufzahlen für die Lenkungshersteller unrentabel gering sind.

Im Projekt wurde daher die Umnutzung der bestehenden Komponenten in Erwägung gezogen, um entweder das bestehende Portfolio von (unabhängigen) Aufarbeitern zu erweitern oder Umnutzungslösungen in die originäre Prozesskette von Erstausrüstern zu integrieren. Dieser Ansatz wird bislang selten in der Literatur und noch weniger in der industriellen Praxis in Erwägung gezogen. Die Umsetzung erfolgte an einem elektromechanischen Lenkgetriebe mit Achsparallelantrieb (EPSapa PL7) der Firma Robert Bosch Automotive Steering GmbH, das mit hohem Automatisierungsgrad demontiert wurde.

3 Demontage des Lenkgetriebes

Mit den Mitteln des Projekts war eine automatisierte Entnahme des Lenkgetriebes aus dem Fahrzeug nicht realisierbar. Daher beschränkt sich die Untersuchung auf eine bereits ausgebaute Komponente. Für die Demontage des Lenkgetriebes wurden zunächst verschiedene Arbeitsabläufe entwickelt und detailliert analysiert. In einem strukturierten Bewertungsprozess erfolgte ein systematischer Vergleich dieser Abläufe auf relevante Kriterien wie Zeitaufwand, Arbeitssicherheit und technische Umsetzbarkeit. Im Ergebnis wurde jeweils die Variante mit der höchsten Bewertung ausgewählt und für die praktische Umsetzung herangezogen. Der ausgewählte Demontageprozess gliedert sich in 11 aufeinanderfolgende Demontageschritte (**Bild 2**), die für eine vollständige und fachgerechte Zerlegung des Lenkgetriebes erforderlich sind.

Aufbauend auf der zuvor definierten Prozessroute wurden die einzelnen Prozessschritte detailliert ausgearbeitet und das jeweils erforderliche Equipment beschrieben. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf eine optimale Gestaltung des Demontageprozesses gelegt, wobei die spezifischen Kompetenzen und technischen Ressourcen der am Forschungsvorhaben beteiligten Projektpartner gezielt einbezogen wurden. Dies erfolgte in enger Abstimmung, um die vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen bestmöglich zu nutzen und einen effizienten und sicheren Ablauf zu gewährleisten. Zur Identifikation potenzieller Herausforderungen und praxisrelevanter Problemstellungen wurde ein Lenkgetriebe zunächst manuell demontiert. Während dieses Versuchsprozesses zeigte sich, dass der Hersteller für die Schraubverbindungen im Lenkgetriebe ein vergleichsweise niedriges Anziehdrehmoment

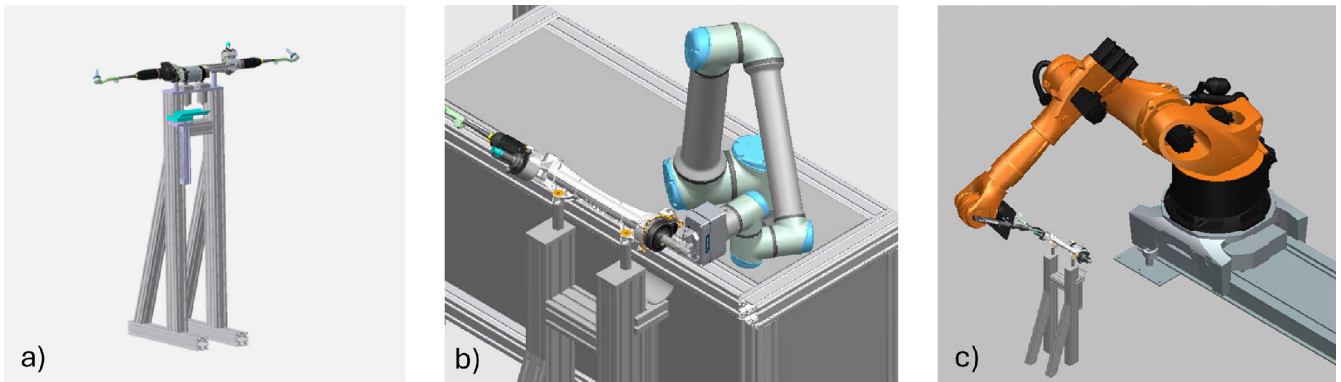


Bild 3 a) Vorrichtung zum Fixieren des Lenkgetriebes, b) UR-10e-Cobot, c) KUKA KR100. Grafik: Fraunhofer IWU

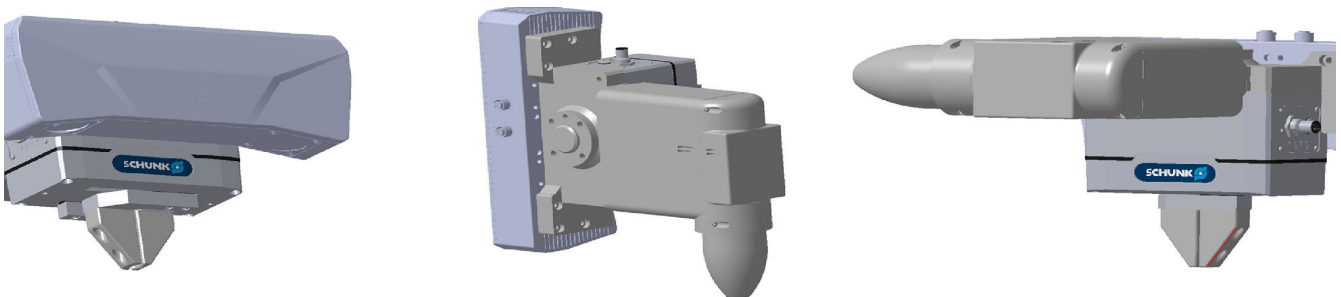


Bild 4 Flexibles Werkzeug bestehend aus 3D-Kamera (links), Schrauber (Mitte) und Greifer (rechts). Grafik: Fraunhofer IWU

gewählt hatte. Das daraus resultierende geringe Lösemoment erlaubte den Einsatz eines kollaborativen Roboters (Cobot) des Herstellers Universal Robot für die automatisierte Demontage. Dies eröffnete die Möglichkeit, einen mobilen und flexiblen Versuchsaufbau zu realisieren, bei dem der Cobot die Demontageschritte übernehmen kann. Es stellte sich jedoch auch heraus, dass bei höheren Lösemomenten die Haltekräfte des Cobots begrenzt sind. In solchen Fällen besteht das Risiko, dass das beim Lösen der Schrauben notwendige Drehmoment oder das daraus resultierende Gegenmoment die mechanische Belastungsgrenze des Cobots überschreitet.

Als besondere Herausforderung im Demontageprozess wurde die Demontage des stirnseitigen Gehäuses auf der dem Motor gegenüberliegenden Seite identifiziert. Für die Lösung dieser Verbindung ist ein deutlich erhöhter Kraftaufwand erforderlich, da das Gehäuse offenbar mit einer Dichtung versehen ist, welche das Lösen erschwert. Diese Erkenntnis ist vor allem für die Auslegung und Auswahl des Demontageequipments sowie die Prozessplanung von zentraler Bedeutung.

3.1 Realisierung des Versuchsaufbaus

Für die automatisierte Demontage des Lenkgetriebes unter Einsatz eines Cobots war die Entwicklung und Integration einer speziell angepassten Spannvorrichtung unerlässlich. **Bild 3 a** zeigt die hierfür konstruierte Spannvorrichtung, die das Lenkgetriebe während sämtlicher Demontageschritte sicher aufnimmt und zuverlässig fixiert. Die Vorrichtung wurde so ausgelegt, dass sie unterschiedliche Geometrien und Größen von Lenkgetrieben (bis 25 kg) aufnehmen kann, was eine hohe Flexibilität im Einsatz gewährleistet.

Das eigentliche Einspannen des Lenkgetriebes erfolgte mittels Schwenkspannern. Diese Komponenten bieten den Vorteil, dass

sie eine stabile Fixierung und ein schnelles Umrüsten zwischen verschiedenen Werkstücken ermöglichen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Automatisierung und die angestrebte Prozessoptimierung von Bedeutung.

Zur zusätzlichen Abstützung des Motors, der am Lenkgetriebe montiert ist und während der Demontage besondere Anforderungen an die Stabilität stellt, wurde ein weiterer Manipulator in Form eines pneumatischen Zylinders integriert. Dieser Zylinder übernahm die Aufgabe, das Bauteil gezielt abzustützen und Bewegungen während des automatisierten Prozesses zu verhindern. Durch die Integration des pneumatischen Zylinders konnte auf den sonst notwendigen Einsatz eines zweiten Roboters verzichtet werden, da die erforderlichen Stützkräfte und Positionssicherungen durch diese Komponente bereitgestellt wurden. Dies reduzierte die Komplexität und Investitionskosten der Gesamtanlage und ermöglichte einen kompakten, effizienten Versuchsaufbau.

Anschließend wurde die Zugänglichkeit sowohl mit einem "UR-10e"-Cobot als auch mit einem Industrieroboter (KUKA KR100) geprüft und daraus resultierende Änderungen an der Vorrichtung realisiert (**Bild 3 b**) und (**Bild 3 c**)).

Nach der umfassenden Entwicklung und Optimierung der einzelnen Prozessschritte wurde anhand der erarbeiteten Ergebnisse ein Endeffektor konzipiert, der eine flexible und multifunktionale Nutzung erlaubt. Die Besonderheit dieses Endeffektors liegt in der Integration der drei zentralen Funktionen Scannen, Schrauben und Greifen innerhalb eines einzelnen Werkzeugs (**Bild 4**).

Durch diese Mehrfachfunktionalität entfällt der bisher sonst notwendige Wechsel zwischen verschiedenen Endeffektoren nach jedem Prozessschritt. Stattdessen kann die jeweils benötigte Funktion durch eine einfache und zeitsparende Umpositionierung mittels Rotation um die sechste Achse des Cobots aktiviert werden, was den Gesamtprozess vereinfacht und beschleunigt. Ein

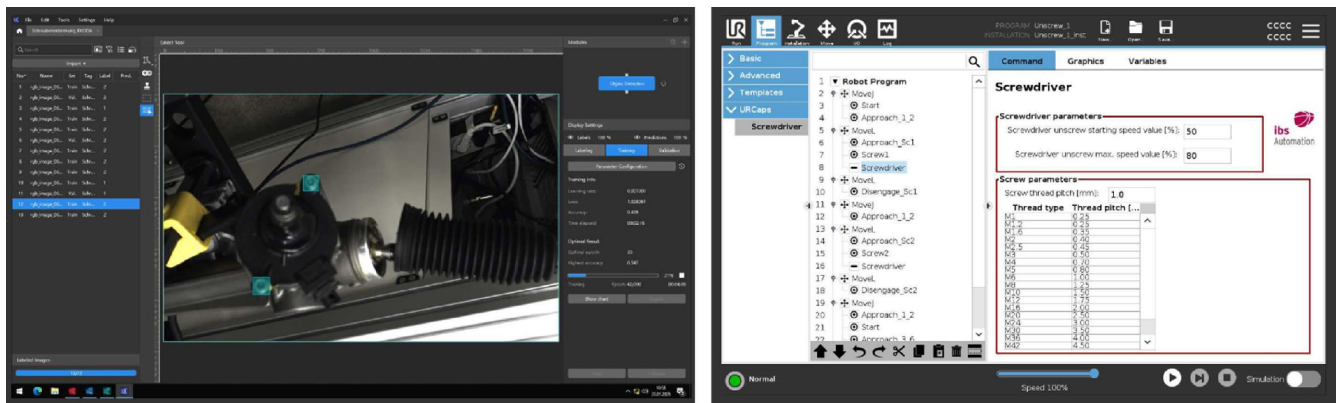


Bild 5 Generiertes Softwaretool zum adaptiven Erkennen der Schraubenköpfe. Grafik: Fraunhofer IWU

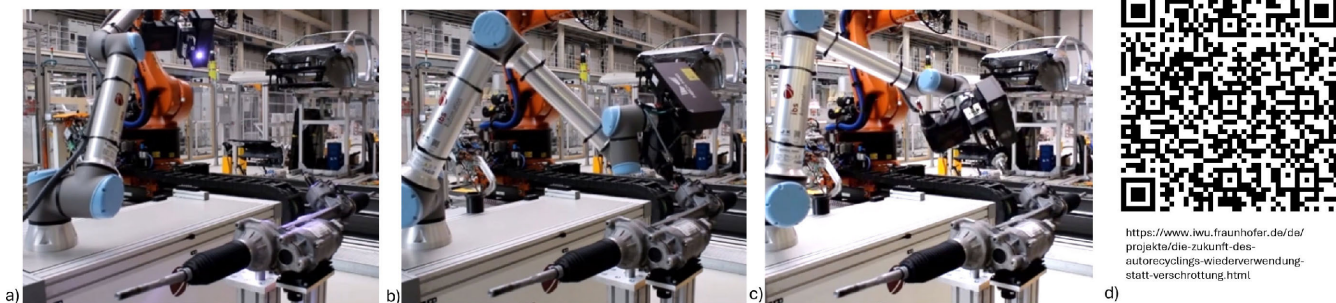


Bild 6 Demonstration des Prozesses zur Demontage des Lenkgetriebes: a) Scannen, b) Schrauben, c) Greifen, d) Link zum Video [7]. Grafik: Fraunhofer IWU

Werkzeugwechsel ist lediglich bei den Einsatzbits des Schraubers erforderlich.

Im Rahmen der Demontageschritte konnten die einzelnen Arbeitsschritte (das Erfassen der Schrauben über einen 3D-Scanner, das Lösen und Entfernen der Schrauben durch den Schrauber sowie das anschließende Greifen und Entfernen der gelösten Komponente) vollständig automatisiert umgesetzt werden. Zur Gewährleistung eines robusten Prozesses war die Kompensation aller bauteil- und prozessbedingten Toleranzen erforderlich. Vor allem das adaptive Auffinden der Schraubenköpfe erwies sich in diesem Zusammenhang als zielführend. Dafür wurde ein spezifisches Softwaretool entwickelt (**Bild 5**), das auf Algorithmen zur Detektion der Schraubenköpfe basiert.

Die Erkennung erfolgt durch eine 3D-Kamera des Herstellers MechMind, welche das Prinzip der Triangulation und des strukturierten Lichts nutzt. Diese Technologie erlaubt eine zuverlässige Detektion der Schraubenköpfe auch bei variierenden Oberflächenbedingungen.

Die Integration des Schraubers in die Prozessabläufe des Cobot gelang durch die Entwicklung einer dedizierten Softwarekomponente für die UR10e-Softwareumgebung. Durch gezielte Ansteuerung des Schraubers für (variabler) Drehzahl und Drehrichtung zum jeweiligen Prozesszeitpunkt können Funktionen wie das präzise Einfädeln des Schrauberbits in den Schraubenkopf umgesetzt werden. Die in den Achsen des Cobot integrierten Kraftsensoren ermöglichen außerdem die Erfassung der auf den Roboterarm wirkenden Belastungen, was wiederum Funktionen wie das Erkennen des korrekt eingefädelten Bits in den Schraubenkopf erlaubt. Beim Herausschrauben bewegt sich die Schraube aufgrund der Gewindesteigung axial in Richtung des Schraubers. Während konventionelle industrielle Schraubensysteme für 6-Achs-

Roboter zur Kompensation dieser Bewegung auf eine zusätzliche Spindel zurückgreifen, nutzt der Cobot die bereits vorhandenen Drehmomentdaten der Achsen für eine adaptive Regelung. Damit werden die durch die Schraubendrehung hervorgerufenen Gegenkräfte aufgenommen und der notwendige Hub direkt durch den Roboter kompensiert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die im Rahmen der Entwicklung erzielten Entschraubergebnisse den gestellten Anforderungen entsprechen und die technischen Möglichkeiten des Cobots zur Realisierung des Demontageprozesses effizient und erfolgreich genutzt werden konnten.

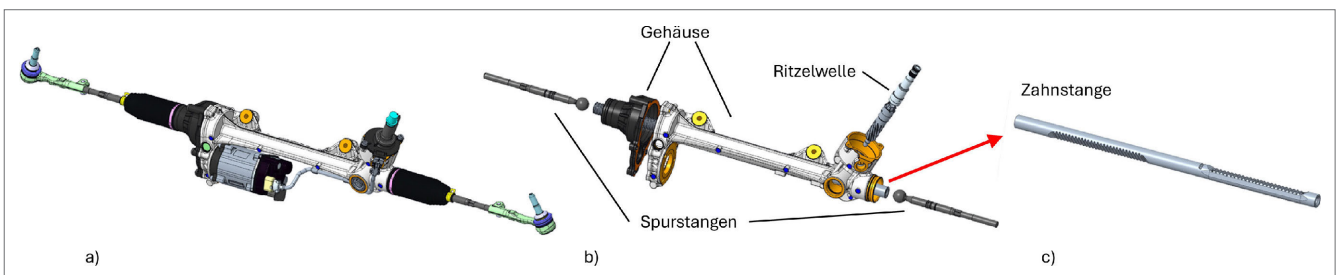
3.2 Demonstration der Demontage

Die Umsetzung des beschriebenen Demontageprozesses erfolgte im Versuchsfeld des Fraunhofer IWU in Chemnitz. Ziel dieser Untersuchungen war es, die entwickelten Prozessschritte unter realitätsnahen Bedingungen experimentell zu validieren, die Leistungsfähigkeit zu bewerten und Optimierungspotenziale zu identifizieren. Die Durchführung gliederte sich in drei zentrale Verfahrensschritte, welche in **Bild 6** sowie im Video unter [3] am Beispiel des LöSENS der Schrauben der Ritzelwelle sowie der anschließenden Entnahme der Ritzelwelle illustriert sind.

Im ersten Schritt wurde das zu bearbeitende Bauteil mit einer hochauflösenden 3D-Kamera vollständig erfasst. Die erzeugten 3D-Daten erlaubten eine präzise Analyse der Bauteilgeometrie. Sowohl die relevanten Bereiche als auch die exakten Positionen der zu entfernenden Schraubenköpfe konnten zuverlässig ermittelt werden. Diese Datengrundlage bildete die Voraussetzung für die nachfolgenden automatisierten Arbeitsschritte.

Tabelle 1 CO₂-Bilanz Lenkgetriebe Kernkomponenten.

Komponente	Anzahl	CO ₂ -Footprint in kg	Σ CO ₂ -Footprint in kg
Gehäuse	1	15,41	15,41
Gehäusedeckel	1	4,02	4,02
Zahnstange	1	14,90	14,90
Spurstange	2	2,28	4,56
Ritzelwelle	1	1,81	1,81
Lenkwelle	1	0,92	0,92
			41,62

**Bild 7** a) Lenkgetriebe, b) Lenkgetriebe Kernkomponenten, c) Zahnstange. Grafik: Fraunhofer IWU

Im zweiten Schritt erfolgte das adaptive Anfahren der zuvor lokalisierten Schraubenköpfe durch den Cobot. Dabei wurde der Schrauber gezielt auf jeden einzelnen Schraubenkopf ausgerichtet, wobei die Bewegungen des Roboters kontinuierlich an die jeweiligen Positionen und Orientierungen der Schrauben angepasst wurden. Dies erlaubte das prozesssichere Lösen und Entfernen der Schrauben, selbst bei variierenden Bauteilgeometrien oder leichten Fertigungstoleranzen.

Im dritten Schritt wurden die zuvor gelösten Bauteile, konkret die Ritzelwelle, von dem Endeffektor adaptiv angefahren. Mithilfe des integrierten Greifers konnte die Ritzelwelle sicher gegriffen und schonend aus dem Bauteilverbund herausgelöst werden. Die strukturierte, geometrieangepasste Vorgehensweise ermöglichte eine effiziente und flexible automatisierte Demontage mit hoher Prozesssicherheit.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass sich flexible und adaptive Demontageprozesse durch den Einsatz moderner Robotik- und Sensortechnologien nicht nur technisch realisieren, sondern auch effizient und somit wirtschaftlich gestalten lassen. Die im Rahmen der Arbeiten entwickelten Technologien und Strategien besitzen einen generischen Charakter und sind auf eine Vielzahl unterschiedlicher Demontageanwendungen übertragbar, was ihr Potenzial für den breiten industriellen Einsatz unterstreicht.

4 Aufarbeitung einer Komponente des Lenkgetriebes

Nachdem das Lenkgetriebe erfolgreich und automatisiert demontiert wurde, erfolgte im Anschluss eine abschätzende Bewertung der demontierten Kernkomponenten hinsichtlich ihres CO₂-Fußabdrucks. Ziel dieser Analyse war es, das Verwertungspotenzial sowie die Kreislauffähigkeit der einzelnen Bauteile zu bestimmen. Die relevanten Komponenten wurden systematisch erfasst und in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Für die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks kam der “Fred Footprint Calculator” [4] zum Einsatz, ein Werkzeug, das methodisch für die Berechnung des Product Carbon Footprint (PCF) und des Corporate Carbon Footprint (CCF) zertifiziert ist. Fred wurde nach den Anforderungen der Standards DIN EN ISO 14067 und DIN EN ISO 14064-1 speziell für Stahl- und Aluminiumprodukte sowie für spezifische Prozesse der Zuliefererindustrie entwickelt und ermöglicht somit eine normkonforme Ermittlung von produkt- und unternehmensbezogenen Treibhausgasbilanzen. In der Bewertung wurden sowohl material- als auch prozessbedingte Emissionen berücksichtigt. Die gewonnenen Ergebnisse liefern wertvolle Erkenntnisse zur ökologischen Nachhaltigkeit und Wiederverwendbarkeit der einzelnen Komponenten und dienen als Entscheidungsgrundlage für eine ressourcenschonende und nachhaltige Kreislaufwirtschaft.

Die Auswahl der zu betrachtenden Komponente fiel auf die Zahnstange (**Bild 7**), die im vorliegenden Fall exemplarisch für eine potenzielle Weiterverwendung qualifiziert werden sollte.

Anhand dieses Bauteils wurde die Erweiterung von Stoffkreisläufen demonstriert. Dabei kamen flexible und automatisierbare Demontagetechnologien zum Einsatz. Das gewählte Beispiel erweitert bestehende Demontage- und Wiederverwendungsstrategien im Automobilssektor um eine Komponente aus dem Antriebsstrang. Während in [5] bereits eine exemplarische Methode zur Umnutzung eines Bauteils aus dem Karosseriebereich (Blech) vorgestellt wurde, fokussiert sich die vorliegende Untersuchung auf den Antriebsstrang. Im ersten Schritt wurde der Zustand der Zahnstange systematisch erfasst, was die Prüfung auf Verschleiß (maßliche Abweichungen), Beschädigungen, Risse sowie Korrosion einschloss.

4.1 Werterhaltungsstrategie

Nachdem die Zahnstange demontiert, ihr Zustand umfassend erfasst und eine detaillierte Verschleißcharakterisierung durchge-

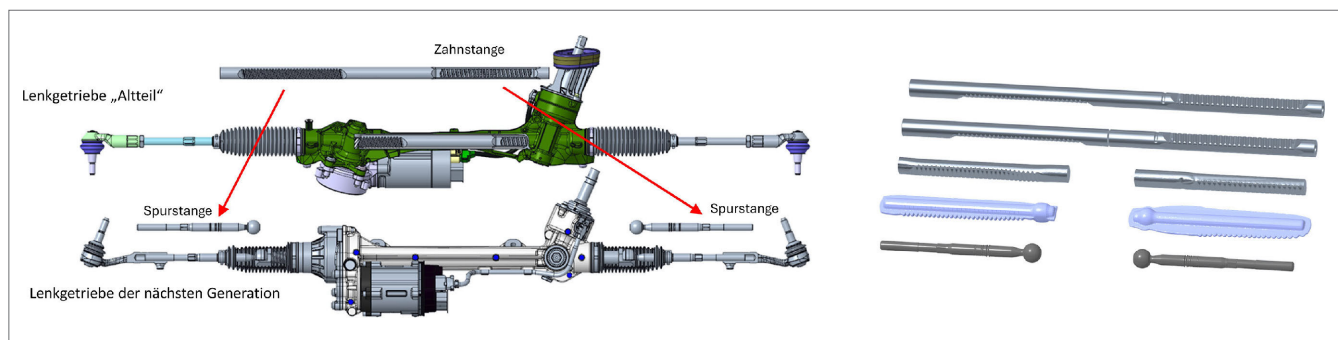


Bild 8 „Repurpose“-Prozesskette, Zahnstange à 2 Spurstangen. Grafik: Fraunhofer IWU

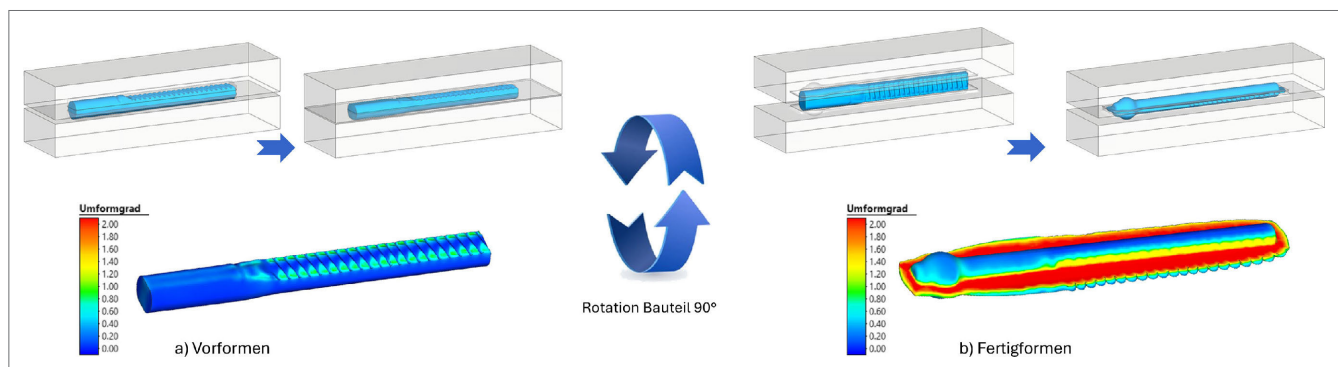


Bild 9 Finite-Elemente-Simulation für umformtechnische Prozesskette: a) Vorformen, b) Fertigformen. Grafik: Fraunhofer IWU

führt war, stellte sich die Frage nach der optimalen Werterhaltungsstrategie. Dabei wurden verschiedene Optionen der 9R-Strategien [6] in Betracht gezogen, darunter R5: Refurbish, R6: Remanufacture, R7: Repurpose und R8: Recycle. Zur Entscheidungsfindung wurden für die einzelnen Strategien sowohl das CO₂-Einsparpotenzial als auch die technologischen Umsetzbarkeiten, das ökonomische Potenzial sowie der spezifische Bedarf des Kunden (Lenkgetriebehersteller) systematisch analysiert und bewertet.

Anhand dieser Analyse wurde für die relevanten Varianten das CO₂-Einsparpotenzial mithilfe etablierter Methoden quantifiziert. Parallel dazu erfolgte eine Untersuchung der für die jeweilige Strategie verfügbaren technologischen Möglichkeiten sowie eine Abschätzung der damit verbundenen wirtschaftlichen Vorteile. Darüber hinaus wurden die Anforderungen und der Bedarf des Kunden in die Bewertung einbezogen, um eine praxisorientierte und marktgerechte Lösung zu gewährleisten.

Die Auswahl und Priorisierung der geeignetsten Werterhaltungsstrategie erfolgte durch einen Variantenvergleich nach den Richtlinien der VDI 2225, was eine strukturierte Bewertung und Gewichtung aller relevanten Kriterien ermöglichte. Als Ergebnis dieses systematischen Vergleichs konnte ein Vorzugsszenario identifiziert werden: die Umnutzung (R7: Repurpose) der Zahnstange zu zwei Spurstangen für eine Lenkung der nächsten Generation. Die resultierende Prozesskette in Bild 8 illustriert die einzelnen Schritte und zeigt das Potenzial der Repurpose-Strategie für die nachhaltige Nutzung und Wertschöpfung im Kontext der Kreislaufwirtschaft auf.

4.2 Prozesskette

Die Umnutzung (R7: Repurpose) der Komponente sollte an einem Demonstrator aufgezeigt werden, um die technische Mach-

barkeit und das Potenzial dieses Ansatzes darzustellen. Ziel war die Entwicklung einer serienfähigen Prozesskette, mit deren Hilfe aus einer demontierten Zahnstange zwei Spurstangen hergestellt werden können. Dazu wurden industriell etablierte Fertigungsverfahren herangezogen, wobei insbesondere Umformprozesse und eine anschließende spanende Nachbearbeitung zum Einsatz kamen.

Im ersten Schritt der Prozessentwicklung wurde ausgehend von den Anforderungen an das Zielbauteil - die Spurstange - ein entsprechendes Schmiedeteil in seiner Endkontur (Fertigform) abgeleitet. Im Anschluss erfolgte die Auslegung der umformtechnischen Prozesskette für dieses Schmiedeteil. Als Ausgangsmaterial dienten dabei Segmente, die gezielt aus der demontierten Zahnstange herausgetrennt wurden. Zur Unterstützung der Prozessauslegung kam die Simulationssoftware "Simufact.Forming2024.2" zum Einsatz, mit der eine 3D-Simulation des Umformprozesses durchgeführt wurde. Diese Simulation erlaube die Analyse der Formfüllung, die Identifikation potenzieller Falten- und Fehlstellen sowie die Ermittlung des erforderlichen Kraftbedarfs während des Umformvorgangs. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde ein zweistufiger Warmmassivumformprozess (Vorformen und Fertigformen) konzipiert, wie in Bild 9 dargestellt. Während des Prozesses wird das Bauteil auf eine Temperatur von 1100 °C erwärmt und zwischen dem Vorform- und dem Fertigformprozess um 90° entlang der Längsachse rotiert, um eine optimale Formgebung zu gewährleisten.

Durch dieses methodische Vorgehen wurde eine effiziente und praxistaugliche Prozesskette für die Umnutzung der Zahnstange zu Spurstangen entwickelt, die den Anforderungen an die Qualität und Serienfähigkeit industrieller Anwendungen entspricht.

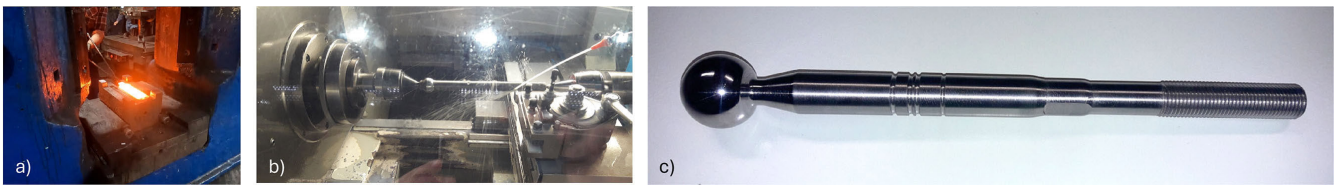


Bild 10 a) Schmiedeprozess, b) spanende Nachbearbeitung, c) Spurstange. *Grafik: Fraunhofer IWU*



Bild 11 Demonstrator Prozesskette. *Grafik: Fraunhofer IWU*

4.3 Versuchsdurchführung

Auf Basis der Ergebnisse der numerischen Simulation wurde eine geeignete Umformmaschine (Schmiedehammer) ausgewählt. Anschließend wurden die notwendigen Konstruktionsunterlagen für die Ausgestaltung der Werkzeuggravuren erstellt. Nach der Fertigung des Werkzeugs und dem Zusägen der Zahnstangenabschnitte auf die erforderlichen Längen erfolgten die experimentellen Schmiedeversuche.

Hierzu wurden die zugesägten Abschnitte der Zahnstange in einem Drehherdofen auf eine Temperatur von 1100 °C erwärmt und anschließend manuell in die Vorformgravur eingelegt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Verzahnung nach oben ausgerichtet war, siehe **Bild 10 a**.

Nach dem ersten Umformhub im Vorformwerkzeug wurde das Werkstück entnommen, um 90° um die Längsachse gedreht und anschließend in die Fertiggravur eingelegt. Es folgte die zweite Umformstufe, nach deren Abschluss das Schmiedeteil entnommen werden konnte. Im Anschluss an den Umformprozess wurden die Bauteile entgratet und einer spanenden Nachbearbeitung unterzogen, **Bild 10 b**, um die finale Geometrie der Spurstangen herzustellen, **Bild 10 c**.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der demonstrierten Prozesskette zur Umnutzung einer Antriebsstrangkomponente wurde detailliert nachgewiesen, wie ein Produktlebenszyklus oder -kreislauf in der automobilen Serienfertigung geschlossen werden kann. Durch die gezielte Aufbereitung und Wiederverwendung hochwertiger Bauteile oder Baugruppen wird ein unmittelbarer Beitrag zur Bewältigung wesentlicher Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft geleistet. Insbesondere in Bezug auf die Schonung natürlicher Ressourcen, die Sicherstellung der Materialverfügbarkeit, die Steigerung der Energieeffizienz und die signifikante Reduktion von Treibhaus-

gasemissionen, speziell CO₂, bietet das vorgestellte Konzept substanziale Vorteile.

Das entwickelte Basiskonzept zeigt am Beispiel eines Massenprodukts der Automobilindustrie Perspektiven für die systematische und qualitativ hochwertige Wiederverwertung in großem Maßstab auf. Im Zentrum steht die Rückgewinnung von Stahl aus gebrauchten Komponenten, ohne dass dieses Material erneut dem energie- und ressourcenintensiven Recyclingprozess der Hochofenroute zugeführt werden muss. Angesichts zunehmend knapp werdender natürlicher Ressourcen und steigender Anforderungen an die Nachhaltigkeit industrieller Prozesse ist diese Vorgehensweise von besonderer Relevanz. Die direkte Umnutzung gebrauchter Bauteile ermöglicht erhebliche Einsparungen sowohl beim Materialeinsatz als auch beim Energieverbrauch und trägt damit maßgeblich zur Verbesserung der ökologischen Bilanz industrieller Produkte bei.

Die Umsetzung des betrachteten Anwendungsfalls erfolgte unter Verwendung hochratenfähiger und in der Industrie etablierter Fertigungsverfahren, um die Übertragbarkeit und Integration in bestehende Serienproduktionssysteme sicherzustellen. Hierdurch wird die industrielle Skalierbarkeit des Ansatzes gewährleistet und die Grundlage für eine breite Anwendung in der automobilen Massenfertigung geschaffen.

Trotz der aufgezeigten Potenziale werden vergleichbare Konzepte derzeit nur in Ausnahmefällen in der industriellen Praxis umgesetzt. Ein Beispiel ist das Forschungsprojekt „iReGear“, das in Zusammenarbeit des LKW-Herstellers Scania, des KTH Royal Institute of Technology und der Scandinavian Transmission Service AB realisiert wurde [7]. Die geringe Verbreitung derartiger Ansätze liegt vor allem darin begründet, dass die Produktentwicklung bislang primär auf die Neufertigung ausgerichtet ist und standardisierte Lösungen für Wiederverwendungs- und Aufarbeitungskonzepte weitgehend fehlen. Mit dem hier präsentierten Anwendungsfall (**Bild 11**) konnte exemplarisch ein innovativer Lösungsansatz entwickelt werden.

Tabelle 2 CO₂-Bilanz Lenkgetriebe mit „Repurpose“-Komponenten.

Komponente	Anzahl	CO ₂ -Footprint in kg	∑ CO ₂ -Footprint in kg
Gehäuse	1	15,41	15,41
Gehäusedeckel	1	4,02	4,02
Zahnstange	1	14,90	14,90
Spurstange	2	0,52	1,04
Ritzelwelle	1	1,81	1,81
Lenkwelle	1	0,92	0,92

38,10

Die ökologische Bewertung der Prozesskette erfolgte abschätzend durch die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks der betrachteten Kernkomponenten. Dabei zeigte sich eine Reduktion des CO₂-Emissionswertes um 8 % (Tabelle 2; Vergleichswerte in Tabelle 1). Die bisherige Berechnung stützt sich auf standardisierte Prozessschritte und die eingesetzten Materialmengen. Für eine weitergehende, unternehmensspezifische Bewertung ist eine detaillierte Bilanzierung sämtlicher Fertigungsschritte mit den dortigen Parametern unter Anwendung eines nach ISO 14067 und ISO 14064-1 zertifizierten Tools erforderlich.

Die Ergebnisse belegen die grundsätzliche Machbarkeit, geeignete Komponenten durch den Einsatz innovativer, modularer und flexibler Technologien wirtschaftlich zu demontieren, aufzubereiten und erneut in die industrielle Wertschöpfungskette einzubringen. Zukünftig kann eine an diese Anforderungen angepasste Produktgestaltung die Effizienz und Automatisierbarkeit von Demontageprozessen weiter erhöhen. Das Beispiel der Umnutzung von Zahnstangen aus verschlissenen Lenkgetrieben zu Spurstangen für nachfolgende Lenkgetriebegenerationen verdeutlicht das Potenzial dieses Ansatzes und liefert einen praxisnahen Beitrag zur Entwicklung hochwertiger, nachhaltiger Kreislaufmodelle für industrielle Bauteile und Materialien.

FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Programm „Zukunft der Wertschöpfung – Forschung zu Produktion, Dienstleistung und Arbeit“ (Förderkennzeichen 02J21E150) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

DANKSAGUNG

Die Konsortialpartner des Forschungsvorhabens, insbesondere das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz, bedanken sich bei der Robert Bosch Automotive Steering GmbH Schwäbisch Gmünd, für die zur Verfügung gestellten Demonstratoren (Lenkgetriebe) sowie den informellen Austausch und Einblick in die Fertigung von PKW-Lenkgetrieben.

Literatur

- [1] Pfeffer, P.; Harrer, M.: Lenkungshandbuch: Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2013
- [2] Hoffmann, M. et al.: Remanufacturing production planning and control: Conceptual framework for requirement definition. *Journal Remanufacturing* 15 (2025), pp. 97–126, doi. org/10.1007/s13243-025-00149-8
- [3] Fraunhofer IWU: Die Zukunft des Autorecyclings – Wiederverwendung statt Verschrottung. Stand: 2026. Internet: www.iwu.fraunhofer.de/de/projekte/die-zukunft-des-autorecyclings-wiederverwendung-statt-verschrottung.html. Zugriff am 19.03.2026
- [4] FRED GmbH: CO₂-Fußabdruck einfach berechnen. Homepage. Stand: 2026. Internet: www.fred-footprint.de/. Zugriff am 19.03.2026
- [5] Haase, R. et al: Dismantling and remanufacturing strategies in the automotive sector. *Procedia CIRP* 122 (2024), pp. 695–700
- [6] ISO 59004:2024-05: Circular economy – Terminology, principles and guidance for implementation (Kreislaufwirtschaft – Terminologie, Grundsätze und Leitfaden für die Umsetzung). Ausgabe 05-2024
- [7] Scania CV AB (publ): A world's first in sustainable truck manufacturing. Stand: 2026. Internet: www.scania.com/group/en/home/investors/annual-review/a-world-first-in-sustainable-truck-manufacturing.html. Zugriff am 19.03.2026

René Selbmann, M.Sc. 
rene.selbmann@iwu.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. (FH) Tibor Paizs

Rico Haase, M.Sc. 

Patrick Alexander Schmidt, M.Sc. 

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz
www.iwu.fraunhofer.de

Moritz Hoffmann
moritz.hoffmann3@bosch.com

Robert Bosch Automotive Steering GmbH
Richard-Bullinger-Str. 77, 73527 Schwäbisch Gmünd
www.bosch.com

Prof. Dr. Steffi Knorn 
knorn@tu-berlin.de

Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik
Fachgebiet Regelungstechnik
Technische Universität Berlin, Sekr. ER 2-1
Hardenbergstr. 36a, 10623 Berlin
www.tu-berlin.de

LIZENZ



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