

Forschungsberichte aus dem  
**wbk** Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Simon Mangold

**Automatisierte Demontage von  
Schraubverbindungen für das Remanufacturing**  
Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 297

Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze  
Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Simon Mangold geb. Rieß

**Automatisierte Demontage von  
Schraubverbindungen für das Remanufacturing**  
Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Band 297



**Automatisierte Demontage von  
Schraubverbindungen für das Remanufacturing**  
Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle

Zur Erlangung des akademischen Grades  
**Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
der KIT-Fakultät für Maschinenbau  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

angenommene  
**Dissertation**  
von

Simon Mangold geb. Rieß  
aus Bielefeld

Tag der mündlichen Prüfung: 06.06.2025  
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Korreferent: Univ. Prof. Dr.-Ing. Marco Huber

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2025

Copyright Shaker Verlag 2025

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

Print-ISBN	978-3-8191-0177-9
PDF-ISBN	978-3-8191-0255-4
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren  
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer, nachhaltiger und wirtschaftlicher Technologien stellt den entscheidenden Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen dar. Universitäten können als „Wertschöpfungspartner“ einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung von Produktionssystemen und -netzwerken. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger



## **Vorwort des Verfassers**

*Am Anfang wurde das Universum erschaffen. Das machte viele Leute sehr wütend und wurde allenthalben als Schritt in die falsche Richtung gesehen.* Das Zusammenleben in unserer modernen, vernetzten Gesellschaft ist nur denkbar durch das Fundament der Technologie in all ihren Formen. Aber der rasante technologische Fortschritt hat Konsequenzen. Wenn wir unsere Gesellschaft nicht nachhaltig transformieren und es uns nicht gelingt, die Kreislaufwirtschaft tatsächlich umzusetzen, nehmen wir uns selbst die Lebensgrundlage auf unserem Planeten.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Betreuung dieser Arbeit. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Marco Huber für die Übernahme des Korreferats sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk danke ich für die freundschaftliche und gleichzeitig professionelle Zusammenarbeit. Mein Dank gilt auch dem Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS), welches meinen Auslandsaufenthalt gefördert hat. Ebenso danke ich den Kollegen des IDEKO Research Centers für den herzlichen Empfang und die bereichernde Ergänzung meiner Forschungsarbeit.

Mein größter Dank gebührt schließlich meiner Frau und meiner Familie, ohne deren bedingungslose Unterstützung, Verständnis und Motivation diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Öhringen, im Juli 2025

Simon Mangold



## Kurzfassung

Die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung erfordern einen Paradigmenwechsel in der Industrie hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Unter den verschiedenen Strategien zur Erreichung der ökologischen Nachhaltigkeit tritt das Remanufacturing (*Wiederaufbereitung*) als aussichtsreiche Möglichkeit auf. Der Produktionstechnik kommt dabei eine Schlüsselrolle für die erfolgreiche Umsetzung zu. Nach dem derzeitigen Stand der Technik werden Remanufacturing-Anwendungen häufig manuell in Niedriglohnländern umgesetzt, da die Automatisierung der Prozesskette technologisch schwierig ist. Mit der zukünftig erwarteten Zunahme der wiederaufbereiteten Güter, angetrieben durch das wachsende Umweltbewusstsein bei den Verbrauchern und durch gesetzliche Vorschriften, wird die Automatisierung jedoch unerlässlich. Remanufacturing umfasst die Zerlegung in Komponenten, wobei das Lösen von Schraubverbindungen zu den häufigsten Demontageschritten gehört. Die Automatisierung der Demontage ist unter anderem aufgrund der Abnutzungserscheinungen von Produkten und Verbindungen am Ende ihres Lebenszyklus eine besondere Herausforderung. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Problematik von Prozessfehlern bei der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen, wobei eine modellbasierte Bewertung des Zustands der Verbindung verwendet wird, um den Erfolg des Demontageprozesses abzubilden.

Der Ansatz zur Erreichung dieses Ziels basiert auf vier Bausteinen: (1) Es werden Prozessmodelle für die automatisierte Demontage von Schrauben entwickelt und für die Anwendung in der Automatisierungstechnik befähigt. (2) Es wird systematisch eine Demontagezelle für die automatisierte Demontage von Elektromotoren aus dem automobilen Sektor konzipiert. (3) Es wird ein geeignetes Steuerungssystem implementiert, das die abgeleiteten Prozessmodelle zur Erhöhung der Erfolgsquote der Demontage nutzt. (4) Die Validierung des Ansatzes erfolgt durch experimentelle Testreihen.

Die Ergebnisse umfassen Methoden und Modelle zur a-priori-Bewertung des Demontageerfolges von Schraubverbindungen, wobei sich die Anwendung des Ansatzes als vielversprechend erweist. Die Anwendung der Prozessmodelle erfordert eine Vielzahl an Produkt- und Zustandsinformationen, die von der Verbindung erfasst werden müssen, weshalb die Modelle in der vorliegenden Arbeit an geeigneten Stellen vereinfacht werden. Zur Generierung dieser Informationen werden visuelle Methoden erfolgreich umgesetzt.

## Abstract

The 17 Sustainable Development Goals entail a paradigm shift in the industrial landscape towards a circular economy. Remanufacturing emerges as prominent application among the different strategies for environmental sustainability. Production technology holds a pivotal role to the successful implementation of this strategy. In the current state of the art, remanufacturing applications are often conducted manually in low-wage countries due to the challenges of automating the remanufacturing process chain. However, with an expected increase in remanufactured goods in future, driven by growing environmental awareness among consumers and legislative regulations, automation will become essential. The remanufacturing process chain includes disassembly into components, with the detaching of threaded connections being among the most frequent disassembly steps. Yet, the automation of disassembly is especially challenging due to the wear and tear on products and connections at the end of their lifecycle. Processed parts and connections are of individual conditions when fed back to the remanufacturing process chain.

This work addresses the issue of process failures in the automated disassembly of threaded connections, which have been subject to wear and tear throughout their lifecycle. A model-based evaluation of the connection's state is used to predict the success of the disassembly process.

The approach to achieve this goal is based on four building blocks: (1) Process models for the automated disassembly of bolts are developed and enabled for application in automation technology by information representation techniques; (2) A disassembly cell for the automated disassembly of supplementary motors in automobiles is systematically developed with special focus on robot tools; (3) A suitable control system is implemented, which uses the derived process models to increase the success rate of disassembly; (4) The validation of the approach is carried out through experimental test series.

Results include methods and models for the a priori evaluation of the success of disassembly of threaded connections, with the application of the approach proving to be promising. Vision-based methods for generating product and condition information are successfully implemented. However, the detailing of the process models requires a large amount of sensor technology, and thus the models are simplified in appropriate aspects in this work.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Stand von Forschung und Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Terminologie und Definitionen	5
2.2 Industrielle Praxis des Remanufacturing	6
2.3 Charakterisierung der automatisierten zerstörungsfreien Demontage von Schraubverbindungen	8
2.4 Flexible Endeffektoren für die automatisierte Demontage von Schraubverbindungen	13
2.5 Bildverarbeitung für die Erkennung und Zustandsbewertung von Schraubverbindungen	21
2.6 Informationsmodellierung für die automatisierte Demontage	30
2.7 Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage	34
2.8 Bewertung des Standes von Forschung und Technik	36
2.8.1 Fazit zum Stand von Forschung und Technik	36
2.8.2 Zusammenfassung der Forschungsdefizite und Lösungsansätze	40
<b>3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>41</b>
3.1 Präzisierung der Zielsetzung	41
3.2 Vorgehensweise zur Zielerreichung	43
<b>4 Prozessmodelle für die Schraubendemontage</b>	<b>45</b>
4.1 Ableitung der charakteristischen Prozessgrößen	45
4.2 Modellbildung	50
4.2.1 Losdrehmoment	50
4.2.2 Abschermoment	69

---

4.3	Laufzeitmodelle mittels Beschreibungsformat	74
4.4	Validierung der Modelle	77
4.4.1	Losdrehmoment	77
4.4.2	Abschermoment	81
<b>5</b>	<b>Konzeption einer Demontagezelle für das Remanufacturing</b>	<b>88</b>
5.1	Systemabgrenzung und Anwendungsfelder	88
5.2	Analyse der Anforderungen	91
5.3	Identifikation von Hauptfunktionen	92
5.4	Gliederung und Erarbeitung von realisierbaren Modulen	93
5.5	Gestaltung der Module	95
5.5.1	Gestaltung des Endeffektormoduls	95
5.5.2	Gestaltung des Bildverarbeitungsmoduls	102
5.5.3	Gestaltung des Steuerungsmoduls zur systemtechnischen Integration	108
<b>6</b>	<b>Realisierung der roboterbasierten Demontagezelle</b>	<b>111</b>
6.1	Realisierung des Gesamtaufbaus	111
6.2	Realisierung der Teilmodule	113
6.2.1	Realisierung des Endeffektormoduls	113
6.2.2	Realisierung des Bildverarbeitungsmoduls	115
6.2.3	Realisierung des Steuerungsmoduls	117
<b>7</b>	<b>Funktionsnachweis des Konzepts</b>	<b>120</b>
7.1	Validierung des mechatronischen Aufbaus der automatisierten Demontagezelle	120
7.2	Prädiktive Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage	124
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>127</b>
8.1	Zusammenfassung	127
8.2	Ausblick	129
	<b>Publikationsliste</b>	<b>131</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>133</b>

---

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XII</b>
<b>Anhang</b>	<b>XIII</b>

## Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
Adam	Adaptive Momentabschätzung (engl. <i>Adaptive Moment Estimation</i> )
AGV	Fahrerloses Transportsystem (engl. <i>Automated Guided Vehicle</i> , AGV)
AP	Durchschnittliche Genauigkeit (engl. <i>Average Precision</i> )
CAD	Computer-aided design
CNN	Faltendes neuronales Netzwerk (engl. <i>Convolutional Neural Network</i> )
DCNN	Tiefes faltendes neuronales Netzwerk (engl. <i>Deep Convolutional Neural Network</i> )
EoL	Lebensende (engl. <i>End of Life</i> )
HF	Hauptfunktion
HSV	HSV-Farbraum (engl. <i>Hue Saturation Value</i> )
JSON	JavaScript Object Notation
Kfz	Kraftfahrzeug
LCD	Flüssigkristallanzeige (engl. <i>Liquid Crystal Display</i> )
mAP	Mittlere durchschnittliche Genauigkeit (engl. <i>Mean Average Precision</i> )
MPC	Modellprädiktive Regelung (engl. <i>Model Predictive Control</i> )
OEE	Gesamtanlageneffektivität (engl. <i>Overall Equipment Effectiveness</i> )
OEM	Erstausrüster (engl. <i>Original Equipment Manufacturer</i> )
R-CNN	Regionen-basiertes faltendes neuronales Netzwerk (engl. <i>Region Based Convolutional Neural Network</i> )
RDF	Resource Description Framework
RGB	Rot-, Grün- und Blau-Farbraum
RGBD	RGB-Farbraum mit Tiefeninformationen (engl. <i>Red Green Blue Depth</i> )
RL	Bestärkendes Lernen (engl. <i>Reinforcement Learning</i> )
ROS	Robot Operating System
RTDE	Real-Time Data Exchange Protocol
SFB	Sonderforschungsbereich
SGD	Stochastisches Gradientenverfahren (engl. <i>Stochastic Gradient Descent</i> )
SSD	Einbild Multibox Detektor (engl. <i>Single Shot Multibox Detector</i> )
SysML	Systems Modeling Language

---

TCP	Koordinatensystem am Endeffektor (engl. <i>Tool Center Point</i> )
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
xMCF	Extended master connection file
XML	Extensible Markup Language
YOLO	You Only Look Once

---



## Formelzeichen

Symbol <sup>1</sup>	Größe	Einheit
$d$	Durchmesser der Welle	mm
$d_2$	Flankendurchmesser im Gewinde	mm
$d_3$	Kerndurchmesser im Gewinde	mm
$d_{di}$	Idealdurchmesser der Scherfläche	mm
$d_K$	Durchmesser der effektiven Reibfläche in der Kopfauflage	mm
$e$	Außendurchmesser des Schraubenkopfes	mm
$f_B$	Umrechnungsfaktor	-
$F_H$	Lateralkraft	N
$F_N$	Normalkraft	N
$\overline{F_{VM}}$	Um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft	N
$h$	Flankentiefe des Schraubenkopfes	mm
$k_{ph}$	Korrekturfaktor	-
$m$	Stichprobengröße	-
$M$	Drehmoment	Nm
$M_F$	Maximales Moment beim Flankenscheren	Nm
$M_G$	Gewindemoment	Nm
$M_L$	Losdrehmoment oder Lösemoment	Nm
$M_Q$	Maximales Moment beim Querschnittsscheren	Nm
$M_{RA}$	Reibungsmoment an der Kopfauflage	Nm
$M_T$	Torsionsmoment	Nm
$n$	Spindeldrehzahl	1/s
$R_m$	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$t$	Zeit	s
$W_t$	Widerstandsmoment gegen Torsion	mm <sup>3</sup>
$\alpha$	Öffnungswinkel Kraftangriffsmerkmal	°
$\beta$	Öffnungswinkel Kraftangriffsmerkmal	°

<sup>1</sup> Geordnet in alphabetischer Reihenfolge und aufgenommen bei wiederholter Erscheinung über den Textverlauf

---

$\varepsilon$	Relativer Korrosionsgrad	%
$\mu_K$	Reibungszahl in der Kopfauf­lage­fläche	-
$\mu_G$	Reibungszahl im Gewinde	-
$\varrho'$	Reibungswinkel im Gewinde	°
$\tau_{tB}$	Torsionsfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
$\tau_{max}$	Maximale Torsionsschubspannung	N/mm <sup>2</sup>
$\varphi$	Steigungswinkel im Gewinde	°

---



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Mit dem Europäischen Grünen Deal, der Wachstumsstrategie der Europäischen Union, wird unter anderem das ehrgeizige Ziel verfolgt, im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen und das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung zu entkoppeln (European Commission, Directorate-General for Communication, 2019). Dazu ist angesichts steigender Ressourcenbedarfe und wachsender Bevölkerungszahlen eine Transformation der Industrie zur sogenannten Kreislaufwirtschaft erforderlich. Bei dieser folgen die produzierten Güter nicht dem Muster der Wegwerf-Gesellschaft, in der entnommen, produziert, verbraucht und weggeworfen wird (engl. *Take-Make-Use-Dispose*). Vielmehr behalten die produzierten Güter in kaskadierten Nutzungsphasen einen zirkulären Umlauf (vgl. Abbildung 1-1).

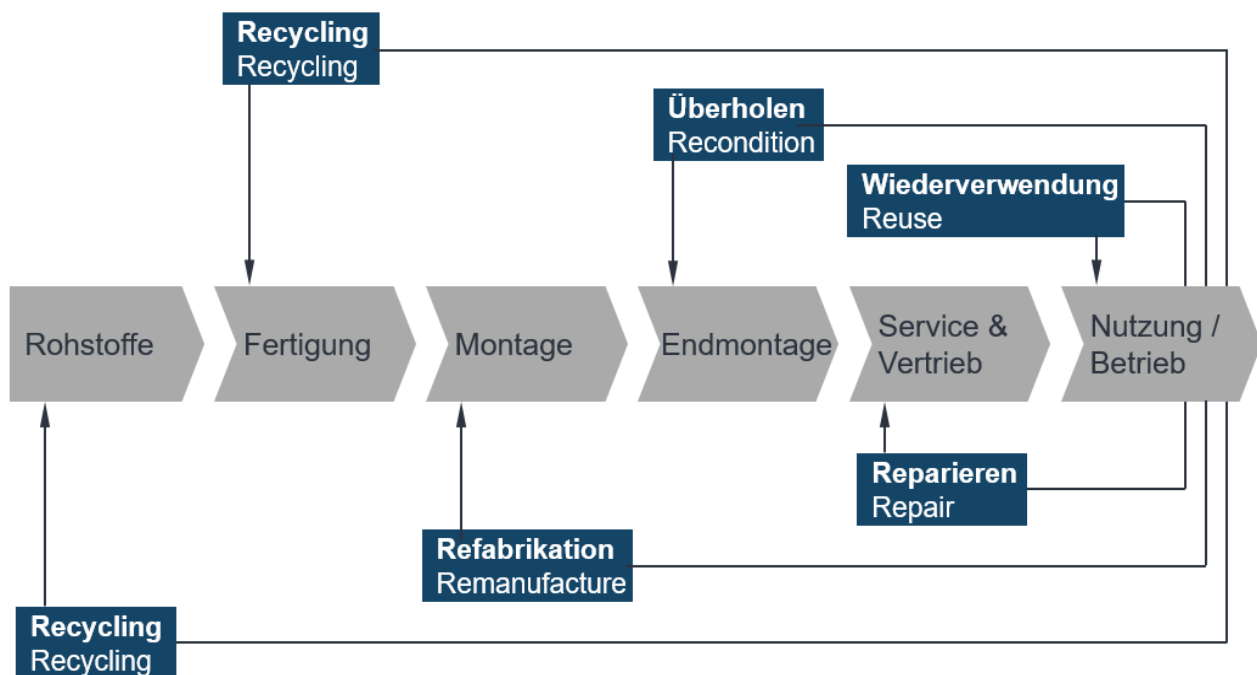
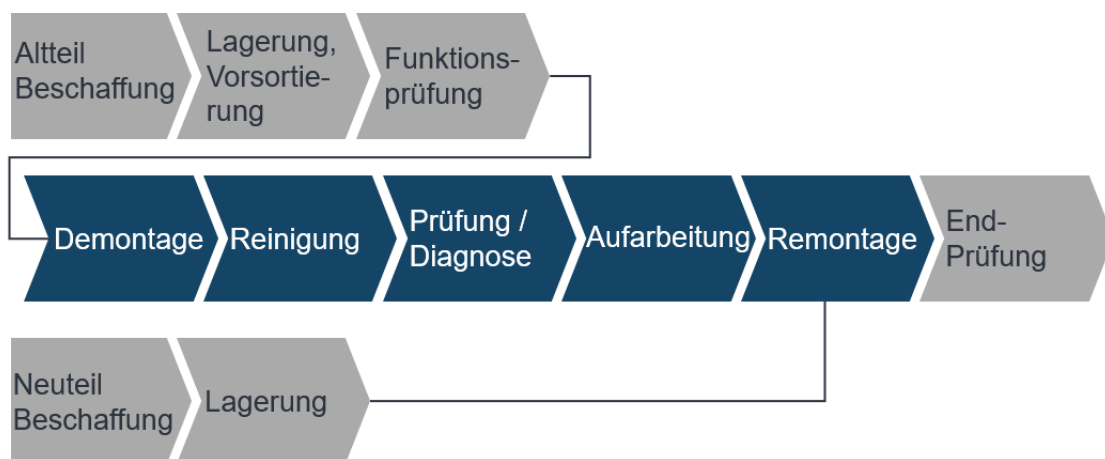


Abbildung 1-1: Geschlossener Lebenszyklus (eigene Darstellung in Anlehnung an (Parker et al., 2015))

Zunehmende Bedeutung in der Produktionstechnik gewinnt in diesem Zusammenhang das Remanufacturing, zu Deutsch *Refabrikation*. Dieses wird allgemein verstanden als „Behandlung zur Wiederverwendung eines gebrauchten Produkts, das durch verschiedene Prozessschritte auf mindestens das Qualitätsniveau eines Neuprodukts gebracht

wird“ (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016, S. 133). Remanufacturing wird bereits heute in einigen ausgewählten Anwendungsfällen wirtschaftlich betrieben. Vor dem Hintergrund der Wachstumsstrategie der Europäischen Union ist zukünftig mit legislativen Verordnungen zu rechnen, die eine zunehmende Anzahl an Remanufacturing-Anwendungen mit sich bringen werden. Folglich wird ein gesteigerter Automatisierungsgrad für eine wirtschaftliche Umsetzung in Hochlohnländern erforderlich.

Im Remanufacturing werden die verarbeiteten Altteile als *Cores* bezeichnet. Genauer handelt es sich bei einem Core um ein „zuvor verkauftes, verschlissenes oder nicht mehr funktionsfähiges Produkt oder Teil, das für den Wiederaufbereitungsprozess bestimmt ist. Während der Rückwärtslogistik wird ein Core geschützt, gehandhabt und für die Wiederaufarbeitung gekennzeichnet, um Schäden zu vermeiden und seinen Wert zu erhalten. Ein Core ist kein Abfall oder Schrott und ist nicht dazu bestimmt, vor der Wiederaufarbeitung wiederverwendet zu werden“ (Automotive Parts Remanufacturers Association, 2016, S. 2, Übersetzung des Autors). In Abbildung 1-2 ist die typische Prozesskette des Remanufacturing schematisch dargestellt.



*Abbildung 1-2: Prozesskette des Remanufacturing (eigene Darstellung in Anlehnung an (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2017))*

Nach einer eingehenden Funktionsprüfung beginnen die Hauptprozesse des Remanufacturing. Dabei werden die Baugruppen zunächst bis zu einem bestimmten Grad demontiert, der unter anderem von der Produktfamilie, der Einsatzumgebung und der Werteverteilung abhängt. Im Anschluss werden die so erhaltenen Komponenten gerei-

nigt und geprüft. Wenn es erforderlich ist, findet eine Aufarbeitung statt und die Komponenten werden mit Neuteilen zu Baugruppen montiert. Diese werden nach einer Endprüfung in ihren folgenden Lebenszyklus gegeben. Der Demontagevorgang ist damit maßgeblich für den Erfolg beim Remanufacturing und es kommt ihm eine Schlüsselrolle zu. Wenn der Demontageprozess fehlschlägt, wird eine aufwendige Nacharbeit erforderlich und die Gesamtanlageneffektivität (engl. *Overall Equipment Effectiveness, OEE*) wird negativ beeinflusst. Sowohl bei Cores mit hohem Materialwert und geringen Stückzahlen als auch bei Cores mit weniger Materialwert und höheren Stückzahlen wirken sich Prozessfehlschläge bei der Demontage negativ auf die OEE aus. Zusätzlich ist auch der mögliche Werterhalt der Komponenten abhängig von dem Demontagevorgang. Mit einem technisch sinnvollen Demontagegrad, dem Maß zur Beschreibung der Granularität der Demontage, können energetische und finanzielle Vorteile erreicht werden. Im Zuge des Demontagevorgangs werden die Verbindungen in Mehrkörpersystemen (Baugruppen) aufgelöst und die einzelnen Baugruppen der Cores vereinzelt. Im Bereich der Verbindungstechnik gibt es viele standardisierte Elemente, darunter auch Schraubverbindungen. Untersuchungen zur Häufigkeit der Verwendung von gewindebasierten Verbindungselementen geben Größenordnungen von etwa 40 bis 70 Prozent aller Verbindungen an (Apley et al., 1998; Kahmeyer, 1995; Kraemer, 2019; Pham, 2017; Rebafka, 2003; Roth, 1996). So zeigen auch Untersuchungen zur Verteilung der Demontageoperationen den wesentlichen Anteil (ca. 40 %) von Entschraubprozessen auf (Laili et al., 2022, S. 13). Die Schraubverbindung ist heutzutage eine weitverbreitete Verbindungstechnologie und wird ihre elementare Rolle auch in zukünftigen Anwendungen beibehalten, vgl. (Al Assadi et al., 2023). Grundsätzlich handelt es sich bei Schraubverbindungen um wieder lösbare Verbindungen. Die Einflüsse während des Lebenszyklus, wie sie bei der Demontage für das Remanufacturing auftreten, wirken sich allerdings auf das Löseverhalten aus. Korrosion, Verschmutzung, mechanische Stoßbelastungen etc. können einen großen Einfluss auf die auftretenden Losdrehmomente während der Demontage haben. Während das Verhalten und die Wirkzusammenhänge bei der Montage und in der Betriebsphase von Schraubverbindungen weitestgehend bekannt sind, bestehen bei der Demontage teilweise unbekannte und nicht erforschte Wirkzusammenhänge.

Die vorliegende Arbeit adressiert das Problem der Prozessfehlschläge in der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen, deren technische Eigenschaften sich im

Lebenszyklus verändert haben. Es wird das Potential analysiert, welches von der Integration mathematischer Modelle zum Demontage-Verhalten von Schraubverbindungen zur Steigerung der Robustheit bei anpassungsfähigen Demontagesystemen ausgeht. Wo erforderlich, werden neue Modelle erarbeitet und Wirkzusammenhänge erforscht. Zur Anwendung dieser Modelle wird eine automatisierte Produktionsanlage konzipiert und umgesetzt, die eine ausgewählte Beispielproduktfamilie aus der Automobilbranche demontieren kann.

## **1.2 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in acht Kapitel. Zunächst wird in Kapitel 2 der allgemeine Stand von Forschung und Technik zur industriellen Praxis des Remanufacturing mit einem Fokus auf der Charakterisierung der Demontage beschrieben. Anhand der Betrachtung von zentralen Forschungsbeiträgen zur roboterbasierten Demontage wird der Forschungsbedarf abgeleitet. In Kapitel 3 wird die Zielsetzung der Arbeit präzisiert und die Vorgehensweise zur Zielerreichung beschrieben. Im Sinne einer prädiktiven Prozesssteuerung zur Steigerung der Robustheit der Demontage werden im vierten Kapitel Prozessmodelle für die Schraubendemontage hergeleitet und in praktischen Versuchsreihen validiert. Auf Basis eines integrierten Informationsmodells findet eine Anwendung in der Automatisierungstechnik statt. Das folgende Kapitel 5 widmet sich der Konzeption einer Demontagezelle für das Remanufacturing. Dazu werden Anforderungen auf Basis der zuvor herausgearbeiteten Kenngrößen abgeleitet. In diesem Kapitel findet ebenfalls die Beschreibung der Systemgrenzen und der Anwendungsfelder der Anlagentechnik statt. Das folgende Kapitel 6 beschreibt die physikalische Umsetzung und die Inbetriebnahme der konzipierten Demontagezelle. Kapitel 7 erbringt schließlich den Funktionsnachweis des Konzepts und stellt mithilfe von Referenzgrößen die wesentlichen Beiträge der Arbeit heraus. Kapitel 8 fasst die Arbeit zusammen, gibt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse und schließt mit einem Ausblick auf ergänzende Forschungsfragen.

## 2 Stand von Forschung und Technik

### 2.1 Terminologie und Definitionen

Unter der Demontage wird nach VDI-Richtlinie 2243 die „Gesamtheit aller Vorgänge, die der Vereinzelung von Mehrkörpersystemen zu Baugruppen, Bauteilen und/oder formlosem Stoff durch Trennen dienen“ verstanden (VDI 2243). Das Fertigungsverfahren *Trennen* ist nach DIN 8580 definiert als „Fertigen durch Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern [...], wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird“ (DIN 8580). Für dieses *Aufheben des Zusammenhaltens von Körpern* wird die Struktur einer Baugruppe als ein Zusammenschluss aus *Komponenten* und *Verbindungselementen* verstanden, welcher bei der Demontage aufgelöst wird (Lambert & Gupta, 2005; Vongbunyong & Chen, 2015). Die Demontage verfolgt im engeren Sinne das Ziel, die Verbindung von mindestens zwei geometrisch bestimmten Körpern aufzulösen.

Für die automatisierte Demontage sind hauptsächlich die Verfahren Zerlegen, Zerteilen und Spanen bestimmend. Beim Zerlegen nach DIN 8591 wird die zerstörungsfreie Demontage beschrieben als das „Trennen von zuvor gefügten Werkstücken [...], wobei keine Beschädigung der Werkstücke auftreten darf“. Auch das *Abschrauben* wird als Fertigungsverfahren in der DIN 8591 aufgeführt (DIN 8591). Im Gegensatz dazu ist das Fertigungsverfahren *Zerteilen* zu sehen, welches in der DIN 8588 als „Mechanisches Trennen von Werkstücken ohne Entstehen von formlosem Stoff, also auch ohne Späne“ angeführt wird (DIN 8588). Gemeinsam mit dem Fertigungsverfahren *Spanen*, nach DIN 8589 als „Trennen, bei dem durch die Schneiden eines Werkzeuges von einem Werkstück Werkstoffschichten in Form von Spänen auf mechanischem Wege abgetrennt werden“ definiert, wird somit die zerstörende Demontage beschrieben (DIN 8589-0). Im allgemeinen Verständnis der Ingenieurspraxis lassen sich darüber hinaus die Nebenfunktionen *Handhaben* und *Kontrollieren* der Demontage zuordnen (VDI 2860).

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird für die in der Demontage angewendeten Prozesse der zusammenfassende Begriff der *Demontageaufgabe* verwendet. Darunter wird im Speziellen ein zu demontierender physischer Core mitsamt der zugehörigen digitalen Produkt- und Prozessbeschreibung verstanden.



## 2.2 Industrielle Praxis des Remanufacturing

Der wirtschaftliche Betrieb von Remanufacturing-Anwendungen findet in der industriellen Praxis derzeit nur in ausgewählten Anwendungsfällen und in kleinen bis mittelgroßen Serien statt. Aufgrund geringer Automatisierungsgrade wird Remanufacturing häufig in Billiglohnländern mit teilweisen Abstrichen der Arbeitssicherheit betrieben (Ellen Macarthur foundation, 2015; Priyono et al., 2016). Den wirtschaftlich stärksten Anteil an Remanufacturing-Anwendungen macht die Luftfahrtbranche aus. Dort werden teure Investitionsgüter, wie Flugzeugturbinen, durch Refabrikation aufbereitet. Es handelt sich also um Anwendungen mit geringen Stückzahlen und dafür größeren Wertsteigerungen. Den zweitstärksten Anteil an Remanufacturing-Anwendungen weist der automobiler Sektor auf. Im Gegensatz zur Luftfahrtbranche werden hier meist größere Stückzahlen mit geringeren Wertsteigerungen verarbeitet (Parker & Robinson, 2015). Im automobilen Sektor treten unterschiedliche Akteure im Remanufacturing auf. Einerseits gibt es unabhängige Betriebe, die Remanufacturing als Geschäftsmodell betreiben, das heißt Entsorgungsunternehmen oder Recycler. Andererseits wenden auch Hersteller und Erstausrüster, sogenannte Original Equipment Manufacturer (*OEM*), Remanufacturing an (Parker et al., 2015). Als Beispiele für Remanufacturing-Anwendungen im automobilen Sektor lassen sich elektrische Startermotoren für Verbrennungsmotoren und Lichtmaschinen (auch *Generatoren* genannt) aufzeigen. Weitere Beispiele sind aufbereitete Bremssysteme<sup>2</sup> und generalüberholte Motoren. Bei diesen Produkten können Komponenten, die wenig bis keinen mechanischen Verschleiß haben, in einem weiteren Lebenszyklus eingesetzt werden. So lassen sich beispielsweise bei elektrischen Startermotoren der Rotor und das Gehäuse wiederverwenden. Verschleißkomponenten wie Lager und Kohlebürsten werden durch neue Komponenten ersetzt. Ein OEM, der selbst Remanufacturing an seinen Komponenten durchführt, ist die Firma Bosch Rexroth AG mit dem eXchange-Programm<sup>3</sup>. Für dieses Programm können Startermotoren unter Einhaltung definierter Rücknahmekriterien zurück an den Hersteller gesendet werden. Die Cores werden gesammelt und an zertifizierte Werke geschickt. Dort findet eine manuelle Demontage statt und die Cores durchlaufen teilautomatisiert die

---

<sup>2</sup> Knorr-Bremse (2021), *Genuine Remanufacturing im Detail*. [www.knorr-bremsecvs.com/remancaliper](http://www.knorr-bremsecvs.com/remancaliper) [19.07.2025]

<sup>3</sup> Bosch (2020), *Bosch eXchange Zeitwertgerechte Reparatur*. <https://www.boschaftermarket.com/de/de/services/programme/bosch-exchange> [19.07.2025]

Remanufacturing-Prozesskette. Beim erneuten Inverkehrbringen wird die Garantie verlängert und durch finanzielle Vergünstigungen werden Kaufanreize geschaffen. Als exemplarische unabhängige Unternehmen seien das dänische Unternehmen BORG Automotive A/S<sup>4</sup> sowie die Alec GmbH genannt<sup>5</sup>. Durch die Markenunabhängigkeit werden von unabhängigen Unternehmen größere Produktspektren als bei einem OEM verarbeitet. Allerdings stellt die Datenlage bezüglich Produktinformationen zu den aufbereiteten Produkten eine Herausforderung dar. Bei unabhängigen Unternehmen liegen oft nur wenige bis keine Informationen bezüglich der Originalteile vor. OEM-Betriebe haben zwar in der Regel Zugriff auf die Konstruktions- und Montagedaten der Originalteile, erhalten jedoch ebenso wie unabhängige Unternehmen kaum Informationen über den Lebenszyklus der Cores. Zudem lassen sich nicht alle für die Automatisierung der Demontage erforderlichen Informationen aus den Konstruktionsdaten ableiten. Zum Beispiel können stoffschlüssige Verbindungen nicht immer anhand der Konstruktionsdaten (engl. *computer-aided design*, *CAD-Daten*) extrahiert werden. Daher gibt es derzeit Bemühungen, ein digitales Informationsmodell für die Anwendung im Remanufacturing zu entwickeln, welches während des Betriebs aktualisiert wird (Plociennik et al., 2022; Wilde et al., 2022).

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass bereits eine industriell etablierte Remanufacturing-Prozesskette existiert, welche sich auf die manuelle Demontage stützt. Bei dieser reagiert der Mensch auf Produktzustände und die Eigenschaften der Verbindungselemente, indem die Prozessgrößen bei der Demontage angepasst werden. Die Automatisierung der Demontage ist technisch schwierig, bietet aber das Potenzial, die Remanufacturing-Prozesskette flächendeckend und auch in Hochlohnländern wie Deutschland einzusetzen. Durch die häufige Wiederholung der Entschraubprozesse ist das automatisierte Entschrauben als eine Schlüsselfähigkeit zu betrachten.

---

<sup>4</sup> BORG Automotive A/S (2023), Über die BORG Automotive Gruppe. <https://borgautomotive-group.com/about-us> [19.07.2025]

<sup>5</sup> Alec GmbH (2022), First robotised electronic remanufacturing plant. <https://www.alec-electronics.de> [19.07.2025]

## 2.3 Charakterisierung der automatisierten zerstörungsfreien Demontage von Schraubverbindungen

Einer Automatisierung der Demontage stehen wesentlich ungünstigere Randbedingungen entgegen als einer Automatisierung der Montage. Während bei Montageanwendungen die für die Automatisierung relevanten Eigenschaften der verarbeiteten Produkte genau spezifiziert sind, haben die verarbeiteten Komponenten und Produkte in der Demontage bereits die Lebensphase Betrieb durchlaufen und die für die Automatisierung relevanten Eigenschaften können sich verändert haben. Durch die individuellen Veränderungen pro Produkt und Komponente während der Betriebsphase muss eine automatisierte Produktionsanlage in der Demontage individuell auf den Zustand der bearbeiteten Produkte und Komponenten reagieren. Ein charakteristisches Beispiel sind geometrische Merkmale, welche bei der automatisierten Montage zur Bestimmung des Ordnungszustandes verwendet werden. Diese geometrischen Merkmale können in der Lebensphase Betrieb verloren gehen und sind unter Umständen nicht in der automatisierten Demontage anwendbar. Weitere wesentliche Unterschiede zwischen Montage- und Demontageanwendungen sowie deren Anforderungen an automatisierte Produktionsanlagen lassen sich durch folgende Merkmale erläutern:

- Physikalische Veränderungen der Verbindungselemente, zum Beispiel Korrosion, Verschmutzung und selbstständiges Schraubenlösen verändern deren Löseverhalten (Seelig et al., 2019).
- Nicht dokumentierte Veränderungen an der Verbindungstechnik, zum Beispiel durch Austausch oder Reparatur, erfordern eine aufwendige Sensorik und wandlungsfähige Aktorik (Peeters et al., 2021).
- Häufig sind Produkte vorrangig montagegerecht konstruiert, sodass die nachteilige Konstruktion für die Demontage die Komplexität der Aufgabe erhöht. Dabei werden teilweise Funktionsprinzipien verwendet, welche zu Lasten der Demonzierbarkeit gehen. Zum Beispiel werden formschlüssige Verbindungen verwendet, welche sich nur schwer wieder lösen lassen wie Steckverbinder (Meng et al., 2022).
- Schwer einschätzbare Rückläuferquoten und damit schwankende Stückzahlen erfordern eine Volumen Anpassung (Parker et al., 2015; Tolio et al., 2017).
- Die mögliche große Anzahl an Varianten von einzelnen Produktfamilien benötigt eine hohe Anpassungsfähigkeit des Produktionssystems (Foo et al., 2021a).

- Aufgrund einer unterschiedlichen Demontagereihenfolge gegenüber der Montage können Montagevorranggraphen nicht immer auf die Demontage angewendet werden. (Priyono et al., 2016)
- Die wirtschaftliche Konkurrenzsituation der aufbereiteten Erzeugnisse mit neu produzierten Gütern setzt einen effizienten Betrieb voraus. (Härtwig, 2005)

Von automatisierten Produktionsanlagen in der Demontage wird daher insgesamt, im Vergleich zur Montage, eine höhere *Anpassungsfähigkeit an die individuellen Produkteigenschaften* gefordert. Angelehnt an die Arbeit von A. Braunschweig wird diese im Kontext der vorliegenden Arbeit verstanden als die „Anpassungsfähigkeit der Gesamtanlage an Funktionsparameter, sowie Struktur- und Zustandsparameter der Demontageobjekte“ (Braunschweig, 2002, S. 65). Allgemeiner formuliert lässt sich festhalten, dass aus einer Umkehrung der automatisierten Montage nicht einfach auf eine automatisierte Demontage geschlossen werden kann. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der technischen Realisierung einer zuverlässigen Demontagezelle. Arbeiten zum Thema der Demontage-Sequenzplanung werden daher bewusst nicht in die Betrachtung des Standes von Forschung und Technik eingeschlossen. Mit dem gleichen Argument wird auch der Forschungsbereich der Line-Balancing-Probleme bewusst nicht betrachtet.

Für automatisierte Produktionsanlagen in Demontageanwendungen stellt die Anpassungsfähigkeit somit große Ansprüche an die Sensorik, Aktorik und Steuerungstechnik. Mithilfe der verwendeten Sensorik gewinnt die automatisierte Produktionsanlage Informationen zu den Produkten und Komponenten und organisiert diese in entsprechenden Modellstrukturen. Diese Aufgabe wird allgemein als *Perzeption* bezeichnet. Für die technische Umsetzung von Modellen zur Abbildung der physikalischen Eigenschaften von Produkt, Komponenten und Verbindungselementen sowie der charakteristischen Prozessgrößen, sind bestimmte Arten der Informationsdarstellung erforderlich. Zur Informationsgewinnung werden im aktuellen Stand von Forschung und Technik üblicherweise bildverarbeitende Systeme als Sensorsysteme eingesetzt. Zu den wesentlichen Vorteilen dieser Systeme zählt die hohe Flexibilität gegenüber Positionierungsfehlern. Mit bildverarbeitenden Systemen können zum Beispiel die Wirkflächen an den zu demontierenden Produkten oder Komponenten für die (Demontage-)Prozesse einzeln

klassifiziert und lokalisiert werden und die Produktionsanlage kann entsprechend reagieren. Durch diese Echtzeitdaten wird die automatisierte Produktionsanlage unabhängiger von den vorausgehenden Spezifikationen der Produkte (Bigorra, 2020, S. 10). Auch die Aktorik muss den Ansprüchen der Flexibilität genügen. Flexible Roboterkinematiken haben sich in der automatisierten Demontage als Wirkelemente gegenüber Transferstraßen etabliert (Vongbunyong & Chen, 2015, S. 6). Um im wirtschaftlichen Vergleich mit montierten Neuprodukten wettbewerbsfähig zu bleiben, wird typischerweise auf eine technologische Neuentwicklung der Roboterkinematik verzichtet. Stattdessen wird auf industrielle 6-Achs-Knickarm Robotertechnik zurückgegriffen.

Bei der Demontage lassen sich sowohl die Verbindungen (*Verbindungselemente*) lösen, als auch die Fügepartner (*Bauteile*) an geeigneten Stellen trennen. Dies kann jeweils zerstörend oder zerstörungsfrei durchgeführt werden. Damit ergeben sich vier mögliche Zustände, welche in Abbildung 2-1 am Beispiel der Demontage einer Schraubverbindung skizziert sind. Man spricht von einer *zerstörungsfreien Demontage*, wenn weder Fügepartner noch Verbindungselement bei der Demontage zerstört werden. Es handelt sich in diesem Fall um das Auftrennen von lösbaren Verbindungen. Alle anderen Demontagearten werden als *teilweise zerstörende Demontage* oder *zerstörende Demontage* bezeichnet, bei denen nicht lösbare Verbindungen getrennt werden (DIN 8593-0).

Die Auswahl der Demontageart muss unter Berücksichtigung des Anwendungsfalles, des Produktzustandes und der Beschaffenheit der Verbindungselemente erfolgen. Es gilt das energetische und finanzielle Optimum mittels der Granularität der Demontage einzustellen. Bei der vollständigen Zerlegung von Produkten bestehen die Demontageprozesse in der Regel aus einer Kombination zerstörungsfreier und zerstörender Trennverfahren, bei denen nur ausgewählte, wirtschaftlich nutzbare oder toxische Werkstoffe, Bauteile und Baugruppen eines Produktes separiert werden. Die verbleibenden Materialien werden verfahrenstechnischen Prozessen zugeführt (Bender & Göhlich, 2020, S. 991).

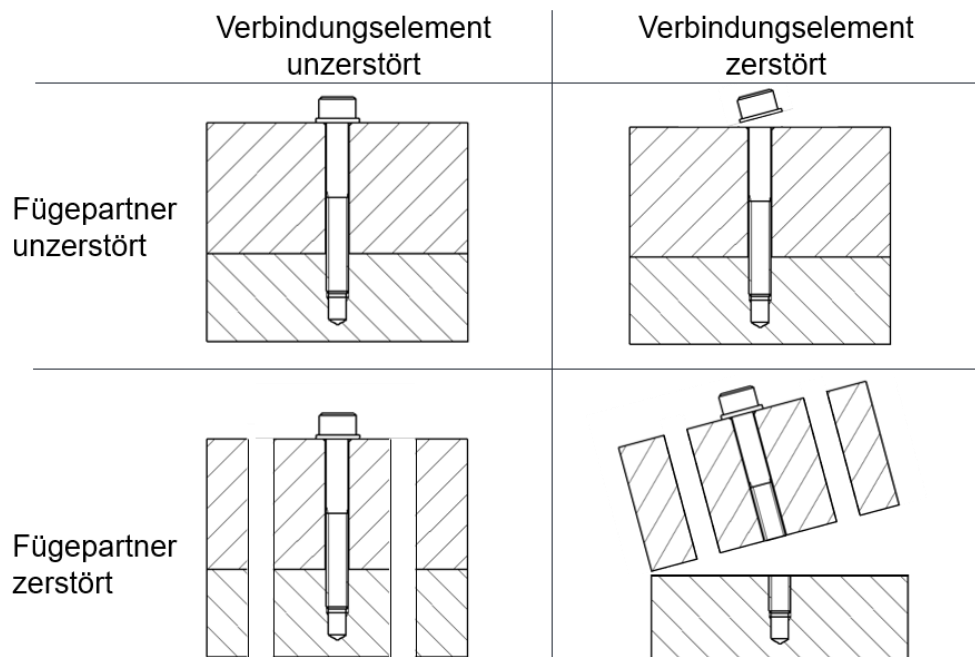


Abbildung 2-1: Demontagearten am Beispiel des Entschraubens (eigene Darstellung in Anlehnung an (Härtwig, 2005))

Die robotergestützte Demontage von Schraubverbindungen wird allgemein in vier Prozessphasen unterteilt (R. Li et al., 2020):

Für den ersten Schritt, das *Anfahren der Schraubverbindung*, ist die Information über die Position und Orientierung der Schraube im Raum erforderlich. Ebenso muss die Einbausituation des Werkstücks berücksichtigt werden, um Kollisionen zu vermeiden. Im Zuge der *Formschlusserstellung zwischen Werkzeug und Schraubenkopfantrieb* wird das Werkzeug mit der Schraube gekuppelt, indem der Roboter eine sogenannte Suchstrategie am Tool Center Point (TCP) ausführt. Dabei wird das Werkzeug in Schraubenanzugsrichtung mit geringer Drehzahl so lange gedreht, bis eine formschlüssige Verbindung zwischen Schraubenkopfantrieb und Schrauber Klinge hergestellt ist. In aller Regel wird das Überschreiten eines Drehmomentschwellwertes am Schraubwerkzeug als Indikator für die erfolgreiche Formschlusserstellung herangezogen. Beim anschließenden *Ausdrehen der Schraube* wird ein Drehmoment in Löserichtung eingebracht. Entscheidende Größe ist in dieser Phase das Losdrehmoment, ab dem die Schraube mit ihrer Rotation beginnt und damit die statischen Reibungszahlen in Gewinde und Kopfauflage zu dynamischen Reibungszahlen übergehen. Das Losdrehmoment steht im Gegensatz zum Versagemoment der Schraube, bei welchem das Verbindungselement durch die eingebrachten Prozesskräfte bei der Demontage versagen

würde. Darüber hinaus ist auch die Schrauberdrehzahl eine bestimmende Prozessgröße in diesem Prozessschritt. Das *Abführen der gelösten Schraube* geschieht unter Berücksichtigung der umliegenden (Stör-)Geometrien von Bauteil und Umgebung sowie der erforderlichen Prozesszeiten. Abbildung 2-2 fasst die Prozessphasen grafisch zusammen und gibt die relevanten Einflussgrößen wieder.

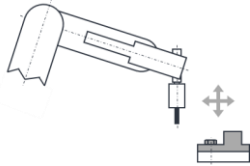
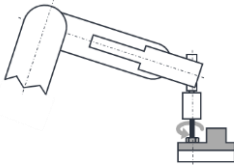
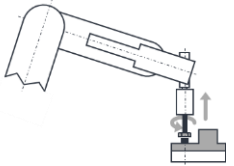
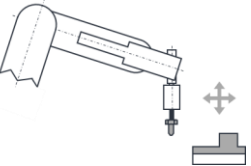
	1. Anfahren	2. Formschluss	3. Ausdrehen	4. Abführen
<b>Prozess-Phase</b>				
<b>Prozess-Parameter</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Position &amp; Orientierung der Schraube</li> <li>&gt; Geometrie des Werkstücks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Lateral- und Angular-Versatz</li> <li>&gt; Normalkraft</li> <li>&gt; Axialkraft</li> <li>&gt; Drehmoment-schwellwert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Losdrehmoment</li> <li>&gt; Versagensmoment</li> <li>&gt; Schrauberdrehzahl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; (Stör-)Geometrien</li> <li>&gt; Prozesszeiten</li> </ul>

Abbildung 2-2: Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubverbindungen (eigene Darstellung in Anlehnung an (Kahmeyer, 1995; Tritsch, 1996))

Aus der Charakterisierung der automatisierten zerstörungsfreien Demontage von Schraubverbindungen lassen sich die Betrachtungsebenen des Standes von Forschung und Technik ableiten. Aufgrund der Anpassung der üblicherweise eingesetzten industriellen 6-Achs-Knickarm Robotertechnik mittels geeigneter Werkzeuge an die Demontageaufgabe, ist eine eingehende Betrachtung des technologischen Standes in diesem Bereich notwendig. Es ist also eine Beurteilung des technologischen Standes im Bereich der **Konzeption und Entwicklung von Endeffektor-Kinematiken für die automatisierte Demontage von Schraubverbindungen** erforderlich. Vor dem Hintergrund der Anpassungsfähigkeit der Demontagesysteme soll die erforderliche **Bildverarbeitung für die Erkennung und Zustandsbewertung von Schraubverbindungen** eine zweite Betrachtungsebene sein. In diesem Zusammenhang wird auch die **Informationsmodellierung für die automatisierte Demontage** besondere Betrachtung finden. Die vierte Betrachtungsebene beschreibt die **Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage**.

## 2.4 Flexible Endeffektoren für die automatisierte Demontage von Schraubverbindungen

Die aufgezeigten Gründe für die Automatisierung der Demontage haben dazu geführt, dass die damit verbundenen Forschungsfragen bereits intensiv betrachtet wurden. Erste Arbeiten finden sich in den 1990er Jahren (vgl. Shibata & Tanie, 1994; Tritsch, 1996). Die Verfügbarkeit immer stärkerer Rechenleistungen und die zunehmenden Nachhaltigkeitsbestrebungen haben die automatisierte Demontage erneut zum aktuellen Forschungsgegenstand werden lassen. Die frühen Arbeiten enthalten wichtige Grundlagen für die Aufgabenstellungen, sind aber aufgrund der heutigen technischen Möglichkeiten mit den aktuellen Beiträgen nicht mehr vergleichbar. Als ein einschlägiger früher Beitrag ist die Arbeit von Shibata und Tanie zu nennen, in welchem die Vision eines vollautomatisierten Demontagesystems entworfen wird. Das Demontagesystem nutzt das Beispiel der Demontage von Kraftfahrzeugen (*Kfz*) und enthält noch heute gültige Forschungsgegenstände. Es werden adaptive Konfigurationen, Assistenzsysteme für menschliche Werker und die kooperative Arbeit von Kinematiken an Objekten mit ungewissen Eigenschaften als Themenkomplexe genannt und in dem Konzept der *Eco-Factory* vereint. Jedoch werden keine technischen Details oder Umsetzungen aufgezeigt (Shibata & Tanie, 1994). Aktuelle Beiträge beinhalten nunmehr auch prototypische Umsetzungen oder seriennahe Produktionszellen in Form von Pilotanlagen, von denen im Folgenden die wesentlichen Beiträge vorgestellt werden.

Auf der ersten Betrachtungsebene des Standes von Forschung und Technik zur **Konzeption und Entwicklung von Endeffektor-Kinematiken für die automatisierte Demontage von Schraubverbindungen** findet sich eine einschlägige frühe Arbeit am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart. In der Dissertationsschrift von Martin Kahmeyer wird eine Prototypen-Anlage für die Demontage von Telefonen vorgestellt. Die Zelle besteht aus einem Manutec R3 Roboter mit einem Siemens PCM3 Controller. Als Endeffektoren kommen ein *Zerlegewerkzeug für Schraubverbindungen* sowie ein pneumatischer Greifer zum Einsatz. Das Zerlegewerkzeug besteht aus einem Gleichstrommotor mit Drehwinkelgeber. Mithilfe eines integrierten Bit-Wechselsystems kann sich das System an verschiedene Schraubenkopfformen anpassen. Losgedrehte Schrauben können mit einem mechanischen Greifsystem gegriffen und abgeführt werden. Der Endeffektor ist mit einem Sensor für Greifkraft und Öffnungsposition ausgestattet. Bei Störungen kann die Steuerungseinheit auf ein



anderes Softwareprogramm mit unterschiedlichen Parametern umschalten oder einen Bediener anfordern. Mithilfe einer filterbasierten Bildverarbeitung können vier verschiedene Schraubenkopfantriebe erkannt und klassifiziert werden. Die Zelle ist somit imstande, fünf Telefonvarianten zu demontieren. Das Telefongehäuse wird zur Aufnahme der Prozesskräfte in einer flexiblen Demontagevorrichtung fixiert. Der gesamte Demontageprozess umfasst manuelle und vollautomatisierte Demontageoperationen wie die manuelle Zufuhr von Produkten zur Zelle, das manuelle Fixieren des Gehäuses und das Schneiden von Kabelanschlüssen. Das Abschrauben des Gehäuses und der Lautsprechereinheit erfolgen vollautomatisch (Kahmeyer, 1995).

An der Technischen Universität Dortmund wurden Arbeiten zur automatisierten Demontage durchgeführt, in deren Kontext flexible Endeffektor-Kinematiken entstanden. In den aufeinander aufbauenden Dissertationen von Hucht und Nave aus den Jahren 1997 und 2003 werden unterschiedliche Demontagestrategien bewertet. Auf Basis einer Analyse von verschiedenen Trennprozessen erfolgt die morphologische Konzeption und der Aufbau einer roboterbasierte Demontagezelle mitsamt eines Schraub-Endeffektors. Der entwickelte Endeffektor besteht aus einer Antriebseinheit, die durch einen Flügelzellenmotor Drehmoment aufbringt. Darüber hinaus wird eine Toleranzausgleichseinheit entwickelt, welche die Formschlusserstellung verbessert. In den praktischen Versuchsreihen werden Fernsehgeräte von der prototypischen Demontagezelle demontiert. Die Autoren erreichen eine Gesamtverfügbarkeit von 86 Prozent mit der Prototypen-Anlage. Als häufigste Fehlerursache werden nicht erkannte Lageabweichungen von Schrauben- und Kabelverbindungen genannt sowie nicht erkannte Schraubenkopfantriebe und fehlende Schrauben angeführt. Ebenso stellen nicht lösbare Schraubverbindungen eine Fehlerquelle dar, welche die Robustheit der Demontage mindern (Hucht, 1997; Nave, 2003).



*Abbildung 2-3: Pilot-Demontagezelle der Demontagefabrik (Stenzel, 2001, S. 90)*

In den Jahren 1995 bis 2006 wurde im Sonderforschungsbereich (SFB) 281 „Demontagefabriken zur Rückgewinnung von Ressourcen in Produkt- und Materialkreisläufen“ eine Pilotanlage aufgebaut (vgl. Abbildung 2-3), welche die Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen am Beispiel der Demontage von Waschmaschinen untersucht. Die Pilotanlage besteht aus den folgenden wesentlichen Komponenten: automatisierte zerstörende Demontagestation, automatisierte zerstörungsfreie Demontagestation, manuelle Arbeitsstation, Werkzeugwechselsystem, Spann- und Handhabungssystem, Transportsystem, Sensoriksystem, Steuerungssystem (Seliger et al., 2000). Die Dissertationsschrift von Rebafka wurde im Kontext des SFB erarbeitet und befasst sich mit der Herleitung und Entwicklung eines Baukastensystems für flexible Demontagewerkzeuge zur Automatisierung der Demontage. Mit dem System können die Demontagewerkzeuge entsprechend den Anforderungen konfiguriert werden (Rebafka, 2003). Die Werkzeuge können sowohl von menschlichen Workern als auch von Industrierobotern bedient werden. Sie bestehen aus Trägermodulen, aus Steuermodulen, Energiemodulen, kinematischen Modulen sowie aus Wirkmodulen. Die modularen Werkzeuge arbeiten weitgehend unabhängig von Geometrien und Werkstoffen der eingesetzten Verbindungstechnik, da sie die benötigten Wirkflächen für die Kraftangriffspunkte selbst schaffen. So wird ein Werkzeug für die teilweise zerstörende Demontage vorgestellt, welches eine Kerbe in die Schraubenkopfantriebe einbringt und die Schraube dann mit einem Druckluftlamellenmotor ausdreht. Ein besonderes Augenmerk wird in dem gesamten SFB außerdem auf das Gebiet der Informationsmodellierung und Informationsverarbeitung gerichtet. Durch die Verwendung sogenannter *Life Cycle Units*, autarken Mikro-Controllern, welche die technischen Gebrauchsgüter im Betrieb begleiten, können wertvolle Informationen für die Demontage gesammelt werden (Grudzien, 2002).



Abbildung 2-4: Demontagezelle der University of New South Wales (Foo et al., 2021a)

An der University of New South Wales entstand in der Forschergruppe *Sustainable Manufacturing and Life Cycle Engineering* in konsekutiven Arbeiten eine roboterbasierte Demontagezelle, mit der vorrangig Laptops demontiert werden. Die Demontagezelle verwendet einen 6-Achs-Knickarmroboter vom Typ ABB IRB-140. Aus dem betrachteten Produktportfolio leiten die Autoren ab, dass die Demontage nicht rein zerstörungsfrei durchgeführt werden muss. Daher werden verschiedene Prozesse für die Demontage untersucht. Das Multi-Kopf-Roboterwerkzeug ist imstande, Schneiden, Bohren und Entschrauben durchzuführen. Es besteht aus einem Bohrer, einem Winkelschleifer sowie einem Schraubendreher, welche zusammen montiert sind (vgl. Abbildung 2-4). In den praktischen Versuchsreihen erreicht das automatisierte Entschrauben lediglich eine Erfolgsrate von 21 Prozent, da die Formschlusserstellung zwischen Werkzeug und Schraubenkopfantrieb häufig fehlschlägt. Mithilfe einer Bildverarbeitung in einer Eye-to-Hand-Anordnung können Komponenten und Verbindungselemente identifiziert und Demontageoperationen mittels einer Inferenzmaschine automatisch abgeleitet werden. Die Demontagesequenz der Cores liegt in einer Wissensdatenbank vor. Zur Informationsmodellierung wird eine Ontologie vorgestellt, welche das betrachtete Produktspektrum abbildet. Durch das Bildverarbeitungssystem und die eingesetzte Wissensbasis können prinzipiell auch unbekannte Komponenten eingelernt werden. Daher schlagen die Autoren auf Basis ihrer Ergebnisse die Ausweitung des Ansatzes auf andere Schraubentypen außerhalb der Laptop-Anwendung vor. Die Anpassungsfähigkeit gegenüber einem Produktwechsel wird in den Arbeiten jedoch nicht weiter betrachtet (W. H. Chen, 2017; W. H. Chen et al., 2020, 2021; Foo et al., 2021a, 2021b, 2022; Foo, 2022; Vongbunyong et al., 2012, 2013a, 2013b, 2015; Vongbunyong & Chen, 2015).

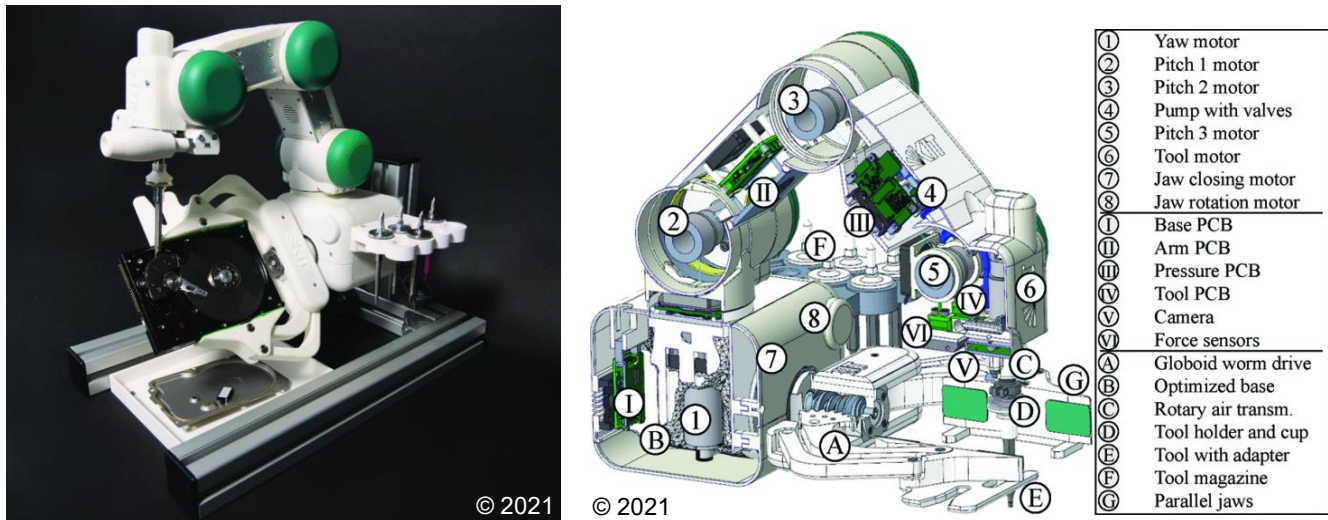


Abbildung 2-5: Der KIT-Greifer (Klas et al., 2021)

Am Institut für Anthropomatik und Robotik des Karlsruher Institut für Technologie entstand eine Roboter-Kinematik mitsamt einer Endeffektor-Kinematik, die für die Demontage von Computer Festplatten eingesetzt wird (vgl. Abbildung 2-5). Mit dem Roboterwerkzeug können die Demontageoperationen *Aufhebeln*, *Entschrauben*, *Auspressen* und *Schneiden* vorgenommen werden. Der Endeffektor wird über einen Werkzeugwechsel an die Demontageoperation angepasst. In der Anwendung werden auch Schraubverbindungen zerstörungsfrei und automatisiert demontiert. Durch einen menschlichen Werker werden dazu die Verfahrenwege und Kraftprofile vorgegeben und im Anschluss durch lernende Systeme optimiert. Zur Lokalisation der relevanten Punkte wird eine Bildverarbeitung vorgestellt. Die Schraubenkopferkennung ist als zweistufiges Verfahren ausgeführt. Zunächst wird eine OpenCV-Hough-Transformation ausgeführt, um Kandidaten zu generieren und mögliche Positionen von Schrauben zu erkennen. Anschließend wird ein binärer Klassifizierungsalgorithmus verwendet, um Schrauben von anderen runden Objekten zu unterscheiden. Die bildbasierte Schraubenkopferkennung erreicht eine Bewertungsgenauigkeit von 93,6 Prozent. Die statistische Auswertung der Demontageprozesse ergibt, dass 10 von 180 Aktionen fehlschlagen, wobei es sich bei neun der zehn Aktionen um Entschraubetätigkeiten handelt. Die ermittelten Prozesszeiten für das automatisierte Entschrauben liegen im Mittelwert bei etwa 110 Sekunden. Zusammen mit der kurzen Reichweite und der geringen Traglast der Roboterkinematik verdeutlicht dies die Eignung der Technologie für den Einsatz im Laborumfeld (Borras et al., 2018; Klas et al., 2021).



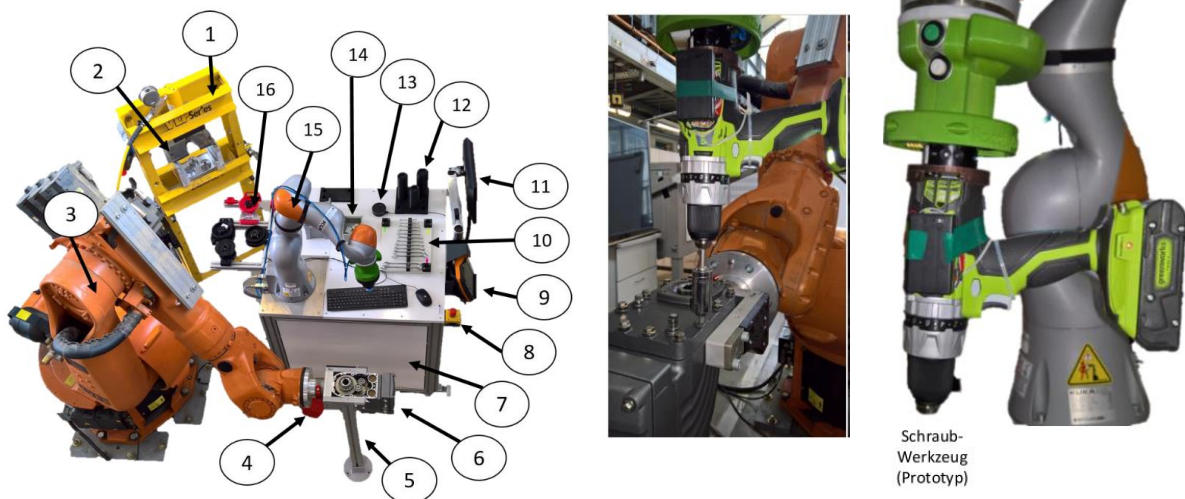


Abbildung 2-6: Demontagearbeitsplatz nach (Jungbluth, 2019)

In der Dissertationsschrift von Jungbluth, die in Kooperation mit der Firma SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG entstand, wird die Entwicklung eines robotergestützten Assistenzsystems vorgestellt. Dieses unterstützt den Menschen bei der zerstörungsfreien Demontage von Elektromotoren (vgl. Abbildung 2-6). Mithilfe eines umfangreichen Planungssystems für die Demontage Sequenzplanung ist das Assistenzsystem in der Lage, die Demontage gemäß einem variablen Demontagegrad teilautomatisiert durchzuführen und die vom System ausgehende Unterstützung an den Nutzer anzupassen. Die Sequenzplanung erfolgt mithilfe einer Schnittstelle zu einem CAD-System, aus dem Informationen über das Produkt entnommen werden. Es wird ein proprietäres Produktmodell hergeleitet, welches eine Zuordnung zu dem erforderlichen Werkzeug für die Demontage enthält. Der Demontagearbeitsplatz besteht aus einem industriellen 6-Achs-Knickarm Roboter, einem kollaborativen Roboter des Herstellers KUKA, einer Auspressstation sowie aus einem Arbeitstisch im geteilten Arbeitsraum von Mensch und Roboter. In der Arbeit entstehen mehrere Roboterwerkzeuge für die Demontage, welche teilweise automatisiert an die Roboter gewechselt werden können. Es werden unter anderem ein Knarrenschaubwerkzeug, eine Abziehvorrichtung, mehrere mechanische Greifer, ein Sauggreifer sowie ein Schraubsystem entwickelt. Das in der Arbeit verwendete Schraubsystem kann über eine MQTT-Schnittstelle Informationen austauschen und parametrisiert werden. Es besteht aus einem handelsüblichen Akku-Bohrschrauber und es kommt kein Schraubengreifer zum Einsatz. Der Nutzer entnimmt die Schraube nach dem Ausdrehen manuell (Jungbluth et al., 2016; Jungbluth, 2019).



*Abbildung 2-7: Versuchsaufbau am Fraunhofer IPA*

Entsprechend des aktuellen Standes der Forschung befindet sich eine der fortgeschrittensten Demontagezellen am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart (vgl. Abbildung 2-7). An dem Versuchsaufbau wird die flexible Demontage von Schraubverbindungen am Beispiel von Kfz-Batterien untersucht. Der besondere Fokus liegt auf der KI-basierten Erkennung des Schraubenzustandes. Dazu werden Drehmoment-Drehwinkel-Kurven der Entschraubvorgänge aufgezeichnet und klassifiziert. Diese werden in einem Laufzeitsystem der Anwendung verwendet, um über die Livedaten des Schraubwerkzeugs zu erkennen, ob das Entschrauben erfolgreich war. Die Demontagezelle verwendet einen KUKA KR-16-2 Roboter mit einem Deprag ER36-050 Schraubwerkzeug. Zur weiteren Demontage der Batterien finden in der Roboterzelle darüber hinaus weitere Werkzeuge Anwendung. Unter anderem magnetische Handhabungswerkzeuge, Schneidwerkzeuge zum Öffnen der Dichtungen sowie Vakuumgreiftechnik. Die Kfz-Batterien werden mit einem flexiblen Spannsystem fixiert und die ausgedrehten Schrauben im Anschluss an die Demontage abgesaugt. Zur Lokalisation der Schrauben wird ein Bildverarbeitungssystem eingesetzt. Sollten nicht lösbare Schrauben erkannt werden, ist das System in der Lage, alternative Prozesse anzuwenden, wie das Helixfräsen und das Aufbohren. Das System besitzt eine hohe Robustheit in den Demontageprozessen. Allerdings ist die Anpassungsfähigkeit gegenüber anderen Produkten kein Betrachtungsgegenstand. (Al Assadi, Holtz et al., 2022; Al Assadi, Rosenberg et al., 2022; Beck et al., 2021).

Weitere angrenzende Forschungsarbeiten zur Konzeption und Entwicklung von Endeffektor-Kinematiken für die automatisierte Demontage von Schraubverbindungen beschäftigen sich vorrangig mit Steuerungssystemen von Roboter- und Endeffektor-Kinematiken. So wird in der Arbeit von Li ein Multi-Kopf-Demontagewerkzeug verwendet. Mithilfe der eingebetteten Informationsverarbeitung werden in der Anwendung aus dem Jahr 2016 ebenfalls verschiedene Schraubenköpfe demontiert. In dem Beitrag werden keine externen Umwelteinflüsse berücksichtigt und die Demontage basiert auf einer intensiven vorhergehenden manuellen Inspektion (J. Li, 2016). In der Arbeit von Mironov et al. werden Untersuchungen zur Demontage von Schraubverbindungen von menschlichen Probanden durchgeführt. Dabei wird das Verhältnis der aufgebrachten Normalkraft zu dem Drehmoment beim Ausdrehen ermittelt. Auf Grundlage des ermittelten linearen Zusammenhangs wird ein Demontageschrauber für Roboter entwickelt und prototypisch umgesetzt. Der Schrauber ist in der Ausdrehachse der Schrauben beweglich gelagert und bringt mit einer Federvorspannung eine Normalkraft auf. In Zusammenspiel mit einem Regler für das Drehmoment beim Ausdrehen wird das ermittelte Verhältnis von Normalkraft zu dem Drehmoment beim Ausdrehen nachgebildet. Der Beitrag legt einen besonderen Fokus auf die Regelung und geht nicht im speziellen auf die besonderen Herausforderungen bei der Automatisierung der Demontage ein (Mironov et al., 2018). An der University of Birmingham im *Autonomous Remanufacturing Lab* entstand eine Roboterzelle für die Demontage von Automobil-Komponenten, im Speziellen von Turboladern und Wasserpumpen. Die Demontagezelle ist mit einem geteilten Arbeitsraum zwischen Mensch und Roboter ausgelegt und besteht aus zwei KUKA LBR iiwa Robotern, welche auf verschiedene Werkzeuge zurückgreifen können. Es wird ein industrielles Schraubwerkzeug und ein 3-Finger Greifsystem verwendet. Der Fokus der Beiträge liegt auf den Regelungsstrategien für die Roboter. Die Demontage von Schrauben wird als Prozess detailliert betrachtet und es werden umfangreiche Untersuchungen an Außensechskantschrauben durchgeführt, aber die systematische Entwicklung von flexiblen Roboterwerkzeugen wird nicht betrachtet. Demontagefehl-schläge werden mit einer Bildverarbeitung detektiert (Huang et al., 2020; Huang, Pham, Li, Jiang et al., 2021; Huang, Pham, Li, Qu et al., 2021; R. Li et al., 2020).

Eine umfassende zeitliche Auflistung der wichtigsten Arbeiten im Bereich der automatisierten Demontage ist in Tabelle 0-1 im Anhang angeführt.

## 2.5 Bildverarbeitung für die Erkennung und Zustandsbewertung von Schraubverbindungen

In den vorausgehenden Kapiteln wurde bereits die wesentliche Rolle der Informationsgewinnung mittels Bildverarbeitung für die Umsetzung der Anpassungsfähigkeit von automatisierten Produktionsanlagen in der Demontage herausgestellt. Im aktuellen Stand von Forschung und Technik werden typischerweise die folgenden Aufgaben in der automatisierten Demontage durch Bildverarbeitungssysteme gelöst:

- Objekterkennung: Komponenten und Verbindungselemente werden semantischen Klassen zugeordnet und im Bildbereich lokalisiert, um daraus relevante Orientierungen und Positionen im Raum abzuleiten, vgl. (Foo et al., 2021b). Darüber hinaus lässt sich mittels einer Objekterkennung die Demontage Sequenzplanung umsetzen (Choux et al., 2021; Torres et al., 2009) und die erfolgreiche Ausführung der Demontage überwachen (Vongbunyong & Chen, 2015, S. 55).
- Segmentierung: Die Pixel, welche zu Komponenten und Verbindungselementen gehören, werden im aufgenommenen Bild markiert, um diese von dem Hintergrund zu unterscheiden (Christian Friedrich et al., 2017).
- Klassifikation: In einem Vorverarbeitungsschritt können Eingangsbilder klassifiziert werden, um zu bestimmen, ob sie korrodierte Stellen enthalten oder ob sie keine Korrosionsmerkmale aufweisen (Petricca et al., 2016).
- Zustandsbewertung und Qualitätskontrolle: Die Zustandsbewertung und Qualitätskontrolle von Komponenten, Produkten und Verbindungselementen kann durch Bildverarbeitungssysteme realisiert werden (Poschmann, 2021; Schlüter et al., 2021).

In einem Bildverarbeitungssystem wird einerseits die Bildaufnahme mithilfe geeigneter Bildsensoren und andererseits die anschließende Verarbeitung dieser Bilder durch entsprechende Softwarelösungen zusammengefasst. Bei den Sensoren wird typischerweise unterschieden hinsichtlich der Art des aufgenommenen Bildes. Man unterscheidet hierbei zwischen Sensoren, welche 2-dimensionale und 3-dimensionale Abbildungen ihrer Umwelt liefern. Typische 2D-Sensoren sind Kameras, die im Rot-, Grün- und Blau-Farbraum (RGB) arbeiten. Bei 3D-Kameras hingegen enthalten die aufgenommenen Abbildungen der Umwelt Tiefeninformationen. Diese Systeme können also kombi-



nierte RGB- und Tiefendaten liefern (engl. *Red Green Blue Depth, RGBD*). Die Tiefeninformationen werden in den für diese Arbeit relevanten Systemen in der Regel durch Triangulation oder durch Messung der Lichtlaufzeit ermittelt (eng. *Time-of-Flight*). Aus den aufgenommenen Daten entstehen Punktwolken, mit denen es möglich ist, Objekte in Bezug auf Tiefe, Form und Volumen zu rekonstruieren.

Insbesondere in der Demontage stehen den Bildverarbeitungssystemen besondere Herausforderungen entgegen. So können im Demontagekontext variierende Beleuchtungsbedingungen im Arbeitsraum auftreten. Ein Bildverarbeitungssystem muss darauf reagieren können. Die Aufnahmehelligkeit kann hardwareseitig, zum Beispiel durch geregelte Beleuchtungseinheiten, oder softwareseitig, etwa durch Techniken wie Adaptive Histogram Equalization, eingestellt werden. Durch den individuellen Zustand der bearbeiteten Produkte und Komponenten muss das Bildverarbeitungssystem robust sein gegenüber den auftretenden Abnutzungserscheinungen. Darüber hinaus ist in der Demontage die Okklusion von Produkten, Komponenten oder Verbindungselementen ein häufig auftretendes Problem. Typischerweise werden die Algorithmen der Bildverarbeitung zur Laufzeit angewendet und erfordern somit eine kurze Laufzeit, um die OEE der Gesamtanlage nicht negativ zu beeinflussen.

Die oben genannten typischen Aufgaben von Bildverarbeitungssystemen finden auch bei der in dieser Arbeit adressierten Problemstellung der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen Anwendung. Insbesondere umfasst dies die **Erkennung der sichtbaren Teile von Schraubverbindungen, also die Identifikation und Lokalisation von Schraubkopfantrieben**. Zudem gilt es für die Integration des Domänenwissens in die automatisierte Demontage eine **Zustandsbewertung der sichtbaren Teile der Schraubverbindungen** vorzunehmen. Diese Aufgabenstellungen sind bereits eingehend von der Forschungsgemeinschaft betrachtet worden. Die freie Verfügbarkeit hoch performanter Algorithmen im Zusammenspiel mit der weiten Verbreitung von Schraubverbindungen haben viele Arbeiten in diesem Bereich motiviert. Frühe Ansätze setzten vor allem auf filterbasierte Algorithmen und klassische Rechenmethoden. Heutige Arbeiten konzentrieren sich vorrangig auf die Auswahl, das Training sowie die Optimierung von künstlichen neuronalen Netzwerken.

In einer der ersten modernen Arbeiten zur Identifikation und Lokalisation von Schraubkopfantrieben mittels Bildverarbeitung stellen Büker et al. im Jahr 2001 eine Demontagezelle für Gebrauchtwagen vor. Mithilfe von wissensbasierten Erkennungsalgo-

rithmen werden Konturen von Schrauben in Grauwertbildern erfasst. Das Bildverarbeitungssystem identifiziert und lokalisiert die Fahrzeugräder sowie die Radschrauben. Mithilfe eines Tiefensensors wird die Lokalisierung im dreidimensionalen Raum vorgenommen. Kamera und Tiefensensor werden von einem Industrieroboter geführt. Der Beitrag stellt auch deshalb vielversprechende Ergebnisse vor, weil die im Anwendungsbeispiel betrachteten Schrauben vergleichsweise groß sind und damit gut zu erkennende Features darstellen (Büker et al., 2001).

In einem weiteren frühen Beitrag beschreiben die Autoren Vongbunyong et al. die Erkennung von Schraubverbindungen als eine gut lösbare Aufgabe, da diese im Vergleich zu anderen Verbindungselementen stark standardisiert und allgemein gut sichtbare Komponenten sind. Für die Bildverarbeitung werden zwei große Herausforderungen benannt: Die geringe Größe der Verbindungselemente stellt hohe Anforderungen an das eingesetzte Kamerasystem und die große Vielfalt durch unterschiedliche Materialien, Korrosion oder Lichtverhältnisse erfordert eine hohe Flexibilität des Erkennungssystems. Das in dem Beitrag vorgestellte Schraubendetektionssystem konzentriert sich in einer Fallstudie mit Flüssigkristallbildschirmen auf die Unterscheidung zwischen Komponenten und Verbindungselementen. Eine Klassifizierungsaufgabe zu verschiedenen Schraubenkopfantrieben ist nicht Gegenstand der Betrachtung (Vongbunyong & Chen, 2015). Der verwendete featurebasierte Ansatz wird in einer früheren Arbeit genauer beschrieben (Vongbunyong et al., 2013b).

Ein ergänzender Beitrag, der auf klassischen Ansätzen der Bildverarbeitung basiert, wird von Wegener et al. vorgestellt. Es handelt sich um ein Konzept für die kooperative, von Mensch und Roboter vorgenommene Demontage mit dem Fokus auf Kfz-Batterien. In dem Beitrag kommt eine Schraubspindel mit einem Bitwechselsystem zum Einsatz. Der Fokus liegt auf dem Zusammenwirken von Mensch und Roboter und der damit einhergehenden Umsetzung der Sicherheitsanforderungen. Das Entschrauben und die Erkennung von Verbindungselementen stellen in diesem Ansatz die Hauptaufgaben des Roboters dar. Es werden drei Methoden zur Lokalisierung der Verbindungselemente vorgestellt und verglichen: die Verwendung einer CAD-Datenbank, die physische Demonstration der Position und Orientierung der Verbindungselemente sowie ein Bildverarbeitungssystem. Da in der realen Anwendung detaillierte CAD-Datenbanken für den Recycler in der Regel nicht zugänglich sind und die physische Demonstration zu zeitaufwendig ist, werden diese Ansätze in dem Beitrag ausgeschlossen. Die umge-

setzte Bildverarbeitung zur Erkennung von Schraubenkopfantrieben von M5-Schrauben stützt sich in dieser Anwendung auf eine kaskadierte Klassifikation. Es wird die sogenannte Haar Cascade eingesetzt, bei welcher das Bild schrittweise durch eine Reihe von einfacheren Klassifikatoren untersucht wird. Wesentlich bei diesem Ansatz sind die Haar-Merkmale (Haar Features), einfache rechteckige Muster auf Bildpixel Ebene. Diese Merkmale ähneln der Haar-Funktion, einer Sprungfunktion aus der Mathematik. Die Haar Cascade wurde in dem Beitrag von Wegener et al. auf Positiv- und Negativbildern trainiert, um ein Modell zur Erkennung der gewünschten Objektklassen zu erstellen. Um die Genauigkeit der Klassifizierung zu verbessern, werden die erkannten falsch-positiven Bilder der Negativmenge hinzugefügt. Der Algorithmus wird in vier Schritten umgesetzt: Vorverarbeitung, Groberkennung, Feinerkennung sowie Clustering und Überprüfung. Mit dem finalen Modell können allerdings nur etwa 50 Prozent der Schrauben in dem verwendeten Testdatensatz korrekt erkannt werden (Küthe, 2015; Wegener et al., 2015).

Bei den Arbeiten der neuen Generation zur Identifikation und Lokalisation von Schraubenkopfantrieben sind insbesondere die Beiträge von Yildiz et al. zu nennen. Die Autoren leiten ein Bildverarbeitungssystem für die Demontage von Festplatten ab (Yildiz et al., 2020; Yildiz et al., 2022). Der zugrunde liegende Erkennungsalgorithmus wurde von den Autoren erstmals 2019 vorgestellt (Yildiz & Wörgötter, 2019). In den Arbeiten wird ein zweistufiger Algorithmus zur Schraubenerkennung verfolgt. Zunächst werden Kandidaten unter der Annahme generiert, dass alle Schraubenköpfe kreisförmig sind. Es wird eine OpenCV-Hough-Transformation verwendet, um Kreise zu erkennen. Die gefundenen Kandidaten werden dann klassifiziert in die Klassen *Schrauben* und *Artefakte*. In dem Beitrag vergleichen die Autoren mehrere Klassifikatoren für diese Aufgabe und leiten ein Modell ab, das eine Genauigkeit von 99 Prozent erreicht. Die weitere Klassifizierung in verschiedene Schraubenkopfantriebe wird in einem ergänzenden Beitrag von den Autoren beschrieben. Es wird eine Architektur zur Unterscheidung zwischen vier verschiedenen Arten von Schraubenkopfantrieben in unterschiedlichen Größen vorgestellt (Yildiz & Wörgötter, 2020). Das endgültige Modell erreicht eine Genauigkeit von 97 Prozent. Die Gesamtgenauigkeit des Ansatzes wird durch die Kandidatengenerierung begrenzt. Es hat sich gezeigt, dass dieser Schritt in etwa 75 Prozent aller Versuche erfolgreich ist. Dies führte zu einer durchschnittlichen Genauigkeit (engl. *Average Precision, AP*) von 0,757 für den gesamten Algorithmus. Die Autoren schlagen vor, alternative Methoden für die Kandidatengenerierung zu erforschen. Es wird darauf

hingewiesen, dass die meisten Fehlklassifizierungen direkt mit der Art und Weise zusammenhängen, wie die Hough-Transformation die Regionen schneidet. Diese Strategie bietet zwar eine universelle Lösung für die Erkennung von Schrauben, ist aber unzureichend bei der Erkennung von nicht kreisförmigen Schrauben und berücksichtigt nicht die möglicherweise durch Schmutz und Korrosionserscheinungen verdeckten Kreisränder.

In den Beiträgen von Bdiwi et al. werden Bildverarbeitungsalgorithmen beschrieben, welche in der automatisierten Demontage von Elektroantrieben angewendet werden. Dazu werden neben den Bilddaten im HSV-Farbraum (engl. *hue saturation value*) auch die Informationen aus Tiefenbildern verwendet. Der Ansatz nutzt Merkmale von Schrauben, welche in Graustufen-, Tiefen- und HSV-Daten gewonnen werden. Die Robustheit wird jedoch durch gelegentliche Fehldetektionen aufgrund des Rauschens in den Tiefendaten gemindert. Für den Ansatz ist ein erhöhter Rechenaufwand erforderlich, der dadurch entsteht, dass ein Tiefenbild des Features benötigt wird, um Fehldetektionen wie Löcher zu exkludieren (Bdiwi et al., 2016; Bdiwi et al., 2017).

In der Arbeit von Li et al. wird ein experimentelles Demontagesystem für die automatisierte Demontage von Schrauben in Mobiltelefon-Hauptplatinen vorgestellt. Der Ansatz zur Schraubenkopferkennung kombiniert den Einsatz eines regionenbasierten faltenden neuronalen Netzwerks (engl. *Region Based Convolutional Neural Network, Faster R-CNN*) mit einem innovativen Rotations-Kantenähnlichkeitsverfahren, um Schrauben genau zu lokalisieren und zu klassifizieren. Der Ansatz weist mit 99,64 Prozent eine hohe Klassifikationsgenauigkeit auf, wobei die Laufzeit mit ca. fünf Sekunden pro Schraube vergleichsweise lang ist. Ebenso wird die Genauigkeit des Ansatzes bei der unvollständigen Erkennung von Kanten der Schrauben gesenkt (X. Li et al., 2021).

Der an der roboterbasierten Demontagezelle an der University of New South Wales (vgl. Abbildung 2-4) umgesetzte Algorithmus zur Erkennung von Kreuzschlitzschrauben verwendet eine digitale Spiegelreflexkamera als Sensor. Die Schraubenerkennung wird mit mehreren Bildverarbeitungstechniken und der Deep-Learning-Architektur Faster R-CNN mit Inception Version 2 durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Reihenfolge der Bildverarbeitungsschritte einen Einfluss auf die Präzision des Deep-Learning-Modells hat. Die höchste Genauigkeitsrate in der besten Konfiguration des Systems beträgt 91,8 Prozent. Dies wird durch eine Kombination aus Vorverarbeitung, Objekterkennung und visuellem Reasoning erreicht (Foo et al., 2021b).

In dem Beitrag von Liu et al. wird eine experimentelle Demontagezelle für die Batteriedemontage dargestellt. Es wird eine Methode zur Erkennung von mechanisch beschädigten Schrauben in Produkten an ihrem Lebensende (engl. *End of Life, EoL*) unter inhomogenen Beleuchtungsbedingungen beschrieben. Der Ansatz integriert Reflexions- und Texturmerkmale in einem zweistufigen Erkennungsverfahren, begleitet von einem Regressionsmodell. Im ersten Schritt des Verfahrens werden Reflexionsmerkmale verwendet, um Schrauben zu extrahieren. In der zweiten Stufe werden dann Texturmerkmale genutzt, um falsche Kandidaten mit ähnlichen Reflexionsmerkmalen herauszufiltern (Q. Liu et al., 2023).

Unter den neuesten Forschungsbeiträgen zur Identifikation und Lokalisation von Schraubenkopfantrieben zeichnen sich Algorithmen der sogenannte YOLO Familie (engl. *You Only Look Once*) durch besonders hohe Performanz aus. Bei diesen Algorithmen handelt es sich um schnelle Echtzeit-Algorithmen zur Objekterkennung von mehreren Objekten in einem Bild. YOLO besteht aus einem einzigen neuronalen Faltungsnetzwerk, welches gleichzeitig die Begrenzungsrahmen (engl. *Bounding Boxes*) und die Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten zu einer Klasse von Objekten innerhalb dieser Boxen vorhersagt. YOLO wird auf gesamten, annotierten Bildern trainiert und löst Regressionsprobleme zur Objekterkennung. Bei YOLO handelt es sich um einstufige Detektoren, sodass das trainierte Modell in einem einzigen Durchgang direkt auf das Eingangsbild angewendet wird. Der Algorithmus benötigt keine komplexen Verarbeitungsschritte, was zu einer schnellen Laufzeit in der Anwendung führt (Ansari, 2023, S. 279). YOLO wurde 2016 von Joseph Redmon et al. vorgestellt (Redmon et al., 2016) und über die Zeit wurden mehrere optimierte Versionen veröffentlicht. Die folgende Abbildung 2-8 zeigt die grundsätzliche Architektur des modernen YOLO v5 Netzwerks.

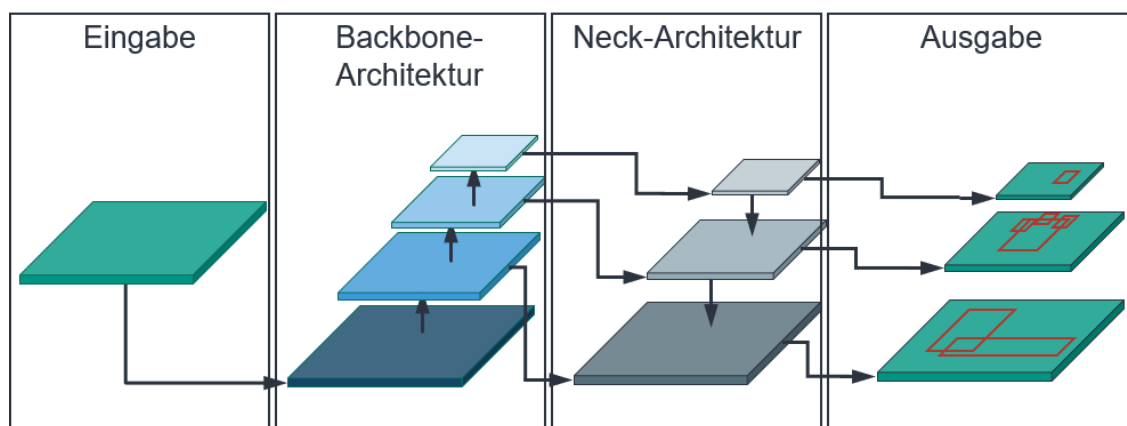


Abbildung 2-8: YOLO v5 Architektur (eigene Darstellung in Anlehnung an (Bochkovskiy et al., 2020))

In der Abbildung ist die Eingabe, die Backbone-Architektur, die Neck-Architektur und die Ausgabe dargestellt. Bei der Eingabe werden typischerweise Eingabebilder in den Formaten  $416 \times 416$  oder  $608 \times 608$  Pixel verwendet. Bei der Backbone-Architektur handelt es sich um den Hauptteil des Netzwerks, welcher für die Extraktion der grundlegenden Merkmale aus den Eingabebildern verantwortlich ist. Diese besteht typischerweise aus CNN, welche bereits vortrainiert sind. Im Beispiel des modernen YOLO v5 Algorithmus wird *CSP-Darknet53* eingesetzt. Die Neck-Architektur ist eine zusätzliche Komponente, welche die extrahierten Merkmale weiter verfeinert und die Genauigkeit der Erkennung erhöht. Bei YOLO v5 besteht die Neck-Architektur aus zwei Hauptmodulen: *Spatial Pyramid Pooling* und *Path Aggregation Network*. Als Ausgabe erzeugen die Algorithmen der YOLO-Familie Vorhersagen für drei Aspekte: Die Koordinaten der Bounding Boxes, den Objektwahrscheinlichkeitswert (*engl. Objectness Score*, die Wahrscheinlichkeit dass eine Rasterzelle ein Objekt enthält) und die Klassenvorhersage (die Wahrscheinlichkeit dass ein Objekt einer bestimmten Klasse zugehörig ist). Zur Optimierung der Algorithmen der YOLO-Familie können Anpassungen an der Architektur vorgenommen werden. Ein Beispiel ist das Hinzufügen von sogenannten Anchor Boxes in der Ausgabeschicht des Netzwerks. Bei diesen handelt es sich um eine Reihe von vordefinierten Bounding Boxes, die verwendet werden, um Objekte unterschiedlicher Formen und Größen darzustellen. Anstatt für jedes Objekt eine einzelne Bounding Box zu verwenden, wählt der Algorithmus diejenige Anchor Box, die am besten der Form und Größe des Objekts entspricht. Darüber hinaus kann die Head Structure, der Teil des Modells, welcher die letzten Schichten vor der Ausgabe repräsentiert, optimiert werden. Beispielsweise können zusätzliche Schichten und andere Verkettungsstrategie eingesetzt werden. Auch der Detection Layer kann angepasst werden, zum Beispiel indem Merkmale aus zusätzlichen Schichten berücksichtigt werden. Bei dem Detection Layer handelt es sich um die spezifische Schicht innerhalb der Head Structure, welche die Ausgabe darstellt.

Die genannten Vorteile der YOLO Architektur haben sich bereits in mehreren technischen Anwendungen zur Erkennung der sichtbaren Teile von Schraubverbindungen bewährt. So verwenden Brogan et al. Tiny-YOLO v2 in einer Anwendung zur Erkennung von Schrauben mit Phillips Kopfantrieb. Das Bildverarbeitungssystem erreicht eine durchschnittliche Genauigkeit von 92,6 %, 99,20 % und 98,39 % in verschiedenen Datensätzen. Die betrachtete Anwendung ist die automatisierte Demontage von Elektro Kleingeräten (Brogan et al., 2021). In der Arbeit von Li et al. setzt sich ein YOLO v5m6

basierter Algorithmus im direkten Vergleich der Performanz gegen unter anderem YOLO v4 und YOLO v5 Algorithmen durch. Die Autoren vergleichen verschiedene Algorithmen in der Anwendung auf Phillips Schraubkopfantrieben in Mobiltelefonen (J. Li et al., 2022). In dem Beitrag von Zhang et al. wird ein YOLO v5 Algorithmus verwendet für die Erkennung von Schraubkopfantrieben. In dem vorgestellten robotergeführten Demontage Endeffektor ist ein Bildverarbeitungssystem integriert, welches verschiedene Schraubkopfantriebe erkennt. Die Autoren stellen einen Ansatz vor, welcher nach der YOLO basierten Erkennung weitere Filter anwendet, um die Detektionsgenauigkeit weiter zu erhöhen (Zhang et al., 2023). Aus der häufigen Verwendung und der guten Performanz lässt sich ableiten, dass die YOLO-Architektur sich als vielversprechend für die Erkennung der sichtbaren Teile von Schraubverbindungen in der automatisierten Demontage etabliert hat. Eine übersichtliche Darstellung der einschlägigen Arbeiten hinsichtlich der Bildverarbeitung für die Schraubkopferkennung ist mit samt den vergleichbaren Kenngrößen in Form eines Critical Appraisal Tools in Tabelle 0-2 im Anhang angeführt.

Die Problemstellung der **Zustandsbewertung der sichtbaren Teile von Schraubverbindungen durch ein Bildverarbeitungssystem** wurde ebenfalls bereits durch die Forschungsgemeinschaft betrachtet. Ein bedeutender Beitrag auf diesem Gebiet wurde von Schlüter et al. geleistet. Die Autoren erarbeiten ein Verfahren zur Inspektion und Bewertung von Startermotoren im Remanufacturing. Mit ihrem Ansatz kann die Inspektion der Cores durchgeführt werden, um diese hinsichtlich der Erfüllung der Rücknahmekriterien zu bewerten (Schlüter et al., 2021). Besondere Aufmerksamkeit wird der Defekterkennung in 2D Bildern gewidmet, wobei insbesondere die Korrosionsdetektion als zentrales Thema hervorgehoben wird. Die Korrosionsdetektion bei den sichtbaren Teilen von Schraubverbindungen bildet einen wichtigen Bestandteil der Zustandsbewertung in der automatisierten Demontage und wird daher im Folgenden eingehender betrachtet.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Verfahren zur Korrosionsdetektion entwickelt und vorgestellt. In dem Beitrag von Petricca et al. werden konventionelle Methoden der Bildverarbeitung mit lernenden Verfahren verglichen. Die Autoren stellen fest, dass die Deep-Learning-Techniken, welche die entsprechenden Merkmale automatisch und ohne Einbeziehung von Vorwissen erkennen, die traditionellen Methoden der Bildverarbeitung überbieten. In dem Beitrag werden die Eingangsbilder als Mischung von

Bildern mit korrodierten Flächen in Bauwerken (z. B. Bildern von Brücken, Metallblechen usw.) und Bildern, welche keine Korrosionsmerkmale enthalten (z. B. Bilder aus Wüstenlandschaften, Bilder von roten Apfelbäumen) ausgeführt. Der Beitrag untersucht somit ausschließlich die Bildklassifikation, zeigt aber bereits das Potential von lernenden Methoden (Petricca et al., 2016).

Für die Aufgabe der Segmentierung von korrodierten Bereichen evaluieren Atha und Jahanshahi die Leistung der Korrosionsdetektion von verschiedenen CNN. Es werden verschiedene VGG- Modelle und das ZF Net Modell hinsichtlich der Performanz verglichen. Die Autoren stellen in dem Beitrag auf Basis der Vergleiche zwei Deep-Learning-Netzwerke für die Korrosionsdetektion mit unterschiedlichen Netzwerktiefen vor und halten fest, dass tiefere Netzwerke genauere Ergebnisse liefern (Atha & Jahanshahi, 2018).

Liu et al. schlagen in ihrem Beitrag ein auf VGG19 basierendes Faster-RCNN Netzwerk zur Korrosionsdetektion vor (L. Liu et al., 2018). Holm et al. vergleichen die Leistung verschiedener Deep-Learning-Netzwerke in der Korrosionsdetektion und stellen fest, dass das VGG16 Modell die besten Ergebnisse erzielt (Holm et al., 2020). Papamarkou stellt in seinem Beitrag heraus, dass die Korrosionsdetektion unter Verwendung von ResNet Modellen mit unterschiedlichen Tiefen auf Metalloberflächen angewendet werden kann (Papamarkou et al., 2021). Es lässt sich festhalten, dass die Korrosionsdetektion ein zentraler Bestandteil der Zustandsbewertung der sichtbaren Teile von Schraubverbindungen durch ein Bildverarbeitungssystem ist. Aktuelle Forschungsbeiträge und technische Entwicklungen setzen dabei vorwiegend auf lernende Modelle der Bildverarbeitung. Dennoch hat sich bislang keine spezifische Netzwerkarchitektur eindeutig als überlegen herausgestellt.



## 2.6 Informationsmodellierung für die automatisierte Demontage

Zur Automatisierung der Demontage sind der Austausch und die Auswertung von Informationen über Produkt und Prozess unerlässlich. Laili et al. stellen den Bedarf an strukturierten Informationen in der automatisierten Demontage wie folgt heraus: „Die Demontage wird durch das Verständnis und die Interpretation mechanischer Strukturen auf reaktive Weise geplant und durchgeführt. So wäre ein Roboter beispielsweise in der Lage, Schrauben an einem Produkt zu erkennen und zu lokalisieren und die Folgen ihrer Entfernung vorherzusehen. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, wie eine komplexe physikalische Struktur in einer mathematischen Sprache mit minimalem Verlust an räumlicher Information dargestellt werden kann. Eine solche Sprache ermöglicht es Computern, Demontagesequenzen und -verfahren zu interpretieren/zu planen/umzuplanen. Es ist auch eine Herausforderung, räumliche Informationen aus 3D-Vision-Sensoren zu extrahieren; obwohl dies mit CAD-Daten möglich ist, muss eine solche Funktionalität für die Demontage erst noch entwickelt werden.“ (Laili et al., 2022, S. 24)

Es sind demnach maschinenverständliche Informationsmodelle zur Abbildung der physikalischen Eigenschaften und charakteristischen Prozessgrößen erforderlich. Da die Herausforderung der Wissensdarstellung eng verknüpft ist mit der grundsätzlichen Frage, was Wissen ist, bedient sich der Bereich der Informatik an dieser Stelle des Begriffs der *Ontologie*, der ursprünglich aus der Philosophie stammt. Im Kontext von Informationsmodellen für digitale Systeme (z. B. automatisierten Produktionsanlagen) wird unter einer Ontologie eine *formale Beschreibung von Konzepten und deren Relationen* verstanden (Gruber, 1993). Die Anwendung von Ontologien zur Beschreibung von Informationen findet typischerweise mit standardisierten Auszeichnungssprachen (engl. *Markup Language*) statt. Beispiele dafür sind die Extensible Markup Language (*XML*), Notation3 und JavaScript Object Notation (*JSON*). In der Domäne der Automatisierungstechnik seien als Beispiele die Systems Modeling Language (*SysML*), AutomationML und PLCOpen XM genannt. Die zugrunde liegende Logik wird als Resource Description Framework (*RDF*) bezeichnet. Die mittels einer Ontologie getroffenen Festlegungen ermöglichen die Modellierung von verschiedensten Informationen in den unterschiedlichsten Anwendungen. Durch die große Aufmerksamkeit, welche die automatisierte Demontage aus der Forschung und Industrie bereits erhalten hat, gibt es nahezu ebenso viele unterschiedliche Informationsmodelle wie Automatisierungslösungen. Häufig verwendete Konzepte beinhalten Demontage-Matrizen, UND/ODER-Graphen

sowie Liaison-Diagramme. Für eine umfassende Darstellung der verschiedenen Modellierungskonzepte wird an dieser Stelle auf ergänzende Literatur verwiesen (Laili et al., 2022; Vongbunyong & Chen, 2015).

Die Anwendung von Ontologien zur Wissensbeschreibung in der automatisierten Demontage ist kein neuartiger Ansatz. Einer der ersten Beiträge, welche diesen Ansatz verfolgen, wird von Borst et al. vorgestellt. Die Autoren setzen ein System auf Basis einer Ontologie zur automatisierten Ableitung von Demontagesequenzen um, und vergleichen die Demontagesequenzen miteinander, um die am besten geeignete herauszustellen (Borst & Akkermans, 1997). Auch in modernen Beiträgen werden Ontologien zur Wissensbeschreibung verwendet. Vorrangig finden diese Anwendung zur Generierung von Demontagesequenzen. Exemplarisch sind dazu die Beiträge (Beck et al., 2021; Foo et al., 2021a; Klein et al., 2021; Pfrommer et al., 2022) zu sehen.

Neben dem Konzept der Ontologien verwenden fast alle der in Kapitel 2.4 aufgezeigten bestehenden Anwendungen auch eigene Informationsmodelle für die Darstellung der Maschinen, Anlagen, Prozesse und Produkte. Die Ansätze lassen sich anhand der Modellierungsebenen unterteilen:

- Geometrische Informationen: Betrachtet wird die Ausdehnung von Objekten und deren Position und Orientierung im Raum.
- Topologische Informationen: Sie erweitern die geometrischen Informationen um Beziehungen zwischen den Objekten.
- Semantische Informationen: Sie betreffen die Art und Struktur der Objekte.

Ein im speziellen Anwendungsfall der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen herausstechendes Informationsmodell findet sich in der Arbeit von Jungbluth wieder (Jungbluth, 2019). Es wird ein Produktmodell vorgestellt, welches spezifische Eigenschaften der Verbindungselemente enthält. Auf Grundlage der Informationen im Produktmodell werden die Demontageoperationen durchgeführt. Eine Schraubverbindung wird in dem Beitrag anhand der folgenden Parameter spezifiziert: *Entschraub-Roboterwerkzeug, Entschraublage, Manuelles Werkzeug, Schraubenantrieb, Rechtsgewinde, Gewindesteigung und Gewindelänge im Eingriff*. Ein anderes Beispiel für ein dediziertes Informationsmodell in der automatisierten Demontage findet sich in der Dissertationsschrift von DiFilippo wieder (N. D. DiFilippo, 2016). In diesem Beitrag wird eine Portal-Kinematik für die Demontage von Laptops genutzt. Zur Modellierung von Informationen wird die sogenannte SOAR-Architektur (Akronym für *State, Operator*

*Apply Result*) verwendet. Bei dieser Architektur handelt es sich um eine kognitive Architektur, mit der Agenten befähigt werden, Aufgaben auszuführen und alle Arten von Wissen zu modellieren. Der Ansatz verfolgt das Ziel, diejenigen Mechanismen und Strukturen zu definieren, welche der menschlichen Kognition zugrunde liegen. In der Anwendung der automatisierten Demontage wird darüber ein autark lernendes System realisiert. Bereits innerhalb weniger Demontagevorgänge werden semantische und topologische Informationen erhoben.

Neben dem zugrunde liegenden Informationsmodell ist auch eine geeignete Systemarchitektur für die Anlagentechnik der automatisierten Demontage erforderlich. In diesem Bereich gibt es bereits vielversprechende Ansätze. Einen wesentlichen Beitrag stellt die sogenannte RoViDiAsS-Architektur (*Robotic Visual Disassembly and Assembly System*) dar. Bei dieser handelt es sich um eine Systemarchitektur, welche die Kombination von CAD-Daten mit Bilddaten ermöglicht, um die Task-basierte Demontageplanung und Demontagedurchführung zu realisieren. Die vorgestellte Architektur ermöglicht eine flexible Motion-Primitive-basierte Demontage. Die Arbeit legt besonderen Fokus auf die situationsbedingte Reaktion des Roboters (Christian Friedrich et al., 2016).

Weitere dedizierte Beiträge zu Systemarchitekturen finden sich auch in den Arbeiten von Vongbunyong et al. Die vorgestellte Systemarchitektur strukturiert das vorhandene Wissen über die Demontageobjekte mithilfe von Liaison-Diagrammen. Der Informationsfluss der einzelnen Assets der Demontagezelle mit dem zentralen Controller geschieht über einen Wissensspeicher, dessen Aufbau jedoch nicht im Detail beschrieben wird. Bemerkenswert an diesem Beitrag ist der verfolgte Modularitätsansatz der Architektur. Dieser trägt wesentlich zur Flexibilität des Gesamtsystems bei (Vongbunyong et al., 2013a, 2013b).

Auch in der industriellen Praxis müssen Informationen zu Produkten und Prozessen in der Montage und Demontage ausgetauscht werden. Um diesen Informationsfluss vor dem Hintergrund inhomogener CAD-Landschaften zu ermöglichen, hat sich die Standardisierung von Nomenklaturen etabliert. Darüber hinaus bieten industrielle Zweckverbände wie die ecl@ss e. V. technische Regeln für Nomenklaturen an<sup>6</sup>. Die ecl@ss-Umgebung, welche den Austausch von Produktstammdaten in der industriellen Praxis

---

<sup>6</sup> ECLASS e. V. (2023), Enable your global business and digitization. [www.eclass.eu](http://www.eclass.eu) [19.07.2025]

fokussiert, stellt eine eigene Ontologie zur Verfügung für die digitale Fertigung. Um diesen Standard auch in der automatisierten Demontage anzuwenden, wäre eine Erweiterung der Klassen um demontagespezifische Informationen erforderlich.

Eine Alternative wird durch die Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. erarbeitet. Die Arbeitsgruppen dieser Vereinigung haben ein universelles Beschreibungsformat entwickelt, das sogenannte *extended master connection file* (xMCF)-Format. Dieses dient der Darstellung von Verbindungen, insbesondere von Produkten, in der Automobiltechnik (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020). Die folgende Abbildung 2-9 zeigt schematisch die Modellierungsansätze des Formates. In der Dissertationsschrift von Kreis wird dargelegt, wie dieses Beschreibungsformat in der Entwicklung von Karosserieteilen angewendet werden kann (Kreis, 2020).

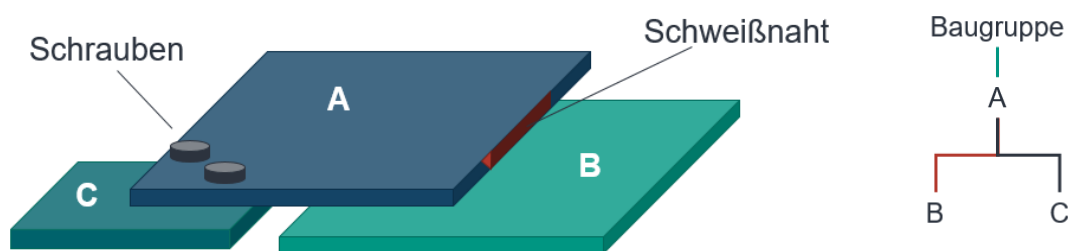


Abbildung 2-9: Modellierungsansätze im xMCF-Format (eigene Darstellung in Anlehnung an (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020))

## 2.7 Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage

In Kapitel 2.3 wurde herausgestellt, dass die bei der Demontage angewendeten Prozesse bedeutend schwerer zu automatisieren sind als Montageprozesse. Beim Entschrauben können die Umwelteinflüsse, die während des Lebenszyklus auftreten, eine zerstörungsfreie Demontage sogar unmöglich machen. Bei Fehlschlägen während der automatisierten Demontage können Teile der zerstörten Verbinder im Core verbleiben und müssen dann in manueller Nacharbeit entfernt werden. Dies fällt zu Lasten der OEE. Diese Minderung der OEE ließe sich vermeiden, wenn bereits vor Beginn der Demontage die Demontierbarkeit bewertet werden würde. Allerdings sind derzeit bekannte Modelle aus der Verbindungstechnologie nicht geeignet, die Demontierbarkeit a priori zum Prozess zu bewerten.

Zugleich gibt es bereits Ansätze, in denen Prozessmodelle zur Steuerung und Regelung von komplexen Systemen Anwendung finden, zum Beispiel bei der modellprädiktiven Regelung (engl. *Model Predictive Control, MPC*). Die Grundidee der MPC lässt sich vereinfacht beschreiben als „Vorhersage des zukünftigen Systemverhaltens mithilfe eines Systemmodells, das Messungen oder Schätzungen des aktuellen Zustands des Systems und eine hypothetische zukünftige Eingangstrajektorie oder Rückkopplungssteuerungspolitik enthält“ (Kouvaritakis & Cannon, 2016, S. 14, Übersetzung des Autors). MPC setzt somit auf Regelungsansätze, die ein explizites Prozessmodell nutzen, um das zukünftige Systemverhalten vorherzusagen. Die Performanz des Regelalgorithmus wird unmittelbar auch durch die Prozessmodellgüte bestimmt. Im betrachteten Anwendungsfall, der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen, müssen die auftretenden Drehmomentverläufe der Schraubverbindung durch Prozessmodelle beschrieben werden.

Die Ansätze der MPC lassen sich jedoch nicht direkt auf den betrachteten Anwendungsfall anwenden. Durch die Einflüsse während des Lebenszyklus auf die Verbindungselemente wären die Prozessmodelle sehr stark von dem individuellen Zustand abhängig. Begegnet werden kann den individuellen Zuständen durch selbstlernende Prozessmodelle für die automatisierte Demontage. Die Prozessmodelle müssen in der Lage sein, ihre Prädiktion auf Basis von Daten, welche vor und während der Demon-

tage gesammelt werden, zu verbessern und sich an veränderte Randbedingungen anzupassen. Dadurch sollen etwaige auftretende Prozessfehlschläge bereits vor dem Auftreten erkannt und verhindert werden.

Aus den Arbeiten im derzeitigen Stand von Forschung und Technik sind Prozessmodelle für die a posteriori-Bewertung hervorgegangen. So wird in dem von der DFG geförderten Vorhaben am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie *FSReman – Funktionsmodellierung von Schraubenverbindungen bei ungewissen Produktzuständen für das Remanufacturing* die datengetriebene Funktionsmodellierung von Schraubverbindungen im Remanufacturing adressiert<sup>7</sup>. Dazu sollen experimentell die Umwelteinflüsse auf die Prozessgrößen bei der Demontage von Schraubverbindungen ermittelt werden. Speziell die Reibungszahl im Gewinde ist beim erneuten Setzen nach der Demontage der Schraubverbindung Betrachtungsgegenstand. Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung der vorliegenden Dissertationsschrift hat allerdings noch keine Publikation von Ergebnissen zu dem Untersuchungsgegenstand stattgefunden.

Mit der Zielstellung, eine Demontierbarkeitsbewertung von Cores vorzunehmen, befasst sich die Arbeit von Vanegas & Peeters et al. Am Produktbeispiel von Flachbildfernsehern stellen die Autoren eine Methode zur Bewertung der Komplexität der Demontage vor. Dabei wird indes das gesamte Produkt betrachtet und es werden keine Prozessmodelle für das automatisierte Entschrauben an sich angeführt. Die entwickelte Methode lässt a priori-Aussagen zu der Demontagezeit zu (Vanegas et al., 2018). Vergleichbare Ansätze werden auch von B. Zhu und Roy vorgestellt. Die Autoren bewerten die Demontierbarkeit anhand des Zerstörungsgrades der Verbindungselemente, gehen allerdings nicht auf die speziellen Eigenschaften von Schraubverbindungen ein (B. Zhu & Roy, 2015).

---

<sup>7</sup> Deutsche Forschungsgemeinschaft (2022), *FSReman – Funktionsmodellierung von Schraubenverbindungen bei ungewissen Produktzuständen für das Remanufacturing*. Projektnummer 525034540. <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/525034540> [19.07.2025]

## 2.8 Bewertung des Standes von Forschung und Technik

Im folgenden Abschnitt wird eine Zusammenfassung des Standes von Forschung und Technik in den betrachteten Ebenen der automatisierten Demontage dargestellt. Anhand dieser werden diejenigen Forschungsdefizite herausgestellt, welche im Rahmen der vorliegenden Arbeit adressiert werden. Das Kapitel schließt mit einer Aufstellung von Lösungsansätzen, welchen in den folgenden Kapiteln nachgegangen wird. Die Reihenfolge der Nennung der herausgestellten Forschungsdefizite folgt dem strukturierten Ablauf technisch-konstruktiver Arbeiten. Zunächst werden die Anforderungen herausgestellt, welche sich in der vorliegenden Arbeit aus theoretischen Modellen der wesentlichen Prozessgrößen ableiten. Im Anschluss folgt die technische Konzeption und Realisierung.

### 2.8.1 Fazit zum Stand von Forschung und Technik

Die automatisierte Demontage hat eine intensive Betrachtung durch die Forschung und Industrie erhalten. Dennoch gibt es weiteren Forschungsbedarf, der sich anhand der aufgezeigten Forschungsdefizite charakterisieren lässt.

#### *Defizit 1 – Prozessmodelle in der automatisierten Demontage bestehen bisher nur mit a posteriori-Charakter*

Die Betrachtung von Arbeiten zur Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage zeigt, dass der vielversprechende Ansatz, Prozessmodelle in die automatisierte Demontage zu integrieren, nur mit reaktivem Charakter betrachtet wurde. Im etablierten Forschungsfeld der Verbindungstechnologie existieren bereits Modelle über die charakteristischen Prozessgrößen der Demontage von Schraubverbindungen und die wesentlichen Wirkzusammenhänge sind bekannt. Die Prozessmodelle, von denen eine Auswahl in Kapitel 2.3 vorgestellt wurde, werden in aktuellen Arbeiten zwar in Laufzeitanwendungen umgesetzt, allerdings mit Daten, welche erst während der Demontageprozesse erhoben werden. Eine dedizierte Untersuchung zum Potential des Einsatzes von a priori angewendeten Prozessmodellen in Form von vorhergesagten Prozessgrößen in der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen hat noch nicht stattgefunden. Der Ansatz könnte eine Steigerung der OEE hervorrufen, was bereits durch modellprädiktive Regelungsansätze gezeigt wurde. Die dafür erforderliche Kenntnis der Umwelteinflüsse aus der Lebensphase einer Schraubverbindung auf den

Demontageprozess ist teilweise noch unbekannt und bedarf weiterer Forschungsarbeit. In diesem Kontext wurde nicht umfassend untersucht, wie übertragbar die bestehenden Prozessmodelle zur Montage von Schraubverbindungen auf den Anwendungsfall der automatisierten Demontage sind.

### *Defizit 2 – Fehlen eines Informationsmodells zur Anwendung der Prozessmodelle*

Um die Prozessmodelle in eine automatisierte Anwendung zu überführen, ist ein geeignetes Informationsmodell erforderlich. In Kapitel 2.6 wurde aufgezeigt, dass ein solches direkt anwendbares Modell derzeit nicht existiert. Die Forschungsbeiträge von (Beck et al., 2021; Foo et al., 2021a; Klein et al., 2021; Pfrommer et al., 2022) befassen sich mit einer universellen Ontologie für das Remanufacturing. Durch den Fokus auf die Generierung von Demontagesequenzen werden allerdings wesentliche Informationen für die automatisierte Schraubendemontage nicht mit betrachtet. Aus diesem Grund sind die vorgestellten Lösungen nicht direkt anwendbar auf die Problemstellung der vorliegenden Arbeit. Eine spezifische Untersuchung, wie Informationsmodelle für die Demontage beschaffen sein müssen, um geometrische und topologische Informationen zu integrieren, ist darüber hinaus kein Betrachtungsgegenstand in der Arbeit von (Christian Friedrich et al., 2016). Auch die von DiFilippo untersuchte Anwendung der SOAR-Architektur in der Demontage liefert nicht die erforderliche Detailgenauigkeit für die in dieser Arbeit adressierte Problemstellung. Detaillierte Informationen über die Verbindungstechnik werden in der Umsetzung nicht wiedergegeben. Das extended master connection file Format (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020) bietet entsprechend dem aktuellen Stand der Technik die aussichtsreichsten Chancen für eine Anwendung in der automatisierten Demontage. Es erscheint plausibel, dass das bestehende Informationsmodell xMCF durch die Integration zusätzlicher, nach dem aktuellen Stand der Technik bekannter Informationen erweitert werden kann, um die automatisierte Demontage zu ermöglichen.

### *Defizit 3 – Aktuelle Bildverarbeitungssysteme sind nicht ausreichend genau für die automatisierte Demontage*

Der Stand der Forschung bezüglich der Erkennung der sichtbaren Teile von Schraubverbindungen, also der Identifikation und Lokalisation von Schraubenkopfantrieben sowie der Zustandsbewertung der sichtbaren Teile von Schraubverbindungen, wurde in



Kapitel 2.5 erläutert. Es hat sich gezeigt, dass die zuverlässige Detektion von Verbindungselementen aktuell eine Herausforderung darstellt. Bestehende Bildverarbeitungssysteme sind nicht ausreichend genau zur Kompensation der in der automatisierten Demontage auftretenden Schwankungen der Produktzustände. Die vorhandenen Modelle und Lösungen betrachten nicht die erforderliche Anzahl verschiedener Schraubenkopftriebe, was dazu führt, dass die Systeme auf das Vorwissen oder die Benutzereingaben angewiesen sind. Zugleich bieten die auf maschinellem Lernen basierenden Verfahren vielversprechende Ansätze für die Umsetzung der geforderten Flexibilität. Insbesondere die YOLO-Architektur hat sich in den bisherigen Ansätzen als aussichtsreich dargestellt. Bezogen auf die Zustandsbewertung lässt sich festhalten, dass aktuelle Forschungsbeiträge vorwiegend auf lernende Modelle der Bildverarbeitung setzen. Bislang hat sich keine spezifische Netzwerkarchitektur in dem Anwendungsfall eindeutig als überlegen herausgestellt.

*Defizit 4 – Bestehende Demontageanlagen sind sehr stark auf das jeweilige Produkt und den Demontageprozess spezialisiert*

Die Analyse von automatisierten Demontageanlagen für eine teilzerstörende Demontage, in denen flexible Roboterwerkzeuge für die automatisierte Schraubendemontage entstanden sind, erfolgte in Kapitel 2.4. Es hat sich gezeigt, dass bestehende Anlagen sehr stark spezifiziert an das Produkt und den Demontageprozess sind. Somit wird der jeweiligen Demontageanlage nur ein spezifisches, eng abgestecktes Produktspektrum zugeordnet. Dies betrifft insbesondere die Endeffektoren, da diese spezifisch an das Produkt und den Produktzustand angepasst werden. Die Wandlungsfähigkeit der Endeffektor-Kinematiken wird nicht im Detail betrachtet. Die Anpassungsfähigkeit vorhandener Demontagesysteme und Roboterwerkzeuge ist für eine wirtschaftliche Umsetzung weiterer Remanufacturing Anwendungen in Hochlohnländern insgesamt nicht ausreichend. Die bisher genutzten Demontageanlagen sind von vorher bekannten Produktdaten, wie zum Beispiel CAD-Daten, abhängig.

In Abbildung 2-10 sind die wesentlichen Beiträge der betrachteten Ebenen der automatisierten Demontage tabellarisch zusammengefasst. Zur übersichtlichen Einordnung werden die Beiträge ideografisch charakterisiert. Angemerkt sei, dass die in den Kapiteln 2.4 bis Kapitel 2.7 vorgestellten Arbeiten bewusst nur Beiträge für die relevanten

Ebenen dieser Dissertation enthalten. Für eine umfassende Darstellung der angrenzenden Forschungsfelder im Bereich der roboterbasierten Demontage sei auf dedizierte literarische Rezensionen verwiesen (Poschmann et al., 2020a; Priyono et al., 2016; Sprenger et al., 2021; Vongbunyong & Chen, 2015).

Flexible Endeffektoren für die automatisierte Demontage von Schraubverbindungen																																		
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Bildverarbeitung für die Erkennung und Zustandsbewertung von Schraubverbindungen																																		
●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Informationsmodellierung für die automatisierte Demontage																																		
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage																																		
○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Legende: ○ Keine Betrachtung ● Betrachtet ● Fokus der Arbeit																																		

Abbildung 2-10: Zusammenfassung des Standes von Forschung und Technik

## 2.8.2 Zusammenfassung der Forschungsdefizite und Lösungsansätze

Eine Lösung der in dieser Arbeit adressierten Problemstellung von Prozessfehlschlägen in der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen, deren technischen Eigenschaften sich durch den Lebenszyklus verändert haben, bietet großes Potenzial zur Realisierung von automatisierten Remanufacturing-Anwendungen auch in Hochlohnländern. Die vorhergehenden Kapitel haben herausgestellt, dass der derzeitige Stand der Forschung nicht ausreichend ist, um das größte Problem bei der Demontage von EoL-Produkten zu lösen – die Unsicherheit.

Zur Präzisierung der Zielsetzung im nachfolgenden Kapitel 3 werden in Abbildung 2-11 die herausgestellten Forschungsdefizite gemeinsam mit den in den nachfolgenden Kapiteln verfolgten Lösungsansätzen aufgezeigt.

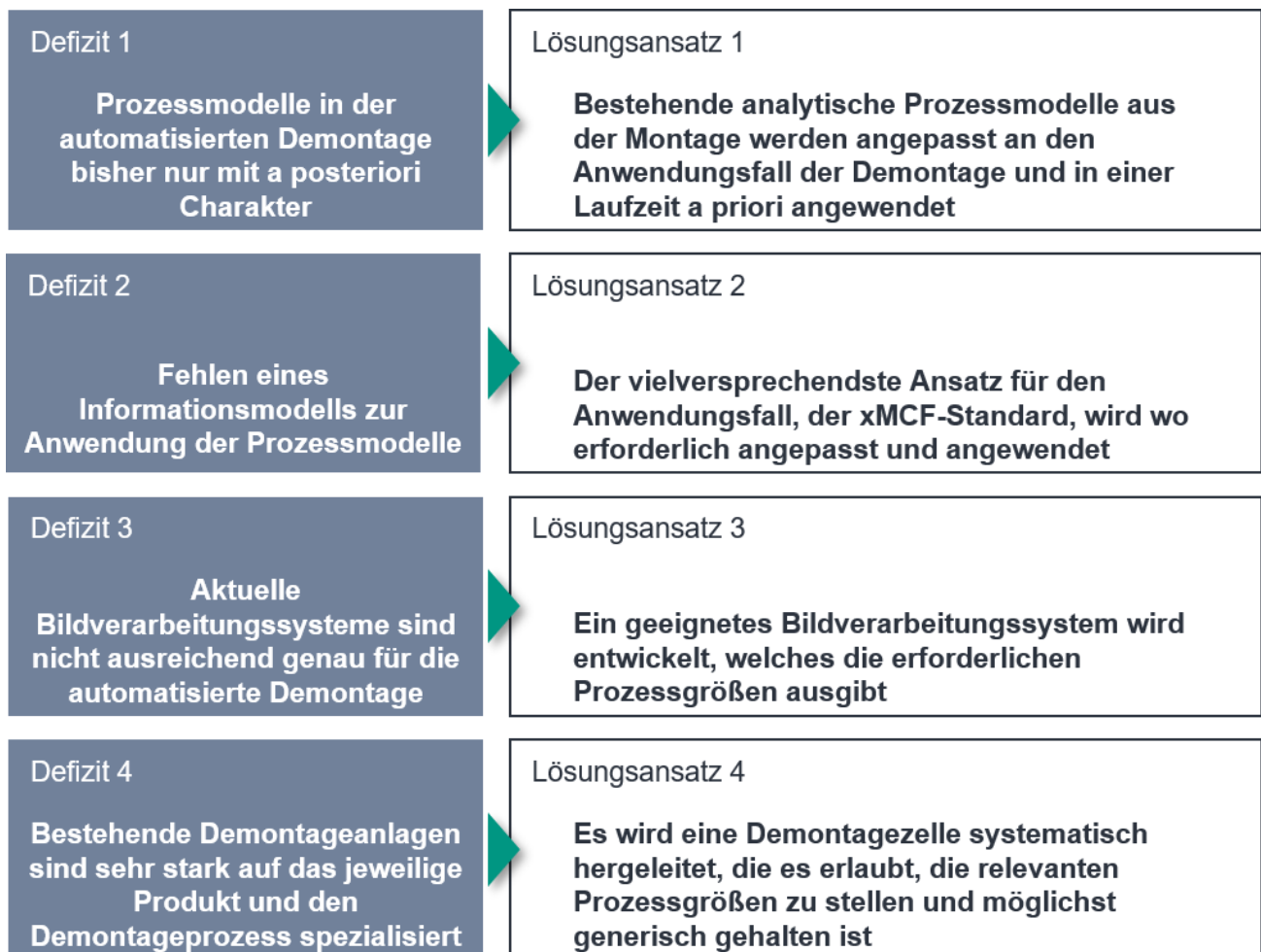


Abbildung 2-11: Aktuelle Defizite der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen und Lösungsansätze

### 3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Abschnitt werden zunächst die herausgestellten Forschungsdefizite mitsamt der in dieser Arbeit verfolgten Zielsetzung konkretisiert. Ausgehend von dieser Analyse findet die Darstellung der angestrebten Vorgehensweise zur Zielerreichung statt.

#### 3.1 Präzisierung der Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit adressiert das Problem der Prozessfehlschläge in der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen, deren technischen Eigenschaften sich durch den Lebenszyklus verändert haben. In vorhergehenden Arbeiten des derzeitigen Standes von Forschung und Technik wurde die Demontage von Schraubverbindungen mithilfe von industriellen Robotersystemen bereits automatisiert und die für die Demontage erforderliche Anpassungsfähigkeit wurde teilweise adressiert. Durch die Einflüsse während des Lebenszyklus der Cores kann es jedoch mit den derzeitigen technischen Realisierungen zu Prozessfehlschlägen kommen, welche die OEE der Anlagen negativ beeinflussen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine Analyse des Potentials, welches von der Integration von Modellen zum Demontage-Verhalten von Schraubverbindungen zur Steigerung der Robustheit bei anpassungsfähigen Demontagesystemen ausgeht. Es soll im Speziellen einerseits ein Beitrag zur Steigerung der Robustheit von automatisierten Demontageanlagen geleistet werden und andererseits Forschungslücken im Bereich der Schraubtechnik geschlossen werden. In praktischen Versuchen soll das Wissen über relevante Wirkzusammenhänge in der Demontage ergänzt werden und wandlungsfähige Roboterwerkzeuge entwickelt werden, welche mit einer geeigneten Prozessführung in einem entsprechenden Software-Framework betrieben werden. Der Ansatz soll eine a priori-Bewertung des Demontageprozesses beinhalten und Nutzereingaben möglichst vermeiden. Das Software-Framework soll die Interaktion mit anderen (De-)Montagezellen ermöglichen und möglichst universell gestaltet sein. Es soll systematisch eine roboterbasierte Demontagezelle entwickelt werden, die in praktischen Versuchsreihen zur Validierung des Ansatzes zur Robustheitssteigerung eingesetzt wird. Die Zelle soll so gestaltet werden, dass sie anpassungsfähig entsprechend der Anforderungen der automatisierten Demontage ist. Dies wird anhand der Demontage

von Cores bemessen, die bereits nach dem aktuellen Stand von Forschung und Technik in manuellen Remanufacturing-Anwendungen verarbeitet werden. Im Detail ergeben sich aus den Forschungsdefiziten die folgenden Teilziele der vorliegenden Arbeit:

**Teilziel 1** ist der Aufbau von Prozessmodellen für die a priori-Bewertung des möglichen Drehmoment-Prozessfensters beim automatisierten Entschrauben, welche mit fortschreitender Anzahl von Demontageoperationen eine höhere Genauigkeit erreichen. Die Ergebnisse der Modelle sollen auf die Sollwertvorgaben des Roboterwerkzeugs und die Sollwertvorgaben der Steuerung der Gesamtanlage angewendet werden. Um die Modelle in die praktische Anwendung zu bringen, soll der xMCF-Standard verwendet werden.

**Teilziel 2** ist die systematische Konzeption einer roboterbasierten Demontagezelle für die automatisierte Demontage von Schraubverbindungen. Diese soll instande sein, die relevanten Prozessgrößen der Prozessmodelle zu ermitteln bzw. zu stellen und zugleich möglichst flexibel gegenüber dem Spektrum an demontierten Cores sein.

**Teilziel 3** umfasst die mechatronische Realisierung, den Aufbau und die Inbetriebnahme der Demontagezelle mitsamt Endeffektor. Darüber hinaus sollen die entwickelten Module steuerungstechnisch integriert und bis zur Funktionstüchtigkeit optimiert werden. Es soll ein Bildverarbeitungssystem entstehen, durch welches die erforderlichen Prozessgrößen ermittelt werden können.

**Teilziel 4** ist die Validierung der Prozessmodelle anhand von experimentellen Versuchsreihen. Die Modelle sollen auf der konzipierten Demontagezelle in die praktische Anwendung der prädiktiven Prozesssteuerung gebracht werden. Mit der Validierung soll das Potential analysiert werden, welches von der Integration der Modelle zum Demontage-Verhalten von Schraubverbindungen zur Steigerung der Robustheit ausgeht.

### 3.2 Vorgehensweise zur Zielerreichung

Das Vorgehen zur Erreichung der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Ziele ist in fünf Schritte unterteilt und wird in untenstehender Abbildung 3-1 visualisiert.

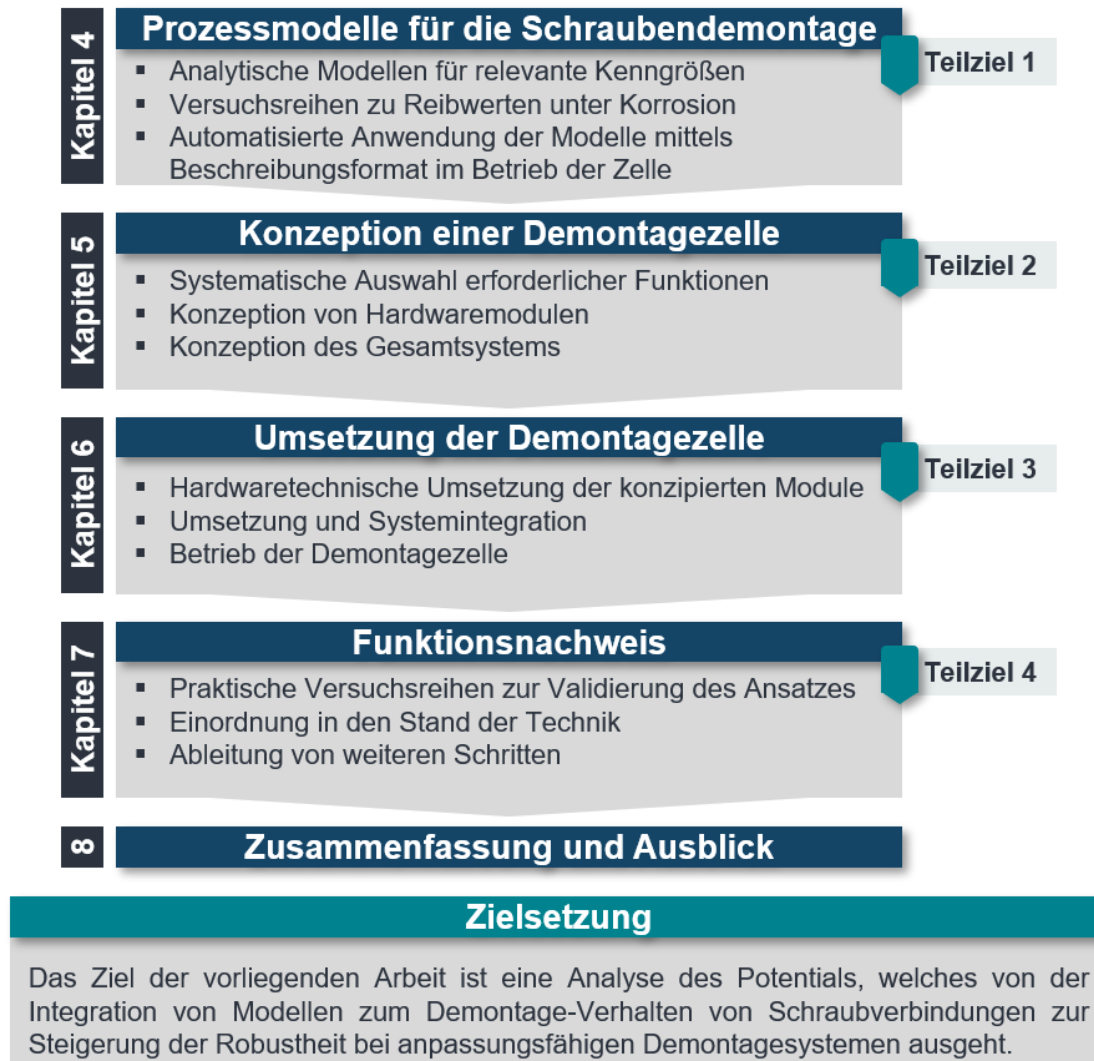


Abbildung 3-1: Ansatz zur Zielerreichung

Im ersten Schritt werden lernende Modelle für die Sollwertvorgaben des Roboterwerkzeugs und die Sollwertvorgaben der Steuerung der Gesamtanlage auf Basis eines integrierten Informationsmodells erarbeitet. Die Modelle stützen sich auf Ansätze entsprechend dem aktuellen Stand der Technik und werden durch Referenzversuche zur Bestimmung der Einflüsse aus dem Lebenszyklus einer Schraube ergänzt. Somit werden die Modelle für den vorliegenden Anwendungsfall der automatisierten Demontage

qualifiziert. In diesem Zusammenhang erfolgen auch die Erarbeitung der Systemarchitektur sowie die systematische Erweiterung des Informationsmodells.

Im zweiten Schritt findet die Konzeption der Demontagezelle und des Endeffektors nach dem Vorgehensmodell VDI 2221 statt. Die präzisierten Anforderungen ergeben sich aus den zuvor aufgestellten analytischen Prozessmodellen und besonders aus den Anforderungen an Sensorik und Aktorik. Mithilfe einer Analyse der menschlichen Demontage- und Anpassungsfähigkeit werden ergänzende Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit der Anlage herausgestellt, welche aus dem Anwendungsfall des Remanufacturing resultieren. Der Übertrag der Erkenntnisse findet durch die Erweiterung einer Schraubspindel um erforderliche Funktionen statt. Dazu werden in der Gestaltungsphase die Morphologie des Endeffektors und realisierbare Module erarbeitet. Es werden Lösungsmöglichkeiten entwickelt, indem gezielt alternative Technologien untersucht werden. Im dritten Schritt wird eine roboterbasierte Demontagezelle mechatronisch aufgebaut und bis zur Reife optimiert. Die konzipierten Module werden hardwaretechnisch umgesetzt und erforderliche Softwareelemente werden implementiert. Die Validierung findet in einem vierten Schritt anhand von praktischen Versuchen statt. Mithilfe dieser Versuchsreihen wird das Potential analysiert, welches von der Integration der Modelle ausgeht. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeit und es wird ein Ausblick auf das anschließende Forschungspotential gegeben.

## 4 Prozessmodelle für die Schraubendemontage

Die vorhergehenden Kapitel haben aufgezeigt, dass die Robustheit der automatisierten Demontage eine spezielle Herausforderung für die Produktionstechnik darstellt, bedingt durch die ungünstigen Randbedingungen. Die Einflüsse während der Lebensphase Betrieb sorgen für einen individuellen Zustand der Cores und Verbindungselemente bei der Demontage, dem nur mit intelligenter Sensorik und modernen Regelstrategien begegnet werden kann. Zugleich ist eine hohe Robustheit des Demontagesystems erforderlich, um aufwendige manuelle Nacharbeit, hervorgerufen durch eine fehlerhafte Demontage, zu vermeiden. Im Sinne einer hohen OEE und damit einer hohen Wirtschaftlichkeit gilt es, die automatisierte Demontage robust zu gestalten. In diesem Kapitel wird ein theoretischer Ansatz vorgestellt, der die Robustheit der automatisierten Demontage erhöht, indem Wissen aus der Montagetechnik sowie lernende Methoden verwendet werden, um wesentliche Prozessgrößen zu modellieren. Die Ergebnisse dieser Modelle werden vor der Demontage durch das Steuerungssystem ausgewertet und durch geeignete Reaktionen in dem Demontagesystem praktisch umgesetzt. Die Anwendung der Modelle macht die maschinenverständliche Darstellung von Informationen erforderlich. Dazu wird nachfolgend ein Beschreibungsformat für die Informationsmodellierung und den Austausch der während der Demontage erhobenen Informationen entwickelt. Das Kapitel schließt mit einer Validierung der aufgestellten Modelle.

### 4.1 Ableitung der charakteristischen Prozessgrößen

Zur Ableitung der charakteristischen Prozessgrößen der automatisierten Schraubendemontage wird ein typischer Entschraubvorgang anhand des in Kapitel 2.3 vorgestellten Trennprozessmodells *Zerlegen von Schraubverbindungen* betrachtet. Aus dem Stand von Forschung und Technik lässt sich bereits auf teilweise bekannte Wirkzusammenhänge zurückgreifen. Es liegen bereits einschlägige Beiträge vor, welche auf Grundlage von gemessenen Prozesswerten während und nach dem Schraubvorgang Rückschlüsse auf den Entschraubprozess ziehen. Für eine Bewertung der Lösbarkeit finden sich Ansätze in (Al Assadi, Holtz et al., 2022; Apley et al., 1998; Cheng et al., 2019). In diesen Arbeiten werden gemessene Prozessdaten verwendet, um nach dem Entschraubprozess Aussagen über den Demontageerfolg zu treffen. Im Speziellen zeigen



die frühen Untersuchungen von Apley et al., dass der Drehmoment-Zeitverlauf  $M(t)$  mit dem Spindeldrehzahl-Zeitverlauf  $n(t)$  korreliert werden kann, um Aussagen zu verschiedenen Fehlerfällen zu erhalten. In der folgenden Abbildung 4-1 ist eine Auswahl dieser Wirkbeziehungen dargestellt, auf deren Basis die Autoren Klassifikationsalgorithmen für die Zuordnung des aufgetretenen Falles bei der Demontage entwickeln (Apley et al., 1998).

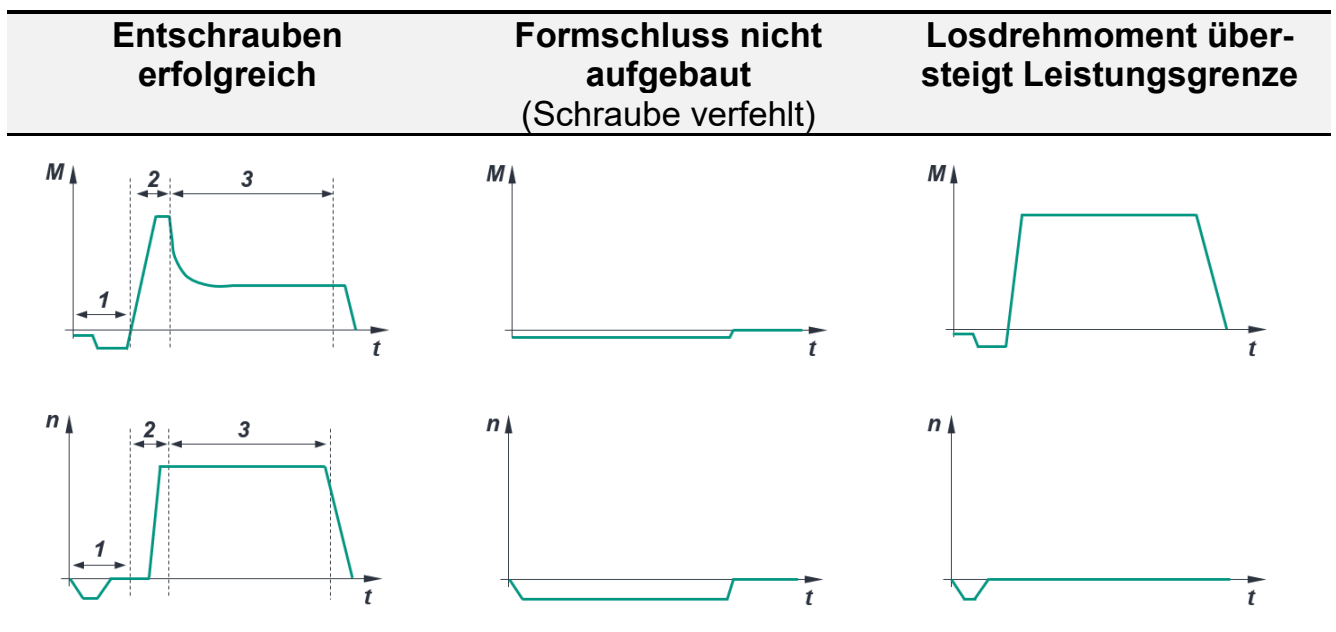


Abbildung 4-1: Drehmoment-Zeitverlauf und Spindeldrehzahl-Zeitverlauf bei der Schraubendemontage (eigene Darstellung in Anlehnung an (Apley et al., 1998))

Die Zeitverläufe der Prozessgrößen haben charakteristische Verläufe für verschiedene Fälle, zum Beispiel einer erfolgreichen Demontage oder einer fehlerhaften Formschlusserstellung. Bei den Prozessgrößen handelt es sich um Werte, welche unmittelbar am Endeffektor ermittelt werden. Daher hat die erste Prozessphase nach dem in Kapitel 2.3 vorgestellten Trennprozessmodell *Zerlegen von Schraubverbindungen* keinen Einfluss auf die Kurvenverläufe. In dieser ersten Prozessphase findet das Anfahren der Schraube statt und es liegt kein physikalischer Kontakt zwischen Endeffektor und Schraube vor. In der zweiten Prozessphase, der *Formschlusserstellung zwischen Werkzeug und Schraubenkopfantrieb*, wird das Werkzeug mit der Schraube durch die Suchstrategie des Roboters am TCP in eine formschlüssige Verbindung gebracht (Abschnitt 1 in Abbildung 4-1). Dabei wird der Endeffektor über der Schraube durch Drehen der Spindeln mit minimalem Drehmoment in Anzugsrichtung der Schraube auf dem

Schraubenkopf zentriert. Dies ist in den charakteristischen Kurvenverläufen anhand des negativ aufgetragenen Drehmoments und anhand der negativ aufgetragenen Drehzahl zu erkennen. Sobald sich der Formschluss einstellt, steigt das Drehmoment durch die blockierende Wirkung der Schraube an. In der technischen Umsetzung wird typischerweise das Erreichen eines Drehmomentschwellwertes als Kriterium für eine erfolgreiche Formschlusserstellung gewählt. Der Endeffektor wechselt dann die Rotationsrichtung und prägt ein Drehmoment in Löserichtung der Schraubverbindung ein (Phase 2 in Abbildung 4-1). Beim Lösen der Schraube, dem sogenannten *Losbrechen*, fällt dann das Lösemoment plötzlich ab. Dabei gehen die Reibwerte in der Verbindung von statischen Eigenschaften in dynamische Eigenschaften über. In der dritten Trennprozessphase, dem Ausdrehen, bleibt das Drehmoment bis zum Ende des Löseprozesses weitgehend konstant. Es treten typischerweise zyklische Momentensprünge auf, die durch Beschädigungen der Gewindegänge, Verunreinigungen oder Korrosion bedingt sind. Typischerweise findet das Ausdrehen drehzahl geregelt statt und der Endeffektor dreht die Schraube mit einer voreingestellten Drehzahl aus. Gegen Ende der Ausdrehphase sinkt das Lösemoment nahezu auf null und der Löseprozess ist abgeschlossen. Sollte der Formschluss nicht aufgebaut werden können, beispielsweise durch das Verfehlen des Schraubenkopfes beim Anfahren, dreht der Schrauber in Anzugsrichtung der Schraube bis zum Ablauf eines eingestellten Zeitwertes. In diesem Fall ist die geregelte Drehzahl konstant und das Drehmoment minimal. Sollte die Schraube nicht lösbar sein durch ein Lösemoment, welches die Leistungsgrenze des Endeffektors übersteigt, bleibt die Drehzahl nach der Suchstrategie konstant auf null und das Drehmoment liegt konstant hoch an.

Um eine a priori gerichtete Auswertung der Demontierbarkeit zu ermöglichen, müssten die charakteristischen Drehmomente allerdings vor Prozessbeginn bekannt sein. Daher setzt der Ansatz der vorliegenden Arbeit auf modellierte Prozessgrößen. Insbesondere ist dabei die Prozessphase *Ausdrehen* relevant. Für die Modellierung wird zunächst das **Losdrehmoment**  $M_L$  (in der Verbindungstechnik allgemein auch Lösemoment genannt) betrachtet. Dieses wird im Kontext der vorliegenden Arbeit verstanden als „in Losdrehrichtung bei der ersten Relativbewegung zwischen Prüfmutter und Schraube bei einer nicht verklebten Schraubenverbindung mit Vorspannung gemessenes Drehmoment“ (DIN 267-27). Anders formuliert ließe sich sagen, dass bei diesem Drehmoment die Schraubverbindung beginnt loszubrechen. Dieses Moment wird vorrangig von

der tribologischen Situation in der Kopfauflage und dem Gewinde sowie der Vorspannkraft bestimmt. Im Regelfall liegt das Losdrehmoment unter dem **Abschermoment**  $M_Q$ . Dieses wird im Kontext dieser Arbeit verstanden als dasjenige *Drehmoment, bei dem die Schraube durch das angelegte Drehmoment versagt und nicht erfolgreich demon- tiert werden kann*. Es handelt sich folglich um das maximal anwendbare Drehmoment, bevor die Schraube durch die Prozesskräfte im Zuge der Demontage versagen würde. Das Abschermoment kann durch das Auftreten unterschiedlicher Versagensmodelle erreicht werden.

Das Losdrehmoment und das Abschermoment lassen sich im Zusammenspiel als ein Prozessfenster vorstellen. Sofern das Losdrehmoment kleiner als das Abschermoment ist, kann das Verbindungselement zerstörungsfrei gelöst werden. Sollte das Losdrehmoment größer als das Abschermoment oder gleich groß sein, dann ist zu erwarten, dass die Schraubverbindung bei der Demontage versagt. In Abbildung 4-2 wird der Zusammenhang ergänzend visualisiert.

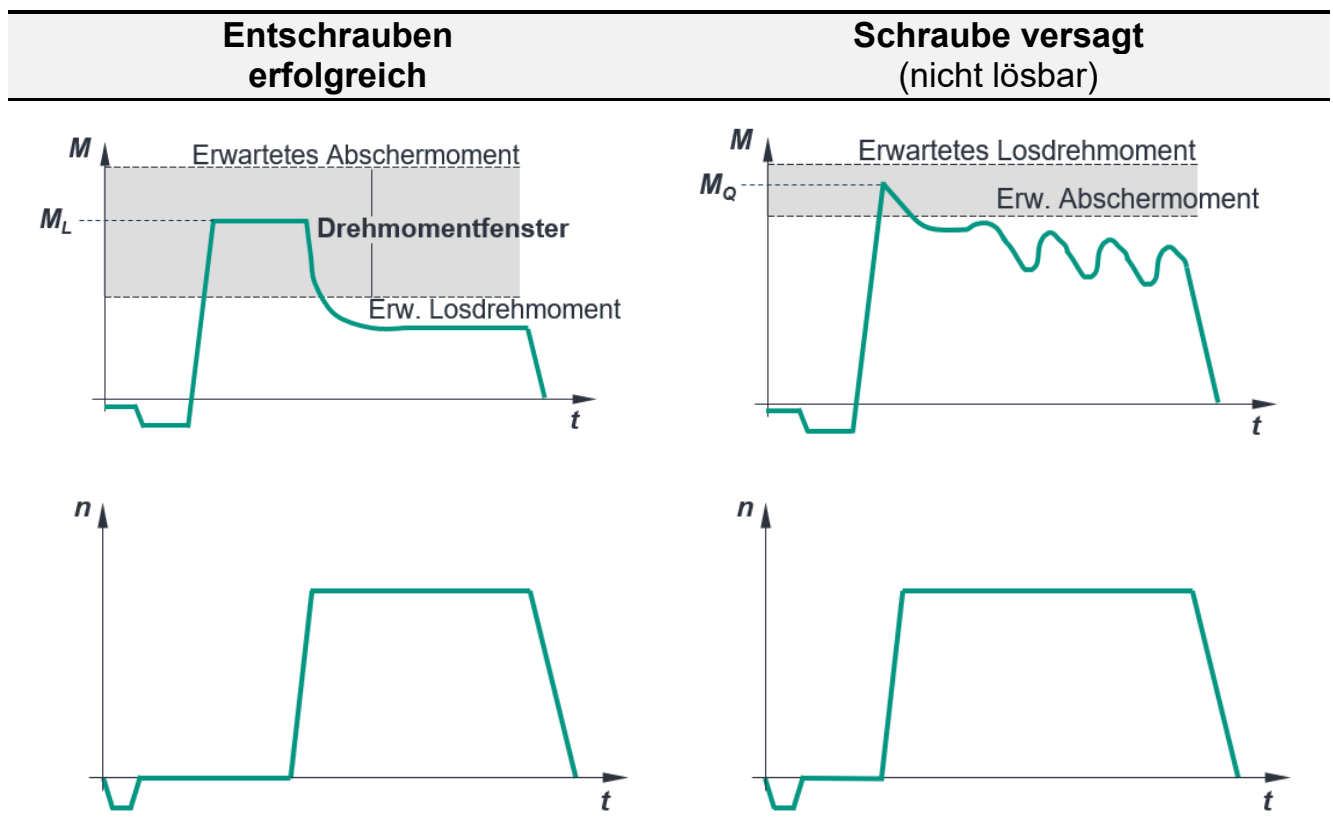


Abbildung 4-2: Drehmomentfenster der automatisierten Demontage

Es gibt demnach ein maximal anwendbares Drehmoment, bis zu welchem die Schraubverbindung bei der Demontage belastet werden kann, bevor es zum Versagen kommt. Sollte das Abschermoment höher liegen als das Losdrehmoment und die Demontierbarkeit nicht überprüft werden, so würde eine simple In-Prozess-Regelung des Entschraubens das Drehmoment bis zum Versagen erhöhen. Damit würden Teile der zerstörten Schraube im Core verbleiben und zu Lasten der OEE manuell entfernt werden müssen.

Zur Robustheitssteigerung der Demontage wird die Kenntnis über das erwartete Losdrehmoment und das erwartete Abschermoment vor Beginn des Prozesses benötigt. Das folgende Kapitel 4.2.1 befasst sich mit der Modellierung des Losdrehmomentes und in Kapitel 4.2.2 wird ein Ansatz vorgestellt, der sich mit der Modellierung der erwarteten Abschermomente befasst.

In der Abbildung 4-3 ist der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz zur Lösbarkeitsbewertung in einem Ablaufdiagramm zusammengefasst.

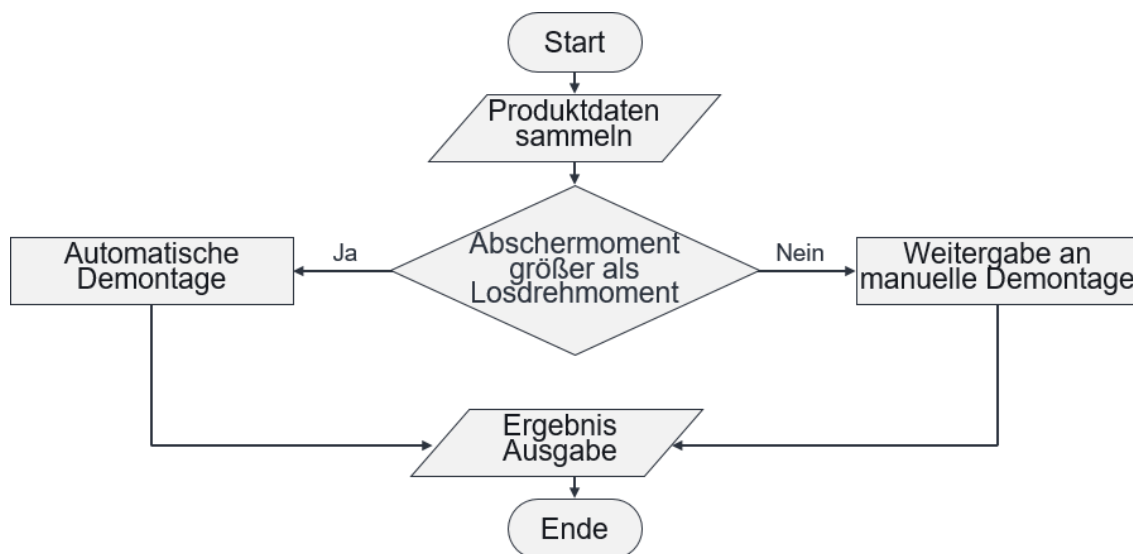


Abbildung 4-3: Ansatz zur Bewertung der Lösbarkeit von Schraubverbindungen

Die Modellierung der beschriebenen Prozessgrößen stellt im Anwendungsfall der Demontage eine nicht triviale Aufgabe dar. Während des Lebenszyklus unterliegen die Verbindungselemente einer Vielzahl von Umwelteinflüssen, welche nicht quantifizierbar sind. Diese Einflüsse können die geometrischen und stofflichen Eigenschaften der Schraubverbindung verändern. So kann es beispielsweise neben der mechanischen Belastung im Arbeitsbereich auch zu Korrosion durch den Eintritt von Medien in das

Gewinde oder in die Zwischenräume der Kopfauflage kommen. Darüber hinaus kann die Verbindung auch im Zuge von Reparaturen oder Wartungsarbeiten ausgetauscht worden sein. Die Summe dieser Faktoren führt zu einem Löseverhalten der Schraubverbindung, welches sich stark vom Verhalten beim Setzen unterscheidet. Das in Abbildung 0-1 im Anhang dargestellte Ursache-Wirkungs-Diagramm stellt die wesentlichen Ursachen für die Spanne des Drehmomentfensters dar. Es lässt sich ableiten, dass die nach dem aktuellen Stand der Forschung vorliegenden Modellierungen nur beschränkt angewendet werden können. Als Beispiel sei die VDI-Richtlinie 2230 genannt. Die dort verwendeten Methoden erfordern eine genaue Kenntnis über alle vorliegenden Größen, wie geometrische Informationen oder Reibungszahlen im Gewinde und in der Kopfauflage. Die verwendeten Methoden stellen einen guten Ausgangspunkt für die Modellierung dar, benötigen aber ergänzende Untersuchungen hinsichtlich der Anwendbarkeit auf die Demontage.

## 4.2 Modellbildung

*Editorischer Hinweis: Die für die folgende Modellbildung relevanten Kenngrößen werden durch Abbildung 0-2 im Anhang visualisiert.*

### 4.2.1 Losdrehmoment

In etablierter Literatur zur Fügetechnik, exemplarisch (Bender & Göhlich, 2020, S. 219; Wittel et al., 2019, S. 277), finden sich analytische Formulierungen für das Losdrehmoment  $M_L$  von Schraubverbindungen. Diese werden ausgehend von den physikalischen Wirkbeziehungen in einem Gewindegang hergeleitet. Das Losdrehmoment setzt sich aus zwei Termen zusammen: dem Gewindemoment  $M_G$  und dem Reibungsmoment an der Auflagefläche des Schraubenkopfes bzw. der Mutter  $M_{RA}$

$$M_L = M_G + M_{RA}$$

Formel 4-1

mit

$M_G$  = Gewindemoment

$M_{RA}$  = Reibungsmoment an der Auflagefläche

In der Betrachtung eines Reibkörpers in einem Flachgewinde mit dem Gewindesteigungswinkel  $\varphi$ , lassen sich folgende Kräfte im Gleichgewicht festhalten (Abbildung 4-4 links). Die um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft  $\overline{F_{VM}}$  steht in einem Kräftegleichgewicht mit der durch den (De-) Montage Prozess angelegten Umfangskraft  $F_U$  und der Ersatzkraft  $F_E$ . Die Ersatzkraft setzt sich zusammen aus der Reibkraft  $F_R$  und der Normalkraft  $F_N$ .

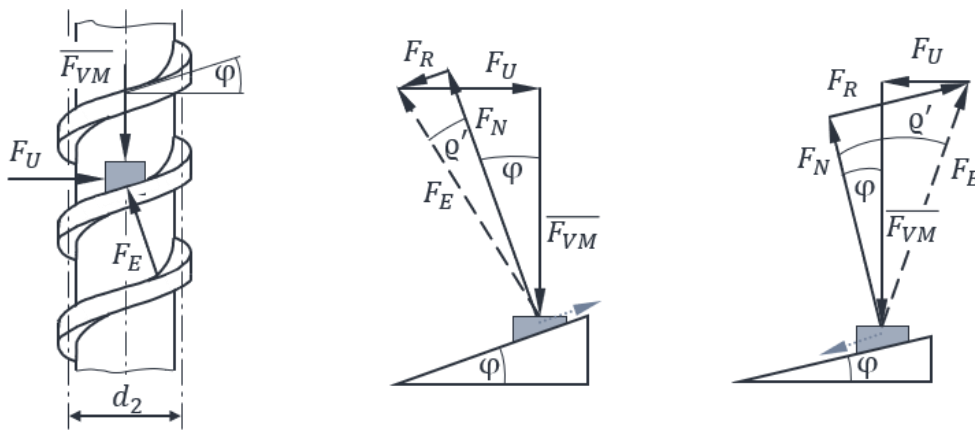


Abbildung 4-4: Kräfte am Flachgewinde nach (Wittel et al., 2019, S. 268)

Mit der durch Abwicklung eines Gewindeganges entstehenden schiefen Ebene (Abbildung 4-4 mitte und rechts) lassen sich die Beziehungen des Kräftegleichgewichts detaillierter erkennen.

$$F_U + F_E + \overline{F_{VM}} = F_U + F_R + F_N + \overline{F_{VM}} = 0$$

Formel 4-2

mit

$F_U$  = Umfangskraft

$F_E$  = Ersatzkraft

$\overline{F_{VM}}$  = um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft

$F_R$  = Reibkraft

$F_N$  = Normalkraft

In der Abwicklung wird auch der Einfluss des Reibwinkels und der sich ergebenden Fallunterscheidung beim Lösen der Schraube und Anziehen der Schraube ersichtlich.

Das Anziehen der Schraubverbindung entspricht dem Fall einer gehobenen Last (Abbildung 4-4 mitte). In diesem Fall wirkt die Reibkraft  $F_R$  entgegen der Bewegungsrichtung. Der Reibungswinkel im Gewinde  $\varrho'$  ergibt sich aus dem Betrag der Reibkraft. Im Fall des Anziehens der Schraube wirkt die Reibkraft entgegen der Bewegungsrichtung des Lasthebens und damit anteilig gegen die Umfangskraft. Im Fall des Schraubenlösen (Abbildung 4-4 rechts) kehrt sich die Bewegungsrichtung des Gleitkörpers um und die Reibkraft wirkt anteilig entgegen der Umfangskraft. Bezieht man nun noch die Hebelwirkung der Kräfte am Gleitkörper ein, so lässt sich auf das Moment schließen. Die Umfangskraft greift am Flankendurchmesser des Gewindes  $\frac{d_2}{2}$  an. Es ergibt sich für das Gewindemoment:

$$M_G = F_U \cdot \frac{d_2}{2} = \begin{cases} \overline{F_{VM}} \cdot \tan(\varrho' + \varphi) \cdot \frac{d_2}{2} & \text{beim Setzen} \\ \overline{F_{VM}} \cdot \tan(\varrho' - \varphi) \cdot \frac{d_2}{2} & \text{beim Lösen} \end{cases} \quad \text{Formel 4-3}$$

mit

$\overline{F_{VM}}$  = um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft

$d_2$  = Flankendurchmesser des Gewindes

$\varphi$  = Steigungswinkel des Gewindes

$\varrho'$  = Reibungswinkel im Gewinde

Das Reibungsmoment an der Kopfauflage lässt sich ebenfalls über eine Betrachtung der Festkörperreibung berechnen. Abbildung 4-5 zeigt die zu berücksichtigten Kräfte, Dimensionen und Reibungszahlen.

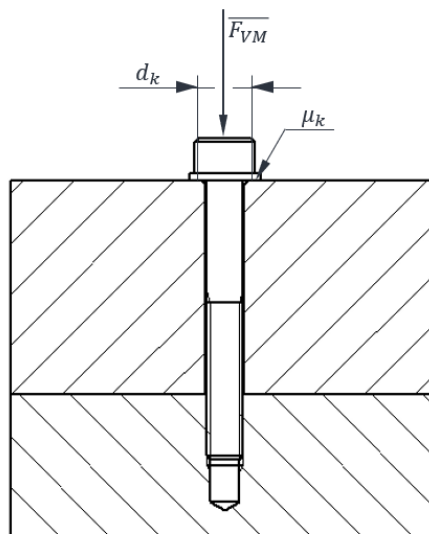


Abbildung 4-5 : Skizze der relevanten Größen für das Reibungsmoment an der Auflagefläche

Das Reibungsmoment an der Kopfauflagefläche ergibt sich aus der Multiplikation der wirkenden Reibkraft mit dem Hebelarm. Die Reibkraft lässt sich über die allgemeine Formulierung der Festkörperreibung ermitteln. Dazu wirkt als Normalkraft an der Kopfauflagefläche die um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft  $\overline{F_{VM}}$  mit der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche  $\mu_K$ . Die sich so ergebende Reibkraft wirkt am halben Durchmesser der effektiven Reibfläche  $d_K$  als das Reibungsmoment an der Auflagefläche:

$$M_{RA} = \overline{F_{VM}} \cdot \mu_K \cdot \frac{d_K}{2} \quad \text{Formel 4-4}$$

mit

$\mu_K$  = Reibungszahl in der Kopfauflagefläche

$d_K$  = Durchmesser der effektiven Reibfläche in der Kopfauflage

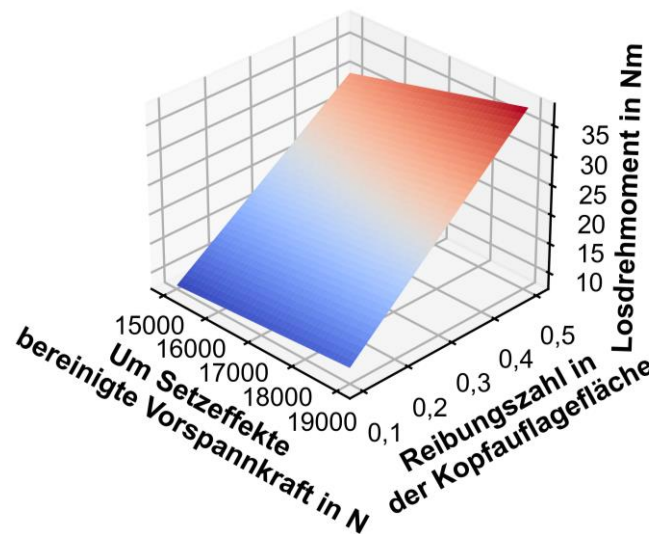
Einsetzen von Formel 4-3 und Formel 4-4 in Formel 4-1 liefert das Losdrehmoment:

$$M_L = M_G + M_{RA} = \overline{F_{VM}} \cdot \left[ \frac{d_2}{2} \cdot \tan(-\varphi + \varrho') + \mu_K \cdot \frac{d_K}{2} \right] \quad \text{Formel 4-5}$$

Somit ist eine Formulierung des Losdrehmoments in Abhängigkeit von geometrischen Eigenschaften der Schraubverbindungen und der tribologischen Situation gegeben. In der folgenden Abbildung 4-6 ist ein farbkodiertes Oberflächendiagramm gemäß der Formel 4-5 dargestellt, in welchem die Reibungszahl in der Kopfauflagefläche  $\mu_K$  und die um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft  $\overline{F_{VM}}$  als variable Größen angeführt werden.

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die tribologische Situation einen sehr großen Einfluss auf die exakte Berechnung des Losdrehmomentes hat. Kleine Veränderungen der Reibungszahlen haben große Veränderungen in dem modellierten Losdrehmoment zur Folge. In der Praxis der automatisierten Demontage lassen sich die Reibungszahlen jedoch nicht ohne Weiteres bestimmen oder ableiten. Eine präzise Erfassung der Reibungszahlen ist nach dem aktuellen Stand der Technik mit einem sehr hohen Aufwand verbunden und dadurch für den Anwendungsfall der automatisierten Demontage für das Remanufacturing unwirtschaftlich. In der Montagetechnik werden daher Referenzversuche zur Näherung der Reibungszahlen genutzt.





*Abbildung 4-6: Losdrehmoment einer M6 10.9 Zylinderkopf-Einsteckschraube nach DIN EN ISO 4762 in Abhängigkeit der um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft und der Reibungszahl in der Kopfauftragfläche*

Im betrachteten Anwendungsfall der automatisierten Demontage wären Referenzversuche durch die individuellen Eigenschaften der Verbindungselemente allerdings kein vielversprechender Ansatz, da jede Verbindung einzeln betrachtet werden müsste. Vielmehr könnten zur Ermittlung der Reibungszahlen begründete Schätzungen durch erfahrene Werker oder durch lernende Modelle vorgenommen werden. Um eine automatisierte Bewertung der Prozessgrößen im Kontext dieser Arbeit vorzunehmen, werden die Wirkzusammenhänge mithilfe von indirekten Indikatoren approximiert. Die Kenntnis über die Wirkzusammenhänge wird durch experimentelle Untersuchungen verfeinert. Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse sind in (Mangold, Gerlitz et al., 2023) veröffentlicht. Eine Weiterführung der Ergebnisse bis hin zum in dieser Dissertation vorgestellten Stand erfolgt in vom Autor angeleiteten studentischen Arbeiten (A\_Scholl, 2023; A\_Mlitzko, 2023).

Zur Ableitung der geeigneten Kenngrößen, welche zur indirekten Approximation der Reibungszahlen verwendet werden können, muss sich in einem ersten Schritt wesentlichen Parametern explorativ genähert werden. Im Anschluss können sich aufgezeigte Wirkzusammenhänge weiter quantifiziert werden. Die für die explorative Untersuchung relevanten Parameter lassen sich aus Arbeiten nach dem aktuellen Stand von Forschung und Technik ableiten, exemplarisch (Croccolo et al., 2017; Croccolo et al., 2018; Croccolo et al., 2020). Ergänzend zu diesen Arbeiten finden sich auch in wissenschaftlichen Beiträgen im Themenfeld der automatisierten Demontage Untersuchungen zu den

Wirkzusammenhängen (Kahmeyer, 1995; Nave, 2003). Wendet man die Ergebnisse der Untersuchungen auf den Anwendungsfall der automatisierten Demontage für das Remanufacturing an, so folgt, dass die folgenden Faktoren in der explorativen Analyse betrachtet werden müssen: *Korrosion, Schrauben-Nenndurchmesser, Schraubenkopfantrieb, Schrauber-Drehzahl, Anzugsmoment bei der Montage und Plattenmaterial*.

### *Experimentelle Untersuchung 1 – Exploration wesentlicher Parameter*

Es werden acht Probekörper mit jeweils 15 Schrauben nach Abbildung 0-3 (ersichtlich im Anhang) vorbereitet. Bei diesen wird die Auswahl an charakteristischen Einflussfaktoren, wie sie im Lebenszyklus einer Schraubverbindung auftreten, künstlich eingestellt. Für die Versuchsdurchführung werden verschiedene Schrauben beim Setzen mit einem Ingersoll Rand Schrauber der QX-Serie<sup>8</sup> angezogen. Nach der Vorbereitung der Probekörper werden die Schrauben manuell demontiert und dabei das Losdrehmoment gemessen. Für die Datenaufnahme wird ein Festool PDC 18/4<sup>9</sup> Schrauber mit einem Kistler Drehmomentsensor Typ 4501A<sup>10</sup> verwendet. Das Studiendesign basiert auf einem teilfaktoriellen Versuchsplan, dessen Faktorstufen in Tabelle 4-1 beschrieben sind. Pro Versuch wird eine Schraube gemäß den Spezifikationen des Versuchsplans gelöst.

*Tabelle 4-1: Faktorstufen des Versuchsplanes*

<b>Variable</b>	<b>Untere Faktorstufe</b>	<b>Obere Faktorstufe</b>	<b>Untersuchung</b>
Korrosion	keine	10 Tage in Salzwasserlösung	1,2,3
Nenndurchmesser	M3	M6	1,2
Schraubenkopfantrieb	DIN EN ISO 4762 (DIN 912)	DIN EN ISO 4017 (DIN 933)	1,3
Schrauber-Drehzahl	Einstellung 1	Einstellung 2	2
Initiales Anzugsmoment	1,3 Nm	10,3 Nm	3
Plattenmaterial	S235JRC+C	AlCu4PbMgMn	3

<sup>8</sup> Ingersoll Rand Präzisions EC Akku-Winkelschrauber Typenbezeichnung QXX2AT18PQ4

<sup>9</sup> Festool GmbH (2022), Akku-Schlagbohrschrauber QUADRIVE TPC 18/4 I-Basic Art.-Nr. 575604. [www.festool.de/produkte/aktionen/bohren-und-schrauben/577625---tpc-184-i-basic-set](http://www.festool.de/produkte/aktionen/bohren-und-schrauben/577625---tpc-184-i-basic-set) [19.07.2025]

<sup>10</sup> Kistler Instrumente AG (2022), Drehmomentmesswelle Typenbezeichnung 4501A020HA. [www.kistler.com/DE/de/p/drehmomentmesswelle-4501a/000000000018026214](http://www.kistler.com/DE/de/p/drehmomentmesswelle-4501a/000000000018026214) [19.07.2025]

Bei der Versuchsauswertung werden in drei Untersuchungen unterschiedliche Einflussfaktoren auf das Losdrehmoment analysiert (vgl. Spalte „Untersuchung“ in Tabelle 4-1):

- (1) In der ersten Untersuchung wird der Einfluss der Korrosion, des Nenndurchmessers und des Schraubenkopfantriebs untersucht.
- (2) Die zweite Untersuchung betrachtet den Einfluss der Korrosion, des Nenndurchmessers sowie der eingestellten Spindeldrehzahl des Schraubers beim Lösen.
- (3) In der dritten Untersuchung wird analysiert, welchen Einfluss Korrosion, Plattenmaterial und Schraubenkopfantrieb bei einem höheren initialen Anzugsmoment haben.

Um den Einfluss der Faktoren Korrosion, Nenndurchmesser und Schraubenkopfantrieb auf das Losdrehmoment in der ersten Untersuchung zu bewerten, wird jede der acht Faktorkombinationen in fünf Wiederholungen getestet, wodurch 40 Versuche für diese Auswertung zur Verfügung stehen. Abbildung 4-7 zeigt das Effektdiagramm zu der ersten Untersuchung, bezogen auf ein 95 %-Konfidenzintervall.

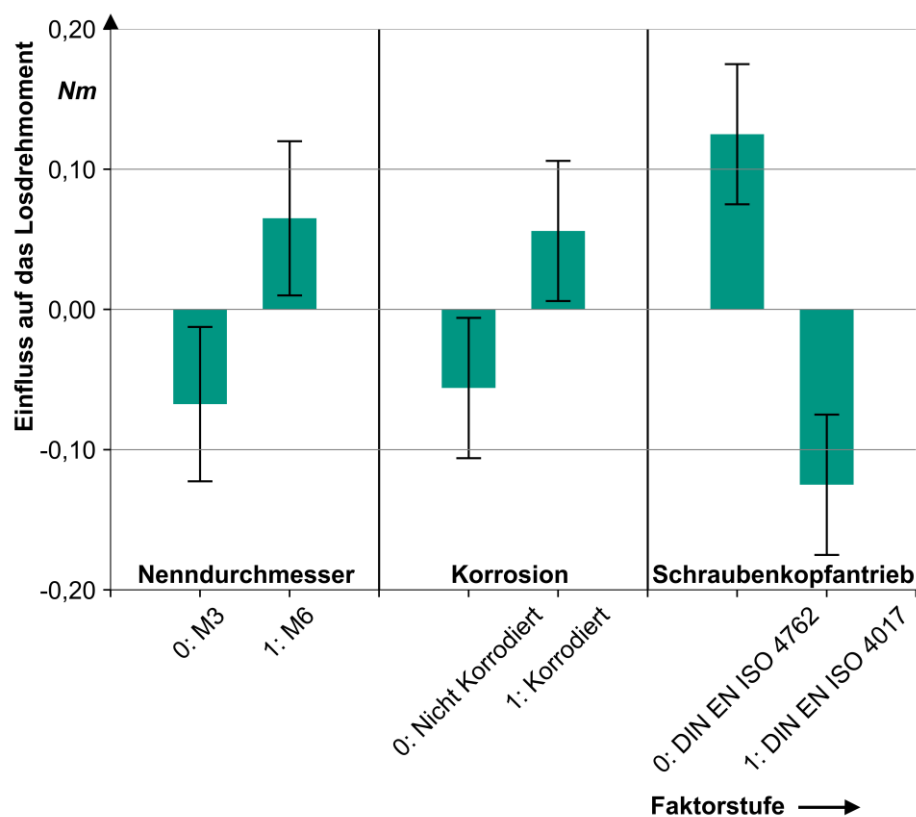


Abbildung 4-7: Effektdiagramm für die erste Untersuchung, bezogen auf ein 95 %-Konfidenzintervall

In den Versuchen kann tendenziell ein höheres Losdrehmoment bei Schrauben mit dem Nenndurchmesser M6 im Vergleich zu Schrauben mit dem Nenndurchmesser M3 gemessen werden. Dies entspricht den Erwartungen und lässt sich durch die größere effektive Reibfläche in der Kopfauflage erklären. Bei Versuchen mit korrodierten Schrauben ist das Losdrehmoment im Durchschnitt höher als bei nicht korrodierten Schrauben. Dies kann auf den Einfluss der durch Korrosion verursachten ungleichmäßigen Oberflächenstrukturen zurückgeführt werden. Es kommt zu einer erhöhten Reibung und damit zu einem höheren Widerstand beim Lösen der Schrauben. Der stärkste Effekt auf das Losdrehmoment lässt sich jedoch bei der Variation des Schraubenkopfantriebs feststellen. Bei Zylinderschrauben mit Innensechskant (DIN EN ISO 4762) lässt sich in dieser Untersuchung im Durchschnitt ein um 0,26 Nm höheres Losdrehmoment als bei Sechskantschrauben (DIN EN ISO 4017) ermitteln. Dieses Ergebnis ist ebenfalls zu erwarten und kann durch den größeren Durchmesser der effektiven Reibfläche in der Kopfauflage bei Zylinderschrauben mit Innensechskant erklärt werden. Die Ergebnisse der ersten Untersuchung validieren somit zunächst die bereits entsprechend dem Stand der Technik bestehenden Erkenntnisse (Nave, 2003). Darüber hinaus bestätigen sie aber auch die Validität des Versuchsaufbaus.

Für die Bewertung des Einflusses auf das Lösemoment der drei Faktoren Korrosion, Nenndurchmesser und eingestellte Spindeldrehzahl des Schraubers können durch die zweite Untersuchung ebenfalls 40 Versuchsdurchführungen herangezogen werden. Abbildung 4-8 zeigt das sich ergebende Effektdiagramm der zweiten Untersuchung.

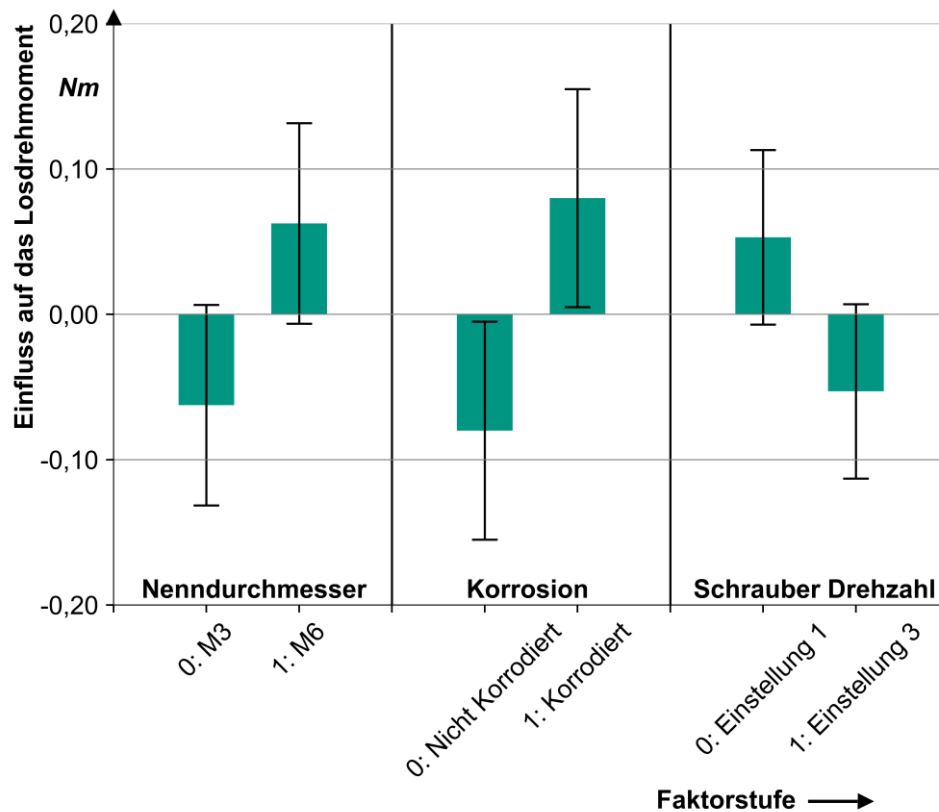


Abbildung 4-8: Effektdiagramm der zweiten Untersuchung

Analog zu den Ergebnissen aus der ersten Untersuchung lässt sich tendenziell ein höheres Losdrehmoment bei Schrauben unter Korrosion feststellen. Zur Überprüfung der Ergebnisse auf Signifikanz wird der Shapiro-Wilk-Test angewendet. Für die Faktoren Nenndurchmesser ( $p = 0,074$ ) und eingestellte Spindeldrehzahl des Schraubers ( $p = 0,092$ ) kann kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden, da die  $p$ -Werte größer sind als die 5%-Signifikanzgrenze ( $p = 0,05$ ). Bei dem Faktor Korrosion ( $p = 0,024$ ) kann ein signifikanter Effekt auf das Losdrehmoment festgestellt werden. Dennoch kann analog zu den Ergebnissen aus der ersten Untersuchung festgehalten werden, dass Schrauben mit einem Nenndurchmesser von M6 tendenziell ein größeres Losdrehmoment aufweisen als Schrauben mit einem Nenndurchmesser M3. Darüber hinaus lässt sich für Ausdrehversuche mit einer höheren Spindeldrehzahl tendenziell ein etwas geringeres Losdrehmoment bestimmen als für Versuche mit geringerer Spindeldrehzahl. Der Effekt ist für diesen Faktor allerdings im Vergleich zu den anderen Effekten in dieser Untersuchung kleiner und für die praktische Anwendung als gering einzustufen.

Die Auswertung der dritten Untersuchung erfolgt zweigeteilt. Um den Einfluss von Korrosion, Plattenmaterial und Schraubenkopfantrieb auf das Losdrehmoment bei einem höheren initialen Anzugsmoment zu untersuchen, wird zunächst der Einfluss der Faktoren Korrosion und Plattenmaterial verglichen. Im Anschluss werden die Faktoren Korrosion und Schraubenkopfantrieb bei einem höheren Anzugsmoment nach den Tabelle 4-1 beschriebenen Werten untersucht. Zur Untersuchung der Faktoren Korrosion und Plattenmaterial bei einem höheren Anzugsmoment stehen im Versuchsaufbau 20 Versuche zur Verfügung. Die Untersuchung der Faktoren Korrosion und Schraubenkopfantrieb bei höherem Anzugsmoment kann ebenfalls auf 20 Versuche zurückgreifen. Die folgende Abbildung 4-9 zeigt die Effektdiagramme, bezogen auf ein 95 %-Konfidenzintervall.

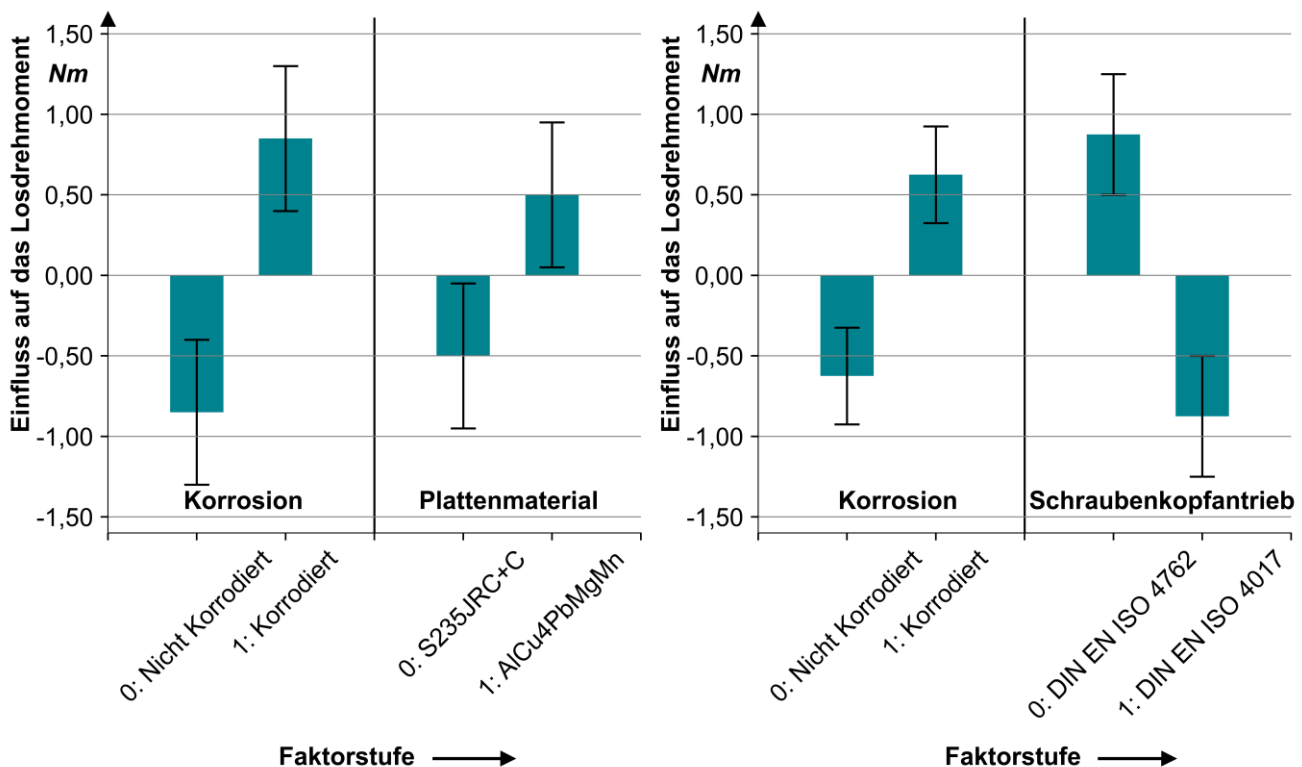


Abbildung 4-9: Effektdiagramm zu Untersuchung 3

Aus den Versuchen lassen sich signifikante Effekte für die Faktoren Korrosion und Plattenmaterial ermitteln. Auch bei einem höheren initialen Anzugsmoment kann für korrodierte Schraubverbindungen ein höheres Losdrehmoment als bei nicht korrodierten Schraubverbindungen ermittelt werden. Die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich einer Variation des Plattenmaterials zeigt, dass in Aluminium montierte Schrauben ein

höheres Losdrehmoment aufweisen als in Stahl montierte. Dies könnte durch ein unterschiedliches Verhalten der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche und im Gewinde erklärt werden. Ein anderer Effekt könnte die je nach Plattenmaterial unterschiedliche Veränderung der Vorspannkraft beim Setzen der Schraubverbindung sein. Insgesamt fallen die Effekte bei dem höheren initialen Anzugsmoment größer aus als in den Untersuchungen mit einem initialen Anzugsmoment der Faktorstufe 0.

### **Fazit zur experimentellen Untersuchung 1**

Die explorative Untersuchung für eine Näherung der tribologischen Situation innerhalb der Schraubverbindung zeigt den signifikanten Einfluss des Faktors Korrosion und der geometrischen Merkmale des Schraubenkopfantriebs. Beide Größen stellen vielversprechende Möglichkeiten dar, auch in der Anwendung der automatisierten Demontage sensortechnisch erfassbar zu sein. Die Ergebnisse zeigen den Einfluss der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche und im Gewinde für die praktische Anwendung auf. Es lässt sich ableiten, dass es eine positive Korrelation zwischen dem Korrosionsgrad und dem Losdrehmoment gibt. Hinsichtlich der Schraubennenngröße und den untersuchten initialen Anzugsmomenten kann festgehalten werden, dass die Effektgröße kleiner ausfällt. Eine Veränderung des Plattenmaterials und der Schrauben-Nenndurchmesser riefen keine signifikanten Effekte hervor. Es bedarf demzufolge genauerer Kenntnis über den Zusammenhang zwischen fortschreitender Korrosionserscheinung und den Reibungszahlen im Verbindungselement, um das Losdrehmoment modellieren zu können.

### ***Experimentelle Untersuchung 2 – Quantifizierung des Zusammenhangs von Korrosion und Reibungszahlen in Schraubverbindungen***

Nach dem aktuellen Stand von Forschung und Technik ist eine positive Korrelation zwischen dem Korrosionsgrad und den Reibungszahlen in Schraubverbindungen bekannt. In der Arbeit von (Fadeev, 2023) wird dieser Zusammenhang weiter quantifiziert. Die in dieser Studie abgeleitete Regressionsgleichung basiert jedoch auf einer vergleichsweise begrenzten Anzahl von Messdaten. Zudem werden keine Rückschlüsse auf relevante Faktoren gezogen, welche in der automatisierten Demontage zur Ableitung der Reibungszahlen berücksichtigt werden könnten. Es sind folglich ergänzende Versuche

erforderlich, um genauere Erkenntnisse zum Einfluss von Korrosionserscheinungen auf die Tribologie im Verbindungselement und damit auf das Löseverhalten zu erhalten. Dazu wird ein experimenteller Aufbau erstellt, mit dem unter Beachtung technischer Regeln (DIN EN ISO 11130) eine Wechseltauchprüfung mit verschraubten Probekörpern entsprechend Abbildung 0-4 (im Anhang ersichtlich) erfolgt. Bei einer solchen Wechseltauchprüfung werden Probekörper abwechselnd in eine Prüflösung getaucht und an der Luft getrocknet. Somit wird die schnelle Bildung von Korrosionserscheinungen hervorgerufen und eine künstliche Alterung simuliert. Es werden jeweils zwei Probekörper gleichzeitig an dem Prüfstand korrodiert. Jeder Probekörper besteht aus zwei Vierkantprofilen aus Baustahl (EN 10025-2-S235JR), welche mit neun M6-Schrauben nach ISO 4762, Festigkeitsklasse 8.8, mit schwarz brünierte Oberfläche verbunden werden (DIN 50938); (DIN EN 10025-2); (DIN EN ISO 4762). Es werden neun Probekörper angefertigt, sodass insgesamt bis zu 81 Versuche zur Verfügung stehen. Die Montage der Probekörper erfolgt mit dem gleichen Ingersoll Rand Schrauber der QX-Serie wie in der ersten experimentellen Untersuchung. Die Prüflösung wird als Salzwasserlösung mit 35 g Natriumchlorid pro Liter Wasser hergestellt. Nach fünf Stunden Immersionszeit wird der in der Luft befindliche Probekörper ins Wasser gegeben und der in der Salzwasserlösung befindliche Probekörper in die Luft zur Trocknung gedreht. Nach Ablauf einer eingestellten Versuchszeit werden beide Probekörper aus der Salzwasserlösung befördert und an der Luft gehalten. Die eingestellten Versuchszeiten sind 0 h, 120 h, 170 h, 180 h und 240 h. Bei der anschließenden Demontage der Schraubverbindungen wird mit einem Axia80-M20-Sensor<sup>11</sup> das Losdrehmoment bestimmt. Für die Auswertung der Ergebnisse wird das Differenzdrehmoment ermittelt. Dieses bezeichnet die Differenz zwischen dem Losdrehmoment nach der künstlich eingestellten Korrosion und dem Anzugsmoment beim Setzen der Schraube. Die Ergebnisse der Differenzmomente sind in Abbildung 4-10 dargestellt, zusammen mit der jeweils zur Verfügung stehenden Stichprobengröße  $m$ .

---

<sup>11</sup> ATI Industrial Automation (2019), F/T Sensor: Axia80-M20 Typenbezeichnung Axia80-M20. [www.atia.com/products/ft/ft\\_models.aspx?id=Axia80-M20](http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Axia80-M20) [19.07.2025]



In der Darstellung der Versuchsergebnissen ist die erwartete positive Korrelation zwischen der Versuchszeit und dem Differenzdrehmoment zu erkennen. Mit steigender Versuchszeit der Probekörper und damit des Korrosionsfortschrittes erhöht sich auch das Differenzdrehmoment. Die eingezeichnete gestrichelte Linie in Abbildung 4-10 zeigt eine lineare Regression der Mittelwerte der Differenzdrehmomente an.

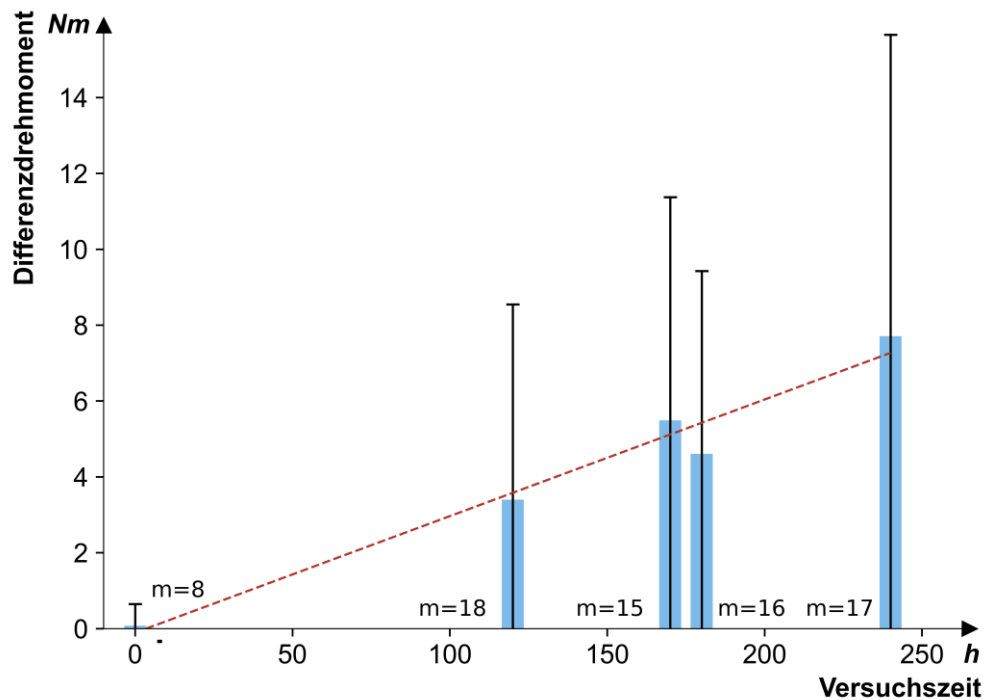
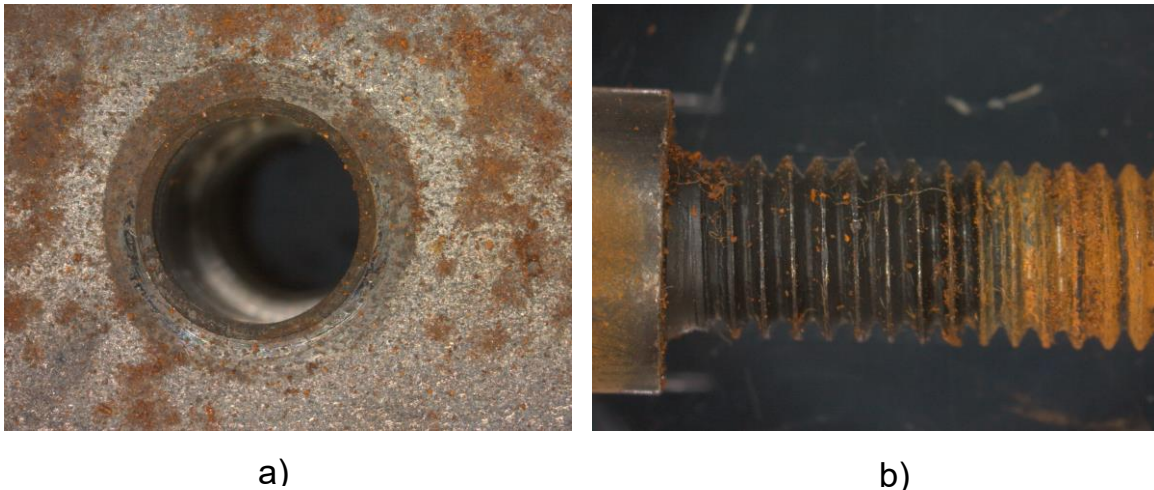


Abbildung 4-10: Differenzdrehmoment in Abhängigkeit der Versuchszeit in einer Wechselltauchprüfung

Allerdings treten in den ermittelten Differenzdrehmomenten relativ große Streuungen auf, die den angenommenen Ansatz der linearen Regression in Frage stellen. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 4-10 Fehlerbalken eingezeichnet, welche die größten und kleinsten Messwerte darstellen. Durch die große Streuung der Messdaten ist es möglich, dass der zugrunde liegende Zusammenhang komplexer ist als durch eine lineare Regression abgebildet. Ein expliziter Vermerk soll an dieser Stelle auch zu den Messpunkten bei einer Versuchszeit von 0 h erfolgen. Durch die in Formel 4-3 aufgezeigte Fallunterscheidung des Drehmomentes beim Anziehen und beim Lösen ergibt sich eine Differenz. Diesem Effekt folgend müsste das Losdrehmoment kleiner als das Anzugsmoment sein und damit das in Abbildung 4-10 dargestellte Differenzdrehmoment negativ. Die gemessenen Daten ergeben stattdessen einen positiven Wert mit

kleinem Betrag, was ein Hinweis auf die Messunsicherheit in dem Versuchsaufbau ist. Im Speziellen lässt sich durch das geringe festgestellte Differenzdrehmoment bei der Versuchszeit von 0 h auf die Größe des systematischen Fehlers, bedingt durch unter anderem die Messunsicherheit in dem Versuchsaufbau, schließen. Verglichen mit den durch die Korrosion bedingten Effekte ist dieser im Betrag allerdings als gering zu bewerten.

Es stellt sich folglich die Frage nach dem Ursprung des zunehmenden Differenzdrehmomentes mit steigender Korrosion. Zur Beantwortung lässt sich im Detail die tribologische Situation in den relevanten Berührungspunkten zwischen Schraube und Probekörper betrachten. In Abbildung 4-11 sind mit dem Mikroskop aufgenommene Bilder dargestellt. Es sind die Kopfauflagefläche (Abbildung a)) sowie das Gewinde einer Schraube zu sehen (Abbildung b)), die der Wechseltauchprüfung nach dem oben genannten Setup von 120 h unterzogen wurden.



*Abbildung 4-11: Schraubenkopfauflage (a) und Gewinde (b) im Detail*

An der Auflagefläche des Schraubenkopfes in Abbildung 4-11 a) ist eine kreisrunde Kontaktfläche um das Durchgangsloch im Probekörper zu erkennen. In dieser sind einzelne rötlich verfärbte Stellen ersichtlich. Des Weiteren sind kleine Kratzer in bogenförmiger Form zu sehen. Die Aufnahme legt nahe, dass die diese beim Losdrehen der Schraube aufgrund von losen Partikeln bei der Relativbewegung der rauen Oberflächen gegeneinander entstanden sind. In der vergrößerten Darstellung des Gewindes in Abbildung 4-11 b) ist in den ersten Gewindegängen eine deutliche farbliche Veränderung zu erkennen, die auf Korrosionseffekte zurückzuführen ist. In dem korrodierten Bereich des Gewindes treten lose Rostpartikel auf, die zu einer rauen Oberfläche führen. Wie

auch bei der Kopfauflage führen diese zu einer erhöhten Reibung im Gewinde und somit zu einer Erhöhung des Ausdrehmoments. Bei den Probekörpern handelt es sich um zwei Profile, welche über die Schrauben miteinander verbunden sind (siehe Abbildung 0-4 im Anhang). Das obere Profil ist mit Durchgangslöchern versehen, während im unteren Profil Gewindebohrungen eingebracht wurden, welche ebenfalls als Durchgangslöcher ausgeführt sind. Dadurch konnte die Prüflösung als Korrosionsmedium über das untere Profil in die ersten Gewindegänge eindringen. Der korrodierte Bereich geht in die brünierte Oberfläche der Schraube über. Die Beobachtung deutet darauf hin, dass die Kopfauflagefläche das Durchgangsloch des oberen Profils so weit abdichtet, dass an dieser Stelle kein Korrosionsmedium eingedrungen ist.

### **Fazit zur experimentellen Untersuchung 2**

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen 2 zeigen, dass das Losdrehmoment mit fortschreitender Korrosion zunimmt. Die Messungen deuten auf einen linearen Zusammenhang zwischen dem Differenzdrehmoment und der Einwirkdauer hin. Dieser Zusammenhang konnte jedoch aufgrund der hohen Streuung der Messwerte nicht eindeutig nachgewiesen werden. Die Zunahme des Losdrehmomentes wird durch eine Erhöhung der Reibungszahlen erklärt, welche durch Korrosionserscheinungen bedingt ist. Mikroskopisch sichtbare Merkmale in den Kontaktflächen der Schraubverbindung bestätigen dies und zeigen darüber hinaus, dass in dem Anwendungsfall der automatisierten Demontage besonders die alterungsbedingte Veränderung der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche das Losdrehmoment beeinflusst.

Daraus leitet sich die Fragestellung ab, ob sich die korrosionsbedingte Veränderung des Losdrehmomentes ausschließlich mit der Veränderung der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche als variable Größe modellieren lässt. Dies wäre im Anwendungsfall der automatisierten Demontage vorteilhaft, da visuell sichtbare Merkmale zur Bewertung der Demontierbarkeit hinzugezogen werden könnten. Zur Beantwortung dieser Frage sind vertiefte Untersuchungen erforderlich, um die Wirkzusammenhänge zwischen Korrosion und der Reibungszahl detaillierter zu analysieren.

### *Formulierung des Losdrehmomentes beim Entschrauben durch Bildverarbeitung*

Für die Bewertung des Losdrehmomentes beim Entschrauben durch Bildverarbeitung wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass lediglich die Reibungszahl in der Kopfauflagefläche durch Korrosion beeinflusst wird. Alle anderen Parameter (vgl. Formel 4-5) werden als unabhängige Größen gegenüber der Korrosion angesehen. Diese Annahme basiert auf den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchung 2. Infolgedessen ist jedoch zu erwarten, dass das entwickelte Modell eine gewisse Ungenauigkeit aufweist. Es ist im Rahmen der anschließenden Validierung daher erforderlich zu prüfen, ob das aufgestellte Modell für den Anwendungsfall hinreichend präzise Vorhersagen des Losdrehmomentes liefert, indem es mit experimentellen Daten verglichen wird.

Um den Zusammenhang zwischen der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche und der Korrosion in eine technische Realisierung zu bringen, wird in dieser Arbeit auf eine experimentelle Analyse gesetzt. Dazu werden mehrere Größen vor einer Versuchsreihe ermittelt oder durch begründete Schätzungen angenommen. Im Anschluss lässt sich der Zusammenhang zwischen der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche und der Korrosion durch ein Fitting der experimentellen Daten zu den modellierten Werten ermitteln. Für die Modellbildung werden dadurch folgende Vereinfachungen implizit angenommen:

- Während der oben beschriebenen Wechseltauchprüfung zur künstlichen Alterung verändert sich die Vorspannkraft  $\overline{F_{VM}}$  nach dem Setzen der Schraubverbindung nicht.
- Während der oben beschriebenen Wechseltauchprüfung zur künstlichen Alterung verändert sich die tribologische Situation ausschließlich in der Kopfauflagefläche und die Reibungszahl im Gewinde bleibt unverändert.

Unter diesen Prämissen lässt sich durch die im Anhang dargestellte Umstellung der Formel 4-3 zu Formel 4-6 auf die Reibungszahl in der Kopfauflagefläche schließen.

$$\mu_K = \left[ \frac{M_L}{\overline{F_{VM}}} - \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \tan(\varphi)}{1 + \frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \tan(\varphi)} \right] \cdot \frac{2}{d_k} \quad \text{Formel 4-6}$$

Somit liegt eine lineare Gleichung mit einer Unbekannten vor, die das Losdrehmoment  $M_L$  in Relation mit der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche  $\mu_K$  bringt. Für den in dieser Arbeit verfolgten Ansatz wird für die Reibungszahl im Gewinde der Tabellenwert  $\mu_G = 0,2$  angenommen und die Vorspannkraft in praktischen Versuchen ermittelt zu  $\overline{F_{VM}} = 4,05 \text{ kN}$ . Mit dieser Berechnung können nun die Messwerte aus der zweiten experimentellen Untersuchung ausgewertet werden nach  $\mu_K$ . Ein Auszug des ausgewerteten Datensatzes ist in Tabelle 0-3 im Anhang gegeben.

Für ein Fitting auf visuelle Merkmale wird ein Merkmal definiert, welches aus einer Bildverarbeitung den Grad der Korrosion bestimmen kann. In aktuellen Forschungsbeiträgen wird dazu ein *relativer Korrosionsgrad* verwendet (Vorobel et al., 2021), welcher auch in dieser Arbeit Anwendung finden soll. Dieser wird nach Formel 4-7 definiert zu:

$$\text{Relativer Korrosionsgrad } \varepsilon = \frac{\text{Anzahl korrodierter Pixel}}{\text{Gesamtzahl an Pixeln}} \cdot 100 \quad \text{Formel 4-7}$$

Um den Zusammenhang zwischen relativem Korrosionsgrad und Reibungszahl in der Kopfauflagefläche zu untersuchen, wird der Datensatz aus der zweiten experimentellen Untersuchung ergänzt. Vor der Demontage wurden dazu mehrere RGB-Bilder der jeweiligen Schraubverbindungen aufgenommen. Bestimmt durch das verwendete Objektiv, den Objektabstand und die Auflösung des Bildsensors stehen bei den Bildern der Schraubenköpfe durchschnittlich  $150 \times 150$  Pixel an Informationen zur Verfügung. Ein Auszug aus dem Datensatz ist in Tabelle 0-3 im Anhang dargestellt. Die Korrosionsbereiche auf den Schraubenköpfen wurden darin manuell annotiert. Dabei erfolgte die Kennzeichnung auf Basis etablierter Kriterien aus aktueller Forschung und Technik. So stellen Rahman et al. heraus, dass sich eine Korrosionserscheinung in zwei wesentlichen visuellen Merkmalen, nämlich einer *rauen Oberflächentextur* und *einem klar definierten roten Farbspektrum* auszeichnet (Rahman et al., 2021). Entsprechend wurden bei der manuellen Annotation sowohl Textur- als auch Farbeigenschaften berücksichtigt, um korrodierte Bereiche zu identifizieren. Zusätzlich zur Markierung der korrodierten Pixel wurden auch die Umrisse der Schraubenköpfe erfasst. Auf Grundlage dieser Daten kann über die in Formel 4-7 definierte Relation der relative Korrosionsgrad  $\varepsilon$  berechnet werden. Die daraus abgeleiteten Messergebnisse sind in Abbildung 4-12 grafisch dargestellt.

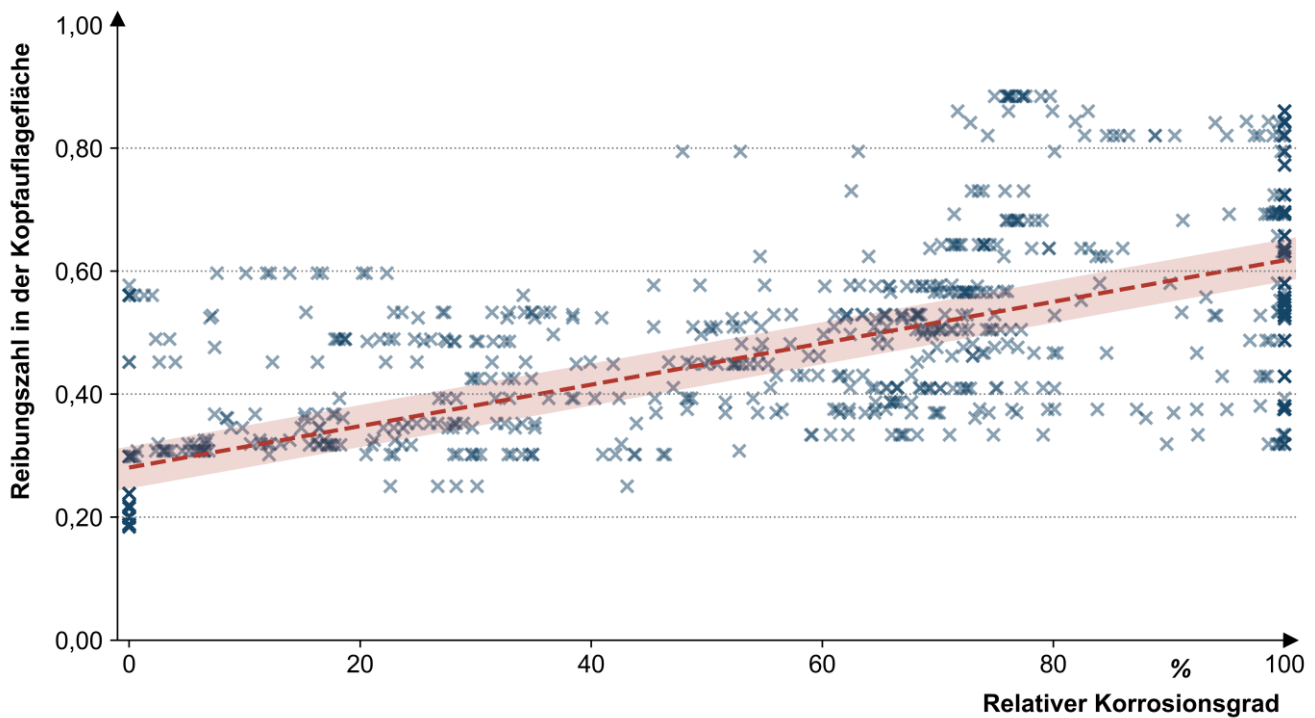


Abbildung 4-12: Zusammenhang zwischen dem relativen Korrosionsgrad und der Reibungszahl in der Kopfauf­lage­fläche

Es ist ein Trend in den Datenpunkten zu erkennen, welcher die Vermutung eines linearen Zusammenhangs zwischen Reibungszahl in der Kopfauf­lage­fläche  $\mu_K$  von dem relativen Korrosionsgrad  $\varepsilon$  nahelegt. Die Regressionsgerade einer linearen Regression ist in Abbildung 4-12 bereits (in Rot) mit eingezeichnet. Sie lässt sich beschreiben über die folgende Gleichung:

$$\mu_K = 3,37004 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon + 0,281$$

Formel 4-8

Der  $R^2$ -Wert beträgt 0,502 und zeigt damit eine moderate Anpassungsgüte der linearen Regression an. Das Modell wird dennoch aufgrund seiner praktischen Relevanz und unter Berücksichtigung der hohen Varianz der Messwerte weiterhin für die Formulierung des Zusammenhangs zwischen relativem Korrosionsgrad und der Reibungszahl in der Kopfauf­lage­fläche verwendet. Bei der folgenden Validierung der Ergebnisse muss die Modellgüte allerdings berücksichtigt werden. Mithilfe des so quantifizierten Wirkzusammenhangs lässt sich eine Formulierung des Losdrehmoments je nach Zustand individuell auf Grundlage des relativen Korrosionsgrades vornehmen.

### **Fazit zur Formulierung des Losdrehmomentes beim Entschrauben durch Bildverarbeitung**

In dem vorhergehenden Abschnitt konnte durch die Annahme von Vereinfachungen ein linearer Zusammenhang zwischen dem relativen Korrosionsgrad und der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche quantifiziert werden. Dieser in Formel 4-8 charakterisierte Zusammenhang besitzt allerdings nur eine beschränkte Allgemeingültigkeit. Durch die Streuung der zugrunde liegenden Daten und die getroffenen Annahmen ist darüber hinaus eine Ungenauigkeit der Modellierung zu erwarten. Trotzdem bietet sich ein Ansatz, um die im Zuge des Produktivbetriebs einer Demontagestation erhobene Daten zu verwenden und die automatisierten Modelle anzuwenden. Der Ansatz setzt auf das kontinuierliche Anpassen des quantifizierten Zusammenhangs zwischen relativem Korrosionsgrad und der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche. Nach jeder durchgeführten Demontage lässt sich das Losdrehmoment in Korrelation zum relativen Korrosionsgrad setzen. Folglich wird die Reibungszahl in der Kopfauflagefläche errechnet und die lineare Regression mit jedem Demontagevorgang angepasst. In einem folgenden Schritt muss das aufgestellte Modell in einem Laufzeitsystem technisch umgesetzt werden und in die praktische Anwendung gebracht werden. Dadurch wird die Validierung des Ansatzes ermöglicht. An das zu entwickelnde Bildverarbeitungssystem wird die Anforderung gestellt, dass es den relativen Korrosionsgrad zuverlässig ausgibt.

## 4.2.2 Abschermoment

Unter dem Abschermoment werden im Kontext dieser Arbeit die in der folgenden Abbildung 4-13 dargestellten Versagensfälle verstanden. Es werden explizit Fehler betrachtet, welche durch ein angelegtes Drehmoment im Zuge der Demontage hervorgerufen werden und nicht solche, die durch eine Überlastung der Schraube im Betrieb auftreten, beispielsweise zu große Axialkräfte.

Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung	Flankenscheren	Querschnittsscheren
Abscheren der Querschnittsfläche im Bereich des Schraubenschafts oder Gewindes	Abscheren der Flanken im Eingriff zum Schraubwerkzeug	Abscheren der Querschnittsfläche am Ende des Flankeneingriffs
		

Abbildung 4-13: Versagensarten von Schraubverbindungen bei der Demontage

Um der Zielstellung gerecht zu werden, lassen sich für die analytische Modellierung die folgenden Vereinfachungen annehmen:

- Es wird eine reine Scherbeanspruchung entlang der Bruchmantellinie zugrunde gelegt.
- Die Materialkennndaten werden in Form von eindimensionalen Parametern abgebildet. Somit wird ein homogenes Materialgefüge angenommen.

Die durch diese Annahmen bedingten Vereinfachungen führen zu einer gewissen Ungenauigkeit und sie können Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und dem realen Schraubenverhalten verursachen. Es ist daher im weiteren Verlauf der Arbeit zu prüfen, ob die Modellierungsgenauigkeit in einem für den Anwendungsfall akzeptablen Maß gemindert wird.



### **Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung**

Für das Abscheren des Schraubenbolzens kann auf etablierte Berechnungsverfahren und Richtlinien entsprechend dem Stand der Technik zurückgegriffen werden. So lassen sich Ansätze aus der Richtlinie DIN 743 teilweise auf den Anwendungsfall übertragen. Ausgehend von der Betrachtung des Gewindebolzens einer Schraubverbindung als tordierte Wellen kann die Richtlinie genutzt werden, um die Tragfähigkeit zu bestimmen (DIN 743-1); (DIN 743-2); (DIN 743-3).

Ausgangspunkt für die Berechnung der maximalen Spannung vor Versagen des Bauteils ist die maximale Torsionsschubspannung  $\tau_{max}$  im Bauteil. Dazu betrachtet man an dieser Stelle einen infinitesimal kleinen Torsionsstab (Dankert & Dankert, 2013, S. 361).

Hiernach lässt sich die folgende Wirkbeziehung mit dem angelegten Torsionsmoment  $M_T$  und dem Widerstandsmoment gegen Torsion  $W_t$  aufstellen:

$$\tau_{max} = \frac{M_T}{W_t} \quad \text{Formel 4-9}$$

Für den relevanten Fall einer Vollwelle lässt sich das Widerstandsmoment weiter beschreiben über den Durchmesser  $d$  der Welle:

$$W_t = \frac{\pi d^3}{16} \quad \text{Formel 4-10}$$

Im vorliegenden Anwendungsfall ist der Kerndurchmesser  $d_3$  der Schraube anzunehmen für die Berechnung des Widerstandsmoments der Vollwelle. Das Einsetzen von Formel 4-10 in Formel 4-9 und Umstellen nach dem Torsionsmoment liefert damit folgenden Zusammenhang:

$$M_T = \tau_{max} \cdot \frac{\pi d_3^3}{16} \quad \text{Formel 4-11}$$

Um das Torsionsmoment zu errechnen, welches maximal bis zum Versagen angelegt werden kann, muss nun eine Betrachtung des Werkstoffverhaltens erfolgen. Anzumerken ist, dass an dieser Stelle weitere Ungenauigkeiten in die Modellierungsergebnisse eingebracht werden. Aus der Fachliteratur ist bekannt, dass das Torsionsverhalten bei

statischer Beanspruchung viele Einflussfaktoren besitzt. Unter anderem gehören hierzu die Temperatur, die Anisotropie des Materials, die Oberflächenrauheit und die Beanspruchungsdauer. Da eine Berücksichtigung dieser Faktoren die Komplexität der Modellierung enorm erhöhen und zudem keinen signifikanten Mehrwert für den betrachteten Anwendungsfall liefern würde, werden diese Faktoren im weiteren Verlauf der Arbeit mittels eines Unsicherheitsfaktors zusammengefasst.

Der Zusammenhang zwischen der Torsionsfestigkeit  $\tau_{tB}$  und der Zugfestigkeit  $R_m$  kann theoretisch über die Gestaltänderungshypothese mit einem Umrechnungsfaktor  $f_B$  beschrieben werden (Wittel et al., 2019, S. 52). In Formel 4-12 wird dieser Zusammenhang zusätzlich mit einem Sicherheitsfaktor beschrieben, um Ungenauigkeiten aufzunehmen:

$$\tau_{tB} = (1,0 \dots 1,25) \cdot f_B \cdot R_m \quad \text{Formel 4-12}$$

In der Praxis wird häufig vereinfacht folgender Zusammenhang verwendet:

$$\frac{\tau_{tB}}{R_m} = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,6 \quad \text{Formel 4-13}$$

Vor dem Hintergrund der betrachteten Zielstellung lässt sich diese überschlägige Vereinfachung präzisieren. Bei der Demontage von unterschiedlichen Schraubverbindungen werden unmittelbar auch verschiedene Schraubenklassen und damit verschiedene Materialien betrachtet. Sofern diese Schraubenklasse bekannt ist, lässt sich der Umrechnungsfaktor verfeinern. Aus der Fachliteratur lassen sich Zahlenwerte entnehmen (Thomala, 1984; Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, 2012, S. 22; Wittel et al., 2019, S. 3–72, 2019). Ergänzend dazu findet sich auch in der DIN EN 20898-7 (bzw. ISO 898-7) eine Angabe, in der bereits der in Formel 4-12 angegebene Sicherheitsfaktor mit eingerechnet ist (ISO 898-7); (DIN EN 20898-7). Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die in Tabelle 4-2 angegebenen Umrechnungsfaktoren zwischen Torsionsfestigkeit und Zugfestigkeit angenommen.

Tabelle 4-2: Umrechnungsfaktoren zwischen Torsionsfestigkeit und Zugfestigkeit

<b>Festigkeitsklasse</b>	<b>4.8</b>	<b>8.8</b>	<b>10.9</b>	<b>12.9</b>	<b>A2-70</b>	<b>A4-50</b>	<b>A4-70</b>	<b>A4-80</b>
Umrechnungsfaktor $f_B$	0,74	0,65	0,62	0,60	0,74	0,83	0,74	0,70

Somit lässt sich für das maximale Drehmoment für den ungünstigsten Fall vor dem Bruch festhalten:

$$M_T = \tau_{tB} \cdot \frac{\pi d_3^3}{16} = 1,0 \cdot f_B \cdot R_m \cdot \frac{\pi d_3^3}{16} \quad \text{Formel 4-14}$$

Damit steht eine Formulierung für das maximale Drehmoment vor Bruch zur Verfügung. Die zur Berechnung erforderlichen Größen müssen sich von der roboterbasierten Demontagezelle bzw. der verwendeten Sensorik in der Systemumgebung erheben lassen. Insbesondere ist es erforderlich, dass Materialkennwerte (Zugfestigkeit, Festigkeitsklasse) sowie Schraubendurchmesser bekannt sind. Für die Anwendung in der automatisierten Demontage könnten die normierten Parameter in Form von Look-up-Tables umgesetzt werden. So können die geometrischen Abmessungen auf Basis der Schraubennenngröße abgeleitet werden.

### **Verlust der geometrischen Form des Schraubenkopfantriebes durch plastische Verformungen (Flankenscheren)**

In der Unterscheidung der Versagensarten nach Abbildung 4-13 werden an dieser Stelle die Beschreibungen für Schraubenkopfantriebe mit innen liegendem Kraftangriff aufgeführt. Für dieses Versagensmodell kann auf Vorarbeiten entsprechend dem Stand der Technik zurückgegriffen werden. In der Dissertationsschrift von Nave werden Formeln zur Berechnung des Flankenscherens für die Schraubenkopfantriebe Außensechskant, Innensechskant, Phillips und Schlitz angegeben (Nave, 2003, S. 62). Ergänzend findet sich in (Christoph Friedrich, 2003) eine Formel für Schraubenköpfe der Form Innensechsrund. In der Arbeit (A\_S. Zhu, 2023) werden die Berechnungen auf den vorliegenden Anwendungsfall angewendet. Es folgen die für den Anwendungsfall dieser Arbeit relevanten Formulierungen in Formel 4-15:

$$M_F = \frac{\pi}{2} \cdot e \cdot h \cdot f_B \cdot R_m \begin{cases} e \cdot k_{bit} & \text{für Innensechskant} \\ e \cdot k_{ph} & \text{für Phillips} \\ d_{di} & \text{für Innensechsrund} \end{cases} \quad \text{Formel 4-15}$$

mit

$M_F$  = Maximales Moment beim Flankenscheren

$R_m$  = Zugfestigkeit

$e$  = Außendurchmesser des Kraftangriffsmerkmals, siehe Abbildung 0-2 (im Anhang)

$h$  = Flankentiefe des Kopfantriebs, siehe Abbildung 0-2 (im Anhang)

$k_{bit}$  = Korrekturfaktor Abscherfläche mit

$$k_{bit} = \frac{(360^\circ - 12 \cdot \alpha)}{360^\circ}$$

$\alpha$  = Öffnungswinkel Kraftangriffsmerkmal, siehe Abbildung 0-2 (im Anhang)

$k_{ph}$  = Korrekturfaktor Abscherfläche, mit

$$k_{ph} = \frac{(360^\circ - 4 \cdot \beta)}{360^\circ}$$

$\beta$  = Öffnungswinkel Kraftangriffsmerkmal, siehe Abbildung 0-2 (im Anhang)

$d_{di}$  = Idealdurchmesser der Scherfläche

$f_B$  = Umrechnungsfaktor nach Tabelle 4-2

In der realen Anwendung unterliegen Schraube und Schraubwerkzeug Maßabweichungen von der Normgröße, hervorgerufen durch Fertigungstoleranzen und durch mechanischen Verschleiß des Werkzeugs. Daher wird der Korrekturfaktor  $k_{ph}$  eingeführt. In wie weit dieser für die Berechnung des maximalen Moments beim Flankenscheren erforderlich ist, wird in den praktischen Versuchsreihen herausgestellt.

Um die entstandenen Formelbeziehungen zu validieren, werden praktische Versuchsreihen durchgeführt. Somit wird auch untersucht, ob eine ausreichende Genauigkeit für den Anwendungsfall gegeben ist. Die Ergebnisse dieser Validierung sind in Kapitel 4.4 dargestellt.

### **Verlust der geometrischen Form des Schraubenkopfantriebes durch plastische Verformungen (Querschnittsscheren)**

Das Querschnittsscheren ist analog zum Flankenscheren zu verstehen und die Wirkbeziehungen ähneln sich stark. Der Unterschied besteht darin, dass beim Querschnittsscheren Schrauben mit Außenkraftangriff betrachtet werden, wie beispielsweise Außensechskantschrauben. Eine Formulierung für das Versagemoment beim Querschnittsscheren  $M_Q$  für die im Anwendungsfall relevanten Schraubenkopfantriebe findet sich in der Arbeit von M. Nave (Nave, 2003, S. 62).

$$M_Q = \frac{3}{16} \cdot R_m \cdot f_B \cdot e^2 \cdot h \quad \text{für Außensechskant} \quad \text{Formel 4-16}$$

Ergänzend sei angemerkt, dass die Betrachtung idealisiert geschieht. Auftretende Maßabweichungen durch Formtoleranzen sind in den Modellen nicht inkludiert. Diese werden in der anschließenden Validierung mittels Sicherheitsfaktoren eingeführt.

## **4.3 Laufzeitmodelle mittels Beschreibungsformat**

Die Umsetzung der analytischen Modelle verfolgt das Ziel, zur Laufzeit der Demontage Bewertungen hinsichtlich der Demontierbarkeit vorzunehmen. Mit den Laufzeitmodellen wird überprüft, ob das nutzungs- und alterungsbedingt veränderte Losdrehmoment  $M_L$  kleiner ist als das Versagemoment der Schraube. Nur wenn diese Bedingung erfüllt ist, wird die Demontage durch die roboterbasierte Demontagezelle erfolgen (vgl. Abbildung 4-2). Mathematisch lässt sich diese Überprüfung wie in Formel 4-17 darstellen:

$$M_L < \text{MIN}(M_T, M_F, M_Q) \quad \text{Formel 4-17}$$

Zur Auswertung der modellierten Kenngrößen durch die Prozesssteuerung ist es erforderlich, den IST-Zustand von Verbindungselementen maschinenverständlich zu modellieren. Wie aus den vorherigen Kapiteln hervorgeht, sind dazu Material- und Gestaltungsformationen der Fügepartner erforderlich. Die Literaturanalyse in Kapitel 2 hat aufge-

zeigt, dass die nach dem Stand der Technik verfügbaren Darstellungsformate nicht vollumfänglich auf die Problemstellung anwendbar sind. Der xMCF-Standard<sup>12</sup> wurde als der vielversprechendste Ansatz für den Anwendungsfall ausgewählt (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020). Der Standard in der aktuellen Version 3.1 muss für die Anwendung auf den in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsfall um eine Auswahl an Parametern ergänzt werden. Es ist erforderlich, die *Zeitstempel der Verbindungsherstellung*, das *Material der Platte*, die *statische Reibungszahl in der Kopfauf-lage*  $\mu_K$ , die *statische Reibungszahl im Gewinde*  $\mu_G$ , die *dynamische Reibungszahl in der Kopfauf-lage*, die *dynamische Reibungszahl im Gewinde* und die *effektive Klemmlänge* hinzuzufügen.

Damit wird das XML-Element `<threaded_connection/>` um die folgenden Attribute erweitert (Tabelle 4-3):

*Tabelle 4-3: Eingebettete Attribute*

<b>Attributes</b> (Attribute)	<b>Type</b> (Typ)	<b>Value Space</b> (Parameterraum)	<b>Status</b> (Status)	<b>Constraint</b> (Einschränkung)
timestamp	Alphanu- meric	Alphanumeric	Optional	-
plate_material	Alphanu- meric	Alphanumeric	Optional	-
effective_clamping_length	Floating point	> 0.0	Optional	-
static_head_friction	Floating point	> 0.0	Optional	-
kinetic_head_friction	Floating point	> 0.0	Optional	-
static_thread_friction	Floating point	> 0.0	Optional	-
kinetic_thread_friction	Floating point	> 0.0	Optional	-

<sup>12</sup> VDA (2020), xMCF – A Standard for Describing Connections & Joints in Mechanical Structures (Version 3.1). <https://www.vda.de/de/aktuelles/publikationen/publication/xmcf---a-standard-for-describing-connections---joints-in-mechanical-structures--version-3.1-> [19.07.2025]

Diese Eigenschaften haben die folgende Semantik:

- **timestamp:** Zeitpunkt, zu dem die Verbindung initial gesetzt oder letztmalig verändert wurde
- **plate\_material:** Materialkennzeichnung des Plattenmaterials der Verbindung
- **effective\_clamping\_length:** Effektive Klemmlänge der Schraubverbindung
- **static\_head\_friction:** Statische Reibungszahl in der Kopfauflage
- **kinetic\_head\_friction:** Dynamische Reibungszahl in der Kopfauflage
- **static\_thread\_friction:** Statische Reibungszahl im Gewinde
- **kinetic\_thread\_friction:** Dynamische Reibungszahl im Gewinde

Ein Beispiel, welches alle Typen enthält, ist in der folgenden Abbildung 4-14 dargestellt.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xmcf xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="xmcf_3_1_0.xsd">
  <version>3.1.0</version>
  <date>2023-03-29</date>
  <units length="mm" angle="rad" mass="kg" force="N" time="s" torque="Nm"/>
  <!--Poltopf & Getriebe-->
  <connection_group id="1">
    <connected_to>
      <assy index="A1">
        <part label="Poltopf"/>
        <part label="Getriebe"/>
      </assy>
      <assy index="A2">
        <part label="Lagersatz"/>
        <part label="Rotor"/>
      </assy>
    </connected_to>

    <connection_list>
      <connection_0d label="Linsenkopfschraube1">
        <!-- Linsenkopfschraube1 -->
        <loc>12.1058 37.1065 0.881963</loc>
        <threaded_connection diameter="4" length="13" head_diameter="16" head_height="3.2"
head_type="T3" sink_size="0" pitch="2.5" lead="2.5" torque="1.3" static_head_friction="0.8"
kinetic_head_friction="0.6" static_thread_friction="0.4" kinetic_thread_friction="0.4,,
strength_property_class="10.9" part_code="PT 4x16 Stahl Zink-Nickel,10.9" timestamp="2022-10-26"
plate_material="PP" effective_clamping_length="13">
          <normal_direction> x="0" y="0" z="-1" </normal_direction>
          <screw label="PT 4x16"/>
        </threaded_connection>
      </connection_0d>
    </connection_list>
  </connection_group>
```

Abbildung 4-14: Minimalbeispiel für eine `<connection_group>` mit angepassten Parametern

Im Programmablauf der zu konzipierenden automatisierten Demontagestation wird zusammen mit der Demontage-Prozessanforderung der übergeordneten Steuerung auch das zum Core gehörige xMCF-Beschreibungsformat geliefert. In diesem befinden sich die für die Demontage erforderlichen Kenngrößen. Mithilfe eines Interfaces werden die wesentlichen Größen eingelesen und in einer Datenbank abgebildet. Für eine umfassende Darstellung der Datenverarbeitung zur Laufzeit sei auf ergänzende Literatur verwiesen (Mangold, Mata et al., 2023). Auf Grundlage der Einträge in der Datenbank findet die Modellierung der in Kapitel 4.2 dargestellten Kenngrößen statt und die Demontierbarkeit wird bewertet.

Auf diese Weise wird Domänenwissen der Verbindungstechnologie für die Modellierung des Drehmomentfensters und die Bewertung der Demontierbarkeit verwendet. Im Detail werden vor der Demontage der Schrauben RGB-Bilder aufgenommen und verarbeitet. Die so gewonnenen Informationen über den Schraubentyp und den Zustand der Schrauben werden korreliert mit der zu erwartenden Erhöhung des Losdrehmoments.

## **4.4 Validierung der Modelle**

Die erarbeiteten analytischen Modelle werden im folgenden Kapitel mithilfe von praktischen Versuchsreihen validiert.

### **4.4.1 Losdrehmoment**

Zur Validierung des Modells wird der in Kapitel 4.2.1 betrachtete Einfluss der Korrosion auf die Reibungszahl in der Kopfauflagefläche auf eine praktische Anwendung übertragen. Dazu werden elektrische Startermotoren für Kfz-Verbrennungsmotoren verwendet, deren EoL Prozesskette im aktuellen Stand der Technik teilweise durch Remanufacturing Anwendungen umgesetzt werden (siehe Abbildung 5-1). Die Abnutzungerscheinungen und Korrosionsgrade der ausgewählten Startermotoren repräsentieren den adressierten Anwendungsfall der vorliegenden Arbeit. Andererseits unterscheiden sich die Schraubfälle zu den Daten, welche in Kapitel 4.2.1 zur Modellaufstellung dienten. Die in Formel 4-8 formulierte lineare Beziehung zwischen dem relativen Korrosionsgrad und der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche wurde auf Basis von Daten aus kontrollierten Versuchen entwickelt. In der Validierung werden jedoch die Daten aus



realen Remanufacturing Produkten verwendet. Es ist daher nicht das Ziel, die exakten numerischen Werte des in Formel 4-8 qualifizierten Zusammenhangs zu reproduzieren. Vielmehr wird durch die Validierung überprüft, ob der allgemeine Ansatz, die beiden Prozessgrößen zu korrelieren auch unter realen Bedingungen für die automatisierte Bewertung der Demontierbarkeit anwendbar ist. In diesem Zusammenhang soll insbesondere das iterative Verfahren berücksichtigt werden. Mit jedem weiteren Demontagevorgang werden zusätzliche Datenpunkte in die Regression aufgenommen, wodurch das Modell fortlaufend angepasst wird. Somit wird auch die kontinuierliche Erweiterung des Datensatzes fortlaufend optimiert, was die Anwendbarkeit des Modells auf verschiedene Schraubfälle weiter stärkt.

Die Validierung erfolgt durch die Demontage von 12 Startermotoren mit unterschiedlichen Abnutzungerscheinungen. Analog zum Vorgehen im vorherigen Kapitel wird zunächst die Montagevorspannkraft durch Messungen in den betrachteten Schraubverbindungen der Cores bestimmt. Es werden mehrere neue Startermotoren demontiert und die Montagevorspannkraft in der Schraube wird ermittelt. Die Reibungszahlen für das Gewinde und die Kopfauflagefläche werden initial aus Tabellenwerten übernommen. Im Anschluss werden die Startermotoren mit unterschiedlichen Abnutzungerscheinungen zur Validierung demontiert. Der durch Bildverarbeitung ermittelte relative Korrosionsgrad wird in Korrelation mit der Reibungszahl in der Kopfauflage gebracht und somit der in Formel 4-8 herausgestellte Zusammenhang auf den Anwendungsfall übertragen. Die Losdrehmomente aus den abgeschlossenen Demontagevorgängen werden mit in den Datensatz übernommen und die Regression somit fortlaufend verbessert. Folglich greift die erste Regression auf die Daten von drei Demontagevorgängen zu und die vierte Regression auf die Daten von zwölf Demontagevorgängen. Die nachfolgende Abbildung 4-15 zeigt diesen Zusammenhang mit einer zunehmenden Anzahl an Demontagevorgängen auf. Es sind vier Regressionsgeraden ersichtlich, welche die jeweils davorliegenden Messwerte mit inkludieren.

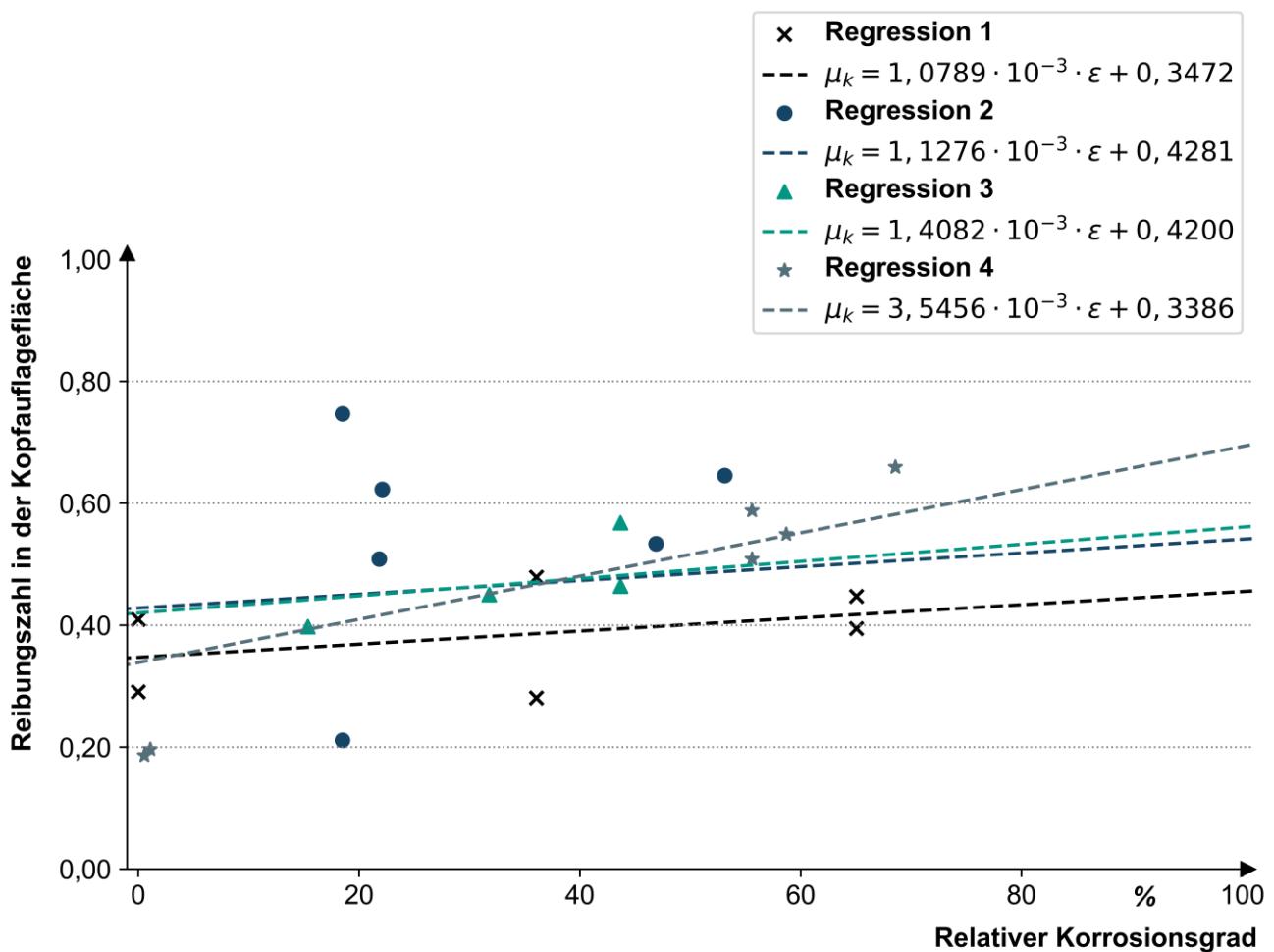


Abbildung 4-15: Verbesserung der Regression mit zunehmender Anzahl an Demontagevorgängen

Betrachtet man die absolute Differenz zwischen dem gemessenen Losdrehmoment und dem modellierten Losdrehmoment ergibt sich die folgende Abbildung 4-16. Es ist erkennbar, dass die modellierten Werte mit einer steigenden Anzahl an Demontagevorgängen genauer werden, was sich dem fallenden Trend der relativen Abweichung entnehmen lässt. Die ermittelte relative Abweichung beginnt bei den ersten demontierten Startermotoren zunächst bei etwa 50 Prozent und endet nach der Demontage der 12 Startermotoren bei etwa 20 Prozent. Bei den Schrauben mit Innensechsrund Kraftangriffsmerkmal ist im Verlauf der Versuchsreihe ein leichter Anstieg der relativen Abweichung zu erkennen. Dieser könnte auf verschiedene Einflüsse zurückzuführen sein, wie die Streuung der Messwerte. Eine größere Anzahl an Messungen würde hier zu einer stabileren Datenbasis und damit einer genaueren Einstellung des Modells führen.

Ob die Genauigkeit der Modellierungen genau genug ist, lässt sich in den abschließenden Versuchen und der Validierung des Gesamtsystems in Kapitel 7 feststellen. Die durchgeführten Versuche bestätigen das generelle Vorgehen. Es sind jedoch für die Bestimmung verlässlicher quantitativer Werte noch deutlich mehr Messungen erforderlich. Daher muss neben der Modellvalidierung auch eine Überprüfung der Modellergebnisse im Anwendungsfall der Demontierbarkeitsbewertung stattfinden. Dies findet in weiteren Versuchen in der abschließenden Validierung in Kapitel 7 statt.

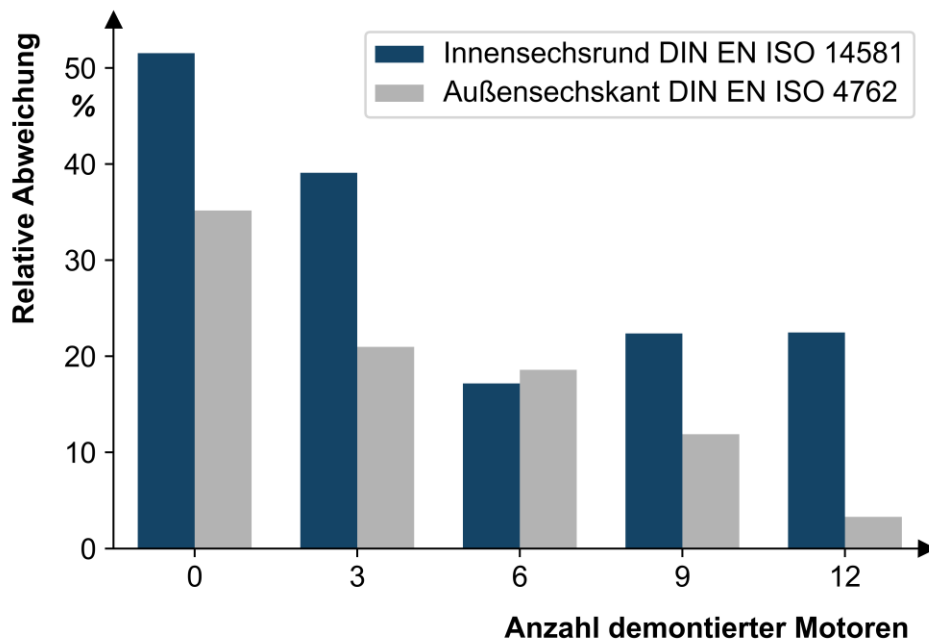


Abbildung 4-16: Validierung Modell Losdrehmoment

#### 4.4.2 Abschermoment

Die aufgestellten Modelle für die Versagensmomente Bruch, Flankenscheren und Querschnittsscheren werden in Form von Matlab-Programmen umgesetzt und in dieser Umgebung validiert. Für die Integration in die Laufzeitanwendung der Demontageanlage werden die Modelle in Python-Skripten umgesetzt.

#### Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung

Zur Überprüfung des Versagensmodells *Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung* werden mehrere Muttern passender Größe auf ein Gewinde aufgesetzt, gekontert verschraubt und in einen Schraubstock eingespannt. Mit einem digitalen Drehmomentadapter des Herstellers KS Tools Werkzeuge und Maschinen GmbH<sup>13</sup> auf einem Schraubendreher wird die Schraube in Anzugsrichtung angezogen, bis das Gewinde in Folge der Torsionsbelastung bricht. Bei kleineren Drehmomenten, welche außerhalb des Messbereichs liegen, wird ein digitaler Drehmomentsensor des Herstellers ATI<sup>14</sup> mit einer Prüfvorrichtung versehen und für die Messung verwendet. Anschließend wird das am Sensor gemessene maximale Drehmoment notiert. Bei Schrauben der gleichen Größe und Festigkeitsklasse wird der Versuch fünfmal wiederholt, um Versuchsfehler auszuschließen. Bei der Versuchsdurchführung wird das Drehmoment allmählich und nicht schlagartig erhöht. Für die Durchführung der Experimente werden im Anwendungsfall häufig auftretende Schraubenklassen nach Tabelle 4-4 gewählt.

*Tabelle 4-4: Zur Validierung verwendete Schraubenklassen*

<b>Schraubenklasse</b>	<b>Anzahl</b>
M3 8.8	5
M4 8.8	5
M6 8.8	5
M6 A2-70	5
M6 12.9	5
M8 8.8	5

<sup>13</sup> KS Tools Werkzeuge und Maschinen GmbH (o.D.), 1/2" Digitaler Drehmomentadapter mit Winkelmesser, 68-340 Nm. Artikel-Nr.: 516.1194 <https://www.kstools.com/produkte/lkw-spezialwerkzeuge/motor-zyylinderkopf-motorblock/werkzeuge-fuer-zyylinderblock-verschraubungen/digitaler-drehmomentadapter-mit-winkelmesser?number=516.1194> [19.07.2025]

<sup>14</sup> ATI Industrial Automation (2019), F/T Sensor: Axia80-M20 Typenbezeichnung Axia80-M20. [www.atia.com/products/ft/ft\\_models.aspx?id=Axia80-M20](http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Axia80-M20) [19.07.2025]

Insgesamt wird die Validierung des Versagensmodells somit mit 30 Versuchen durchgeführt. Abbildung 4-17 zeigt die ermittelten Messdaten mitsamt den Modellwerten.

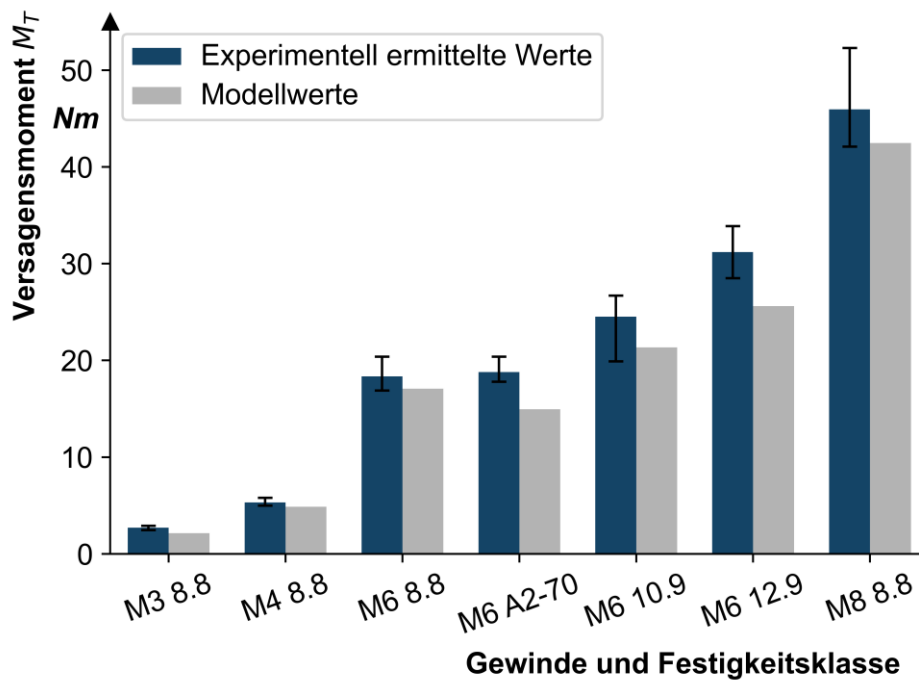


Abbildung 4-17: Ergebnisse zum Bruch infolge einer Torsionsbeanspruchung

Es lässt sich erkennen, dass die Modellwerte für die betrachteten Schrauben eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten aufweisen. Die Streuung der experimentellen Werte ist moderat und deutet auf einen ausreichend genauen Versuchsaufbau hin. Zur weiteren Interpretation der Ergebnisse wurde ein nichtparametrischer Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test durchgeführt, um die Abweichung der Messwerte vom Modellwert statistisch zu bewerten. Dieser Test ist robust gegenüber kleinen Stichprobengrößen und Verletzungen der Normalverteilungsannahme. Dabei lässt sich festhalten, dass der modellierte Wert in allen betrachteten Fällen unter dem gemessenen Mittelwert liegt. Dies deutet auf eine systematische Unterschätzung des Versagensmodells *Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung* hin. Diese Abweichung kann durch parasitäre Drehmomente im Messaufbau sowie ein konservativ rechnendes Modell erklärt werden. Ob die Genauigkeit der Modellierungen ausreichend genau ist, lässt sich in den abschließenden Versuchen und der Validierung des Gesamtsystems in Kapitel 7 feststellen.

### **Verlust der geometrischen Form des Schraubenkopfantriebes durch plastische Verformungen (Flankenscheren)**

Für die Validierung des Versagensmodells *Flankenscheren* werden ebenfalls praktische Versuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau entspricht im Wesentlichen dem Aufbau für die Prüfung des Versagensmodells *Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung*. Da das Moment beim Flankenscheren jedoch häufig größer ist, kann der Schraubenkopf direkt in den Schraubstock eingespannt werden. Dazu werden zunächst mit einem Bandschleifer ebene Flächen auf beiden Seiten des Schraubenkopfes hergestellt, um eine ausreichende Klemmfläche zwischen Schraubenkopf und Schraubstock zu schaffen. Während des Versuchs wird darauf geachtet, das Werkzeug vollständig in den Schraubenkopf einzuführen und das Moment möglichst senkrecht wirken zu lassen. Abweichungen von dieser Vorgehensweise können zu einer falschen Abscherungstiefe führen und damit die Messgenauigkeit beeinträchtigen. Für die Durchführung der Experimente werden relevante Schraubenkopfantriebe entsprechend dem Anwendungsfall nach Tabelle 4-5 ausgewählt. Die Stichprobengrößen variieren dabei aus praktischen Gründen. Der Fokus der Messreihe liegt auf einer repräsentativen Auswahl unterschiedlicher Schraubenkopfantriebe. Zudem können im Verlauf der aufwendigen Probenvorbereitung Beschädigungen auftreten, die zu einer Reduzierung der Stichprobengröße in einzelnen Klassen führen. Die beschriebenen Schwankungen sind daher methodisch begründet und beeinflussen die Validität der Ergebnisse nicht.

*Tabelle 4-5: Schraubenklassen zur Validierung der Modelle*

<b>Schraubenkopfantrieb</b>	<b>Gewindegröße</b>	<b>Festigkeitskl.</b>	<b>Anzahl</b>
Kreuzschlitz Form Z Nennmaß 1	M3	A4-50	6
Kreuzschlitz Form H Nennmaß 1	M3	A4-50	6
Innensechskant Nennmaß 2,5	M3	8.8	5
Innensechskant Nennmaß 2,5	M3	A2-70	7
Innensechskant Nennmaß 2,5	M3	10.9	5
Kreuzschlitz Form Z Nennmaß 2	M5	4.8	8
Kreuzschlitz Form H Nennmaß 2	M5	A4-50	7
Kreuzschlitz Form Z Nennmaß 2	M5	A4-50	5
Kreuzschlitz Form H Nennmaß 3	M6	4.8	6
Kreuzschlitz Form H Nennmaß 3	M6	A4-50	6
Kreuzschlitz Form Z Nennmaß 3	M6	A4-50	9
Innensechskant Nennmaß 5	M6	A2-70	7
Innensechskant Nennmaß 5	M6	8.8	5

Pro Schraubenkopfantrieb erfolgen mindestens fünf Versuche. Insgesamt werden 82 Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse in der Abbildung 4-18 dargestellt sind.

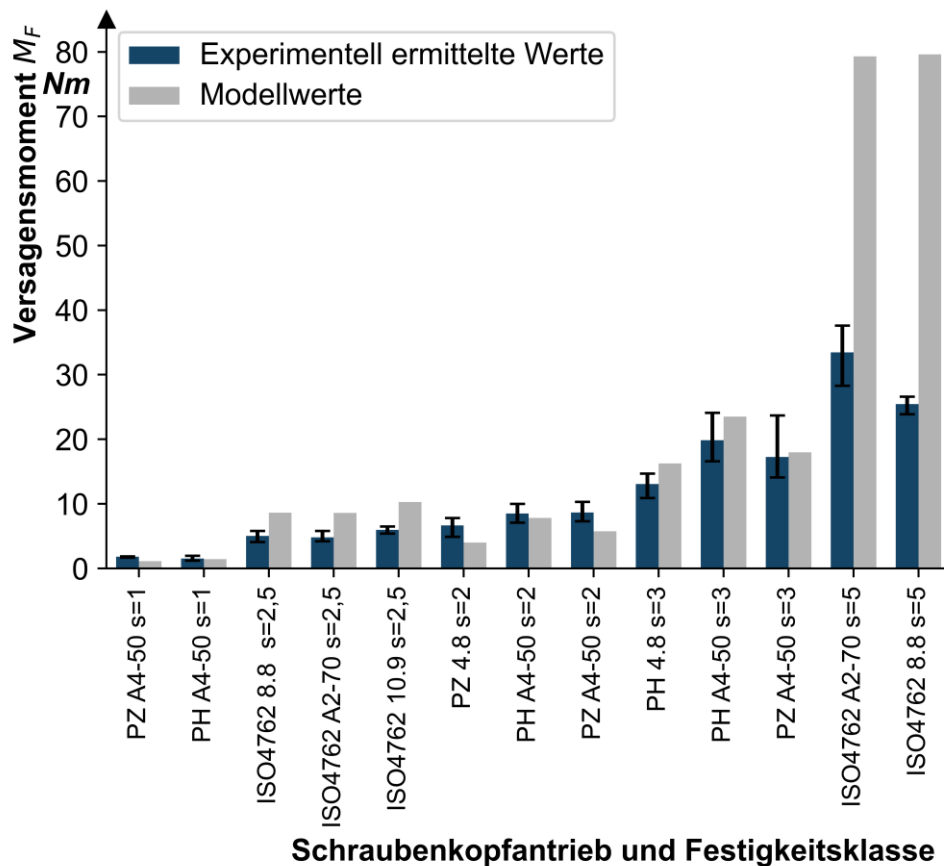


Abbildung 4-18: Drehmomentwerte für das Versagensmodell Flankenscheren mit  $k_{bit} = 1$  und  $k_{ph} = 1$

Die Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die modellierten Versagensmomente mit den gemessenen Werten vergleichbar sind. Es lässt sich jedoch feststellen, dass die modellierten Werte für manche Schraubenkopfantriebe unter den gemessenen Werten liegen, während sie für andere darüber liegen. Diese Abweichungen könnten über mehrere Gründe erklärt werden. Einerseits könnte es auf eine unvollständige Modellierung von physikalischen Effekten zurückzuführen sein. Falls mit Formel 4-15 nicht alle relevanten Wechselwirkungen oder Einflussfaktoren berücksichtigt werden, können statistisch verteilte Ungenauigkeiten auftreten. Andererseits wurden einige vereinfachende Annahmen für die Modellbildung getroffen. Es könnte sein, dass die zugrundeliegenden

physikalischen Effekte entsprechende Abweichungen hervorrufen. Darüber hinaus treten Messungenauigkeiten auf. Zum Beispiel beeinflusst die mechanischen Momenteinbringung in den Experimenten die Messergebnisse. Besonders fällt bei der Betrachtung der Ergebnisse die große Abweichung bei den Schrauben mit Innensechskant-Kopfantrieb (ISO 4762) auf. Diese könnte sich über die Maßabweichungen des Werkzeugs und die Toleranzen der Schraubenkopfantriebe erklären lassen, zum Beispiel durch mechanische Abnutzung des Werkzeuges und den Ungenauigkeiten beim Einprägen der Schraubenkopfantriebe hervorgerufen. Um diesen zu begegnen, werden die in der zu konzipierenden Demontagezelle verwendeten Werkzeuge eingemessen. Die Abweichung wird mit 0,1 mm für das Innensechskant M3-Werkzeug und 0,28 mm für das Innensechskant M6-Werkzeug bestimmt. Unter Berücksichtigung von trigonometrischen Winkelbeziehungen kann der Einfluss herausgerechnet und das Modell entsprechend über die Korrekturfaktoren  $k_{bit}$  und  $k_{ph}$  angepasst werden. Schließlich ergeben sich die in Abbildung 4-19 angepassten Modellwerte. Ob die Genauigkeit des angepassten Modells ausreichend genau ist, lässt sich in den abschließenden Versuchen und der Validierung des Gesamtsystems in Kapitel 7 feststellen.

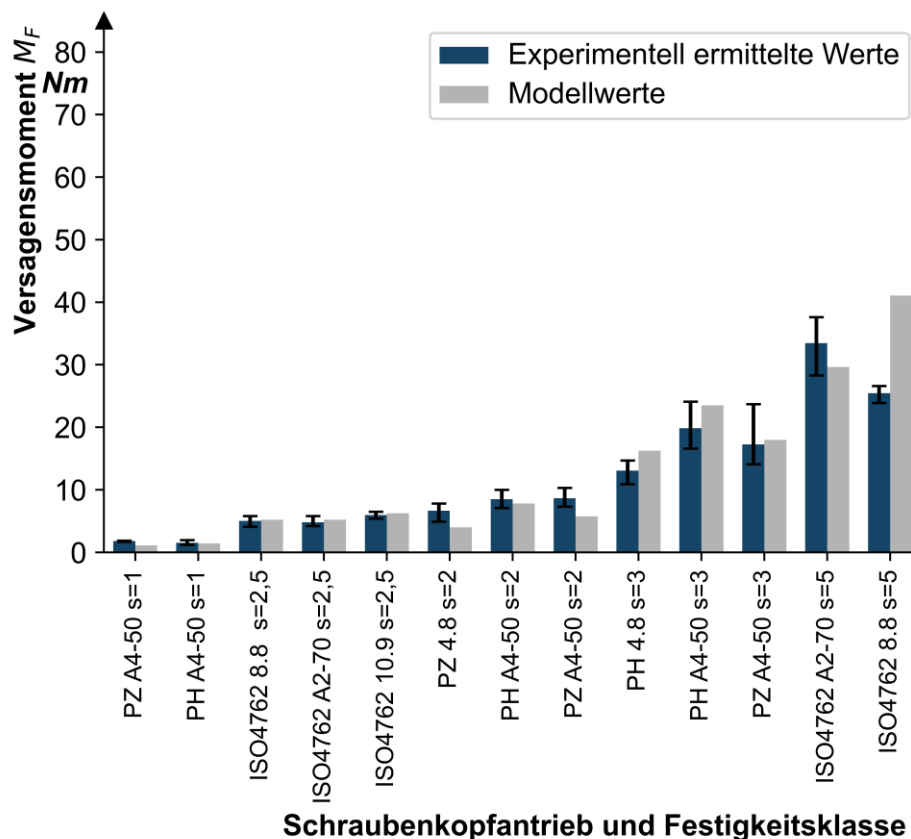


Abbildung 4-19: Drehmomente für das Flankenscheren unter Berücksichtigung der Spaltmaße mit  $k_{bit} \neq 1$  und  $k_{ph} = 1$



### **Verlust der geometrischen Form des Schraubenkopfantriebes durch plastische Verformungen (Querschnittsscheren)**

Das verbleibende Versagensmodell *Querschnittsscheren* kann in dem experimentellen Setup nicht validiert werden, da das eingebrachte Moment für die betrachteten Schraubentypen stets das Bruchmoment des als Welle modellierten Schraubenschafts übersteigt. Dies zeigt, dass dieses Versagensszenario im betrachteten Anwendungsfall nicht auftritt, da es eher zum *Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung* kommt, bevor eine Schraube mit außenliegendem Kraftangriff infolge Querschnittsscherens versagt. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 4-20 ein Vergleich der modellierten Versagensmomente dargestellt.

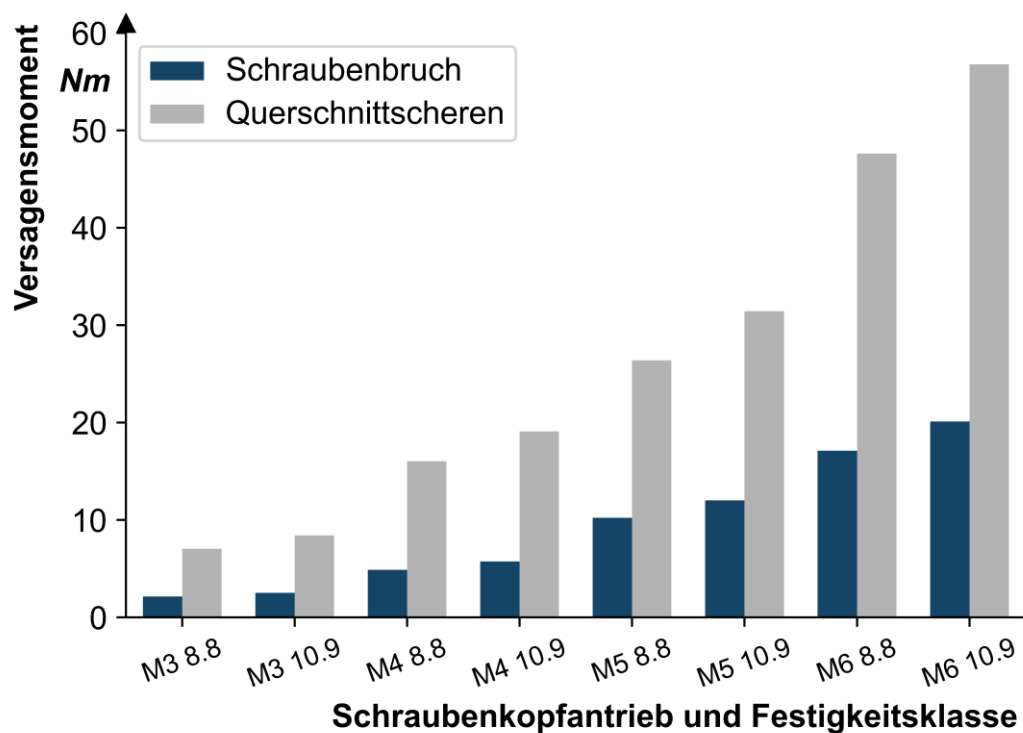


Abbildung 4-20: Vergleich Querschnittsscheren und Schraubenbruch

Es wird deutlich, dass das modellierte Versagensmoment beim *Bruch infolge der Torsionsbeanspruchung* immer kleiner ist als das modellierte Versagensmoment beim Verlust der geometrischen Form des Schraubenkopfantriebes durch plastische Verformungen (Querschnittsscheren). Diese Beobachtung konnte darüber hinaus auch in praktischen Versuchen bestätigt werden und entspricht dem Ergebnis des Standes der Technik (Ahmad Hedayat et al., 2017). Für die Anwendung auf die vorliegende Problemstel-

lung bleibt das Versagensmodell *Querschnittsscheren* zwar technisch vollständig implementiert, wird jedoch im betrachteten Fall aufgrund des in Formel 4-17 definierten Minimalkriteriums nicht wirksam. Dieses legt fest, dass stets das kleinste der berechneten Versagensmomente maßgeblich ist. Dennoch garantiert die Implementierung beider Mechanismen, dass das Modell robust gegenüber veränderten Schraubenkonfigurationen oder Belastungssituationen bleibt.

## 5 Konzeption einer Demontagezelle für das Remanufacturing

Um die analytischen Modelle in eine praktische Anwendung zu bringen und die Anwendbarkeit des in dieser Arbeit verfolgten Ansatzes zu untersuchen, wird in den folgenden Kapiteln die systematische Entwicklung einer automatisierten Demontagezelle beschrieben. Bei den betrachteten Cores handelt es sich um eine Produktfamilie von Startermotoren für Kraftfahrzeuge. Die Konstruktionsmethodik zur Entwicklung der Demontagezelle folgt dabei einer an die Richtlinien VDI 2221 und VDI 2222 angelehnten Vorgehensweise (VDI 2222 Blatt 1). Somit wird in der ersten Phase, der Planungsphase, zunächst die Aufgabenstellung geklärt und präzisiert. Mithilfe einer Anforderungsliste wird die Funktionsstruktur ermittelt und es werden Hauptfunktionen identifiziert. Jene Hauptfunktionen werden zu einem Gesamtmaschinenkonzept integriert und dieses wird in realisierbare Module gegliedert. In der folgenden Konzeptions- und Gestaltungsphase werden Lösungskonzepte für die Module entwickelt und detaillierte Konstruktionen ausgearbeitet. Die anschließende Phase der Realisierung wird in Kapitel 6 beschrieben. Dort wird der mechatronische Aufbau der automatisierten Demontagezelle im Detail erläutert.

### 5.1 Systemabgrenzung und Anwendungsfelder

Die zu entwickelnde Demontagezelle ist in eine prototypische (De-)Montagelinie integriert. Diese besteht aus verschiedenen Produktionszellen, auch Stationen genannt, welche durch eine übergeordnete Steuerung orchestriert werden. Neben der Demontagezelle befinden sich eine Station zur multisensoriellen Befundung der Cores, eine Station zum Übertrag von menschlichen (De-)Montageprozessen auf die Steuerungsebene sowie eine autonome Intralogistik über fahrerlose Transportsysteme in der (De-)Montagelinie. An der Befundungsstation werden sowohl zu Beginn der Demontage als auch teilweise zwischen den Demontageschritten Daten über den Core und Informationen zu funktionsrelevanten Eigenschaften auf Komponentenebene erhoben. An der Station zum Übertrag von menschlichen (De-)Montageprozessen auf die Steuerungsebene werden Handlungsweisen von Werkern erfasst. In Korrelation mit der Beobachtung der Augenbewegungen kann so Erfahrungswissen externalisiert werden.

Die gesamte (De-)Montagelinie nutzt das Konzept der *fluiden Automatisierung* (Wurster et al., 2021), um den besonderen Herausforderungen der Flexibilität auch auf Leitebene gerecht zu werden. Eine detaillierte Darstellung der Arbeitsstationen und der Steuerung auf Ebene des Fertigungsmanagementsystems (engl. *Manufacturing Execution System*) wird durch Lanza et al. vorgestellt (Lanza et al., 2022).

Für die Konzeption der Demontagezelle können verschiedene Annahmen getroffen werden. Zunächst wird die erforderliche Orchestrierung der Gesamtanlage mittels einer übergeordneten Steuerung realisiert. In dieser wird auch die Verteilung von Bearbeitungsaufträgen, das *Job Scheduling*, gelöst. Folglich ist das Forschungsfeld der *Line Balancing Probleme in der Demontage* nicht Betrachtungsgegenstand der vorliegenden Arbeit. Weiterhin wird die Demontagezelle in einer Laborumgebung betrieben. Es müssen somit keine besonderen Maßnahmen hinsichtlich der Einsatzumgebung der Anlage getroffen werden. Die Anlieferung der Cores erfolgt über ein fahrerloses Transportsystem (engl. *Automated Guided Vehicle, AGV*). Mit einem speziellen Übergabemodul werden diese in die Demontagezelle eingebracht. Vor der (De-)Montagelinie findet bereits eine teilweise Demontage statt. Dabei werden die entsprechenden Elektromotoren aus dem Kraftfahrzeug extrahiert. Es kann folglich angenommen werden, dass die Cores bereits im ausgebauten Zustand von dem Kraftfahrzeug an die Demontagezelle geliefert werden. Der Demontagevorranggraph für den zu demontierenden Core wird von der Station zum Übertrag von menschlichen (De-)Montageprozessen erarbeitet und kann in der automatisierten Demontagezelle verwendet werden.

Hinsichtlich der technischen Realisierung der Demontagezelle können darüber hinaus weitere Annahmen getroffen werden:

- Eine initiale Beschreibung der Hardwarekomponenten im entwickelten Beschreibungsformat (Kapitel 4.3) liegt vor. Die darin enthaltenen Informationen werden während der Demontageprozesse durch die sensortechnische Wahrnehmung der Demontagezelle verbessert.
- Die Handhabung der Cores innerhalb der Demontagezelle stellt sich durch die wechselnden morphologischen Eigenschaften der Produkte als besonders herausfordernd dar. Da der Forschungsbereich der *Handhabung von unbekannten Bauteilen* nicht Fokus dieser Arbeit ist, wird für die zu entwickelnde Demontagezelle angenommen, dass die Cores in einem Spannmodul der Einheit bereitgestellt werden. Damit einher geht auch eine sichere Einspannung der Bauteile für die Demontage in einer solchen Art und Weise, dass die zu trennenden

Schraubverbindungen senkrecht zur Demontagerichtung exponiert sind. Eine gegebenenfalls erforderliche Umorientierung des Bauteils ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

- Für die Ableitung von Lage und Orientierung der Demontageobjekte im Raum stützt sich die Demontagezelle auf Punktwolken. Deren Generierung und Auswertung ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Für die technische Realisierung der Ermittlung von Informationen zur Lage und Orientierung sei auf ergänzende Literatur verwiesen (Wu et al., 2022).
- Um den Anforderungen der Systemintegration in die (De-)Montagelinie nachzukommen, ist eine bestimmte Infrastruktur erforderlich. Es ist eine vorgegebene Struktur für die Modularisierung zu verwenden. Durch Platten mit bestimmten Dimensionen werden einzelne Module hardwareseitig gebündelt. Ebenso werden bestimmte Tisch-Geometrien vorausgesetzt, die nicht erarbeitet werden müssen. Die Verwendung von UR10e-Kinematiken des Herstellers Universal Robots ist verbindlich und die Auswahl der Roboterkinematik ist nicht Gegenstand der Konzeption. Ein wesentlicher Fokus soll jedoch auf der Konzeption und Gestaltung der Endeffektoren für die Roboter liegen. Durch diese werden die Roboterkinematiken für die Demontageaufgabe angepasst.

Die in dieser Arbeit entwickelten analytischen Modelle für die Demontage finden Anwendung in der Demontage von Elektromotoren. Es werden Cores betrachtet, deren End-of-Life-Strategie bereits heute häufig als Remanufacturing Anwendung umgesetzt ist. Somit wird eine systematische Vergleichbarkeit zwischen der in dieser Arbeit entstehenden automatisierten Demontagelösung und den etablierten manuellen Verfahren ermöglicht. Gleichzeitig wird die technische Relevanz der entwickelten Lösung für eine spätere mögliche industrielle Anwendung gegeben. Im Speziellen werden Startermotoren für Kfz-Verbrennungsmotoren sowie elektrische Antriebe für Komfortanwendungen in Kfz genutzt. Beide Motorentypen unterliegen während ihres Betriebes bestimmten Umgebungseinflüssen. Sie sind verschiedenen Medien ausgesetzt, werden durch mechanische Lasten beansprucht und stehen unter thermischen Einflüssen. Typische Abnutzungserscheinungen treten durch Verschmutzung und Korrosion auf. Die folgende Abbildung 5-1 zeigt eine Auswahl der betrachteten Elektromotoren mit entsprechenden Verschleißerscheinungen.



*Abbildung 5-1: Betrachtete Cores*

## 5.2 Analyse der Anforderungen

Vor dem Hintergrund des adressierten Anwendungsfalles und der auftretenden Unsicherheiten bei der Demontage werden die resultierenden Anforderungen an die Demontagezelle abgeleitet. Um diese eindeutig zu definieren und zu kategorisieren, wird eine Anforderungsliste nach (Göhlich & Fay, 2021, S. 217–218) aufgestellt. In dieser Anforderungsliste werden die Anforderungen in Fest- und Wunschforderungen (F/W) eingeteilt. Die folgende Tabelle 5-1 zeigt einen Ausschnitt aus der Anforderungsliste, welche vollständig in Tabelle 0-4 im Anhang zu finden ist. Die in der Anforderungsliste enthaltenen Aspekte konkretisieren die Anforderungen, wie sie in dem Beitrag von W. Chen vorgestellt werden (W. H. Chen, 2017). Zudem werden Anforderungen aus einer Analyse der manuellen Demontage durch erfahrene Werker abgeleitet (A\_Merkle, 2020; A\_Schmidt, 2020). Eine Darstellung, wie sich diese Anforderungen auch für die Konzeption und Gestaltung einer Demontagezelle für Kfz-Batterien anwenden und verallgemeinern lassen, ist darüber hinaus in einer Publikation enthalten, die in Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit entstanden ist (Fleischer et al., 2021).

*Tabelle 5-1: Auszug aus der Anforderungsliste für die Konstruktion der Demontagezelle (A\_Merkle, 2020; A\_Schmidt, 2020)*

Nr.	Anforderung	F/W	Kategorie
1	Kompatibilität mit Hardware der (De-)Montagelinien und Infrastruktur (Modulplatten, Tischgeometrie)	F	Allgemein
2	Einsatz eines UR10e-Roboters, welcher mit einem speziell gestalteten Endeffektor für Demontageaufgaben auszustatten ist	F	Allgemein
3	Datenaustausch mit übergeordneter Steuerung	F	Allgemein
5	Einspannung der Cores	F	Allgemein
6	Übergabeposition der Cores ist von AGV zu erreichen	F	Allgemein
11	Dem Zustand angepasste Prozessführung	F	Steuerung
12	Analyse und Inspektion der Cores vor und während der Demontage	F	Sensorik & Aktorik
13	Erkennung des Oberflächenzustands der Schrauben	F	Sensorik & Aktorik
14	Detektion & Klassifikation der Schraubenkopfantriebe	F	Sensorik & Aktorik
15	Lokalisation der Schraubenkopfantriebe	F	Sensorik & Aktorik

### 5.3 Identifikation von Hauptfunktionen

Ausgehend von den herausgestellten Anforderungen lassen sich Hauptfunktionen (*HF*) der Demontagezelle identifizieren. HF bezeichnen im Kontext dieser Arbeit diejenigen Funktionen, welche im besonderen Maß Einfluss auf die Gesamtfunktion haben. Für die automatisierte Demontagezelle sind dies im Einzelnen:

- **HF1: Die Generierung von Drehmoment bei passenden Schraubwerkzeugen:** In dieser Funktion wird das Aufbringen des für das Lösen der Schraube erforderlichen Drehmomentes bei einer bestimmten Spindeldrehzahl verstanden. Diese Funktion befähigt die Demontagezelle zur Ausführung der Demontageoperation. Die erforderliche Anpassungsfähigkeit an verschiedene Schraubenantriebe ist die bestimmende Größe bei der Auslegung dieser Funktion.

- **HF2: Das prozesssichere Einspannen und Lösen der Cores:** Die während der Demontage durch die Aktorik eingebrachten Kräfte und Momente müssen aufgenommen werden, ohne dass der Core seine Position oder Orientierung ungewollt verliert. Dazu ist es erforderlich, den Core in einer entsprechend gestalteten Vorrichtung einzuspannen.
- **HF3: Das Abführen von gelösten Schrauben:** Mit dieser Funktion wird der vierte Teilprozessschritt nach dem *Trennprozessmodell Zerlegen* (Abbildung 2-2) umgesetzt. Nach dem erfolgten Ausdrehen der Schraube muss diese kontrolliert abgeführt werden, um die folgenden Demontagevorgänge in der Demontagezelle störungsfrei zu ermöglichen.
- **HF4: Die situationsbedingte Anpassung des Roboterwerkzeugs und der Anlagensteuerung:** Mit dieser Hauptfunktion wird die geforderte Anpassungsfähigkeit der Steuerung des Roboters umgesetzt. Es ist erforderlich, dass der Roboter die entsprechenden Verfahrbefehle in Abhängigkeit der vorliegenden Demontagesituation erhält und diese umsetzen kann.

## 5.4 Gliederung und Erarbeitung von realisierbaren Modulen

Gemäß der Vorgehensweise nach (VDI 2221 Blatt 1) werden die Hauptfunktionen in diesem Schritt auf realisierbare Module verteilt. Anschließend werden diese grob gestaltet und in ein Gesamtmaschinenkonzept integriert. Die einzelnen Teilsysteme sind in Abbildung 5-2 schematisch zusammengefasst.

Das erste betrachtete Modul wird als **Endeffektormodul** bezeichnet. Dieses soll maßgeblich die erste und die dritte Hauptfunktion umsetzen. Um der Anforderung der Anpassungsfähigkeit gegenüber verschiedenen Schraubenkopfantrieben nachzukommen, soll es die Funktion eines Werkzeugwechsels beinhalten. Das Endeffektormodul wird aus einer Schraubspindel, einem Werkzeugwechselsystem sowie einem Greifsystem bestehen.



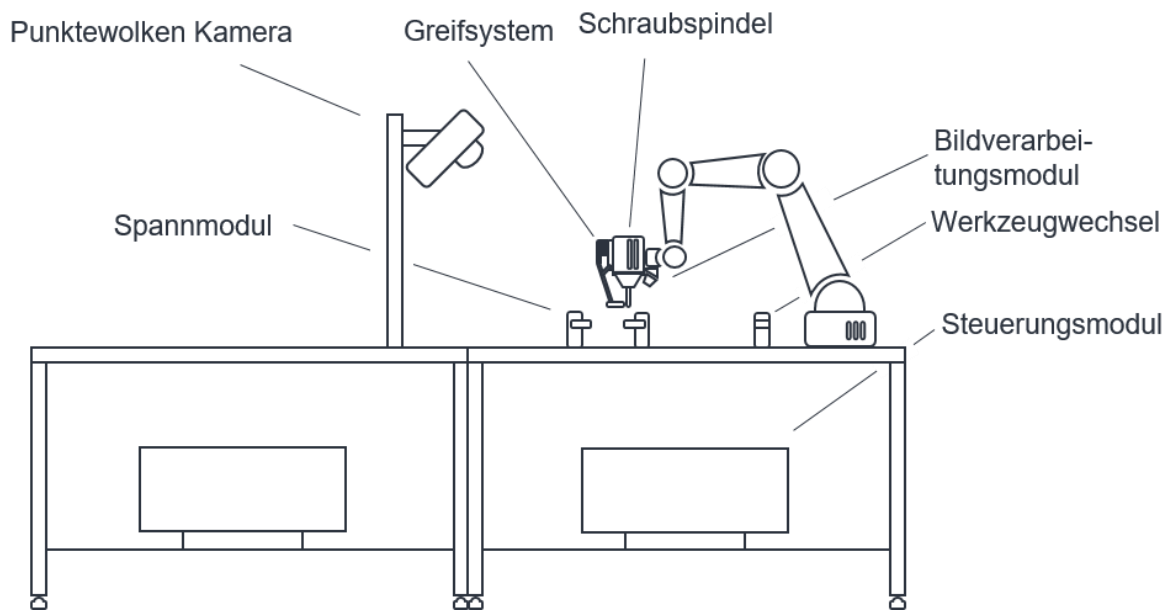


Abbildung 5-2: Systemkonzeption in Teilmodulen

Als zweites Modul wird ein **Spannmodul** für das Fixieren der Cores während der Bearbeitung umgesetzt. Da die Umsetzung keinen besonderen Beitrag zu der Zielstellung dieser Arbeit hat, sei für die Beschreibung der Gestaltung und der Realisierung des Spannmoduls auf ergänzende Literatur verwiesen (Rieß et al., 2022).

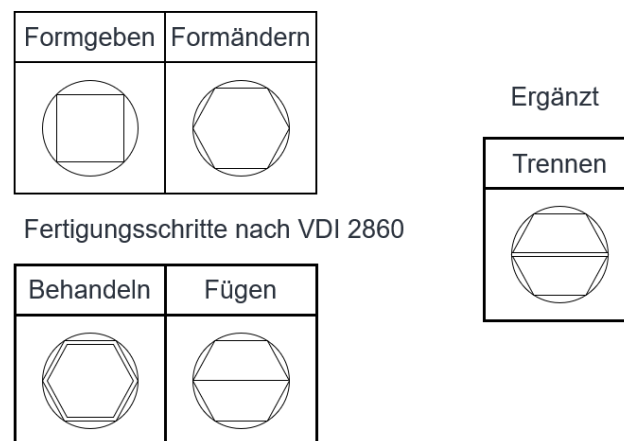
Das dritte Modul ist das **Bildverarbeitungsmodul**, welches durch eine entsprechende Sensorik, geeignete informationstechnische Modelle und korrekte Informationsflüsse charakterisiert ist. Für die Anpassungsfähigkeit der Demontagezelle an die vorliegenden Produkte und Produktzustände wird eine Bildverarbeitung mitsamt einer Bildgenerierung und entsprechender Software-Implementierung zur Auswertung aufgebaut und als Bildverarbeitungsmodul integriert.

Der eingesetzte Roboter wird durch die Umsetzung eines **Steuerungsmoduls** systemtechnisch integriert und gesteuert. Es wird ein Steuerungsmodul für die Ablaufsteuerung der Anlage realisiert. In diesem werden auch die in Kapitel 4 aufgestellten Modelle zur Robustheitssteigerung der Demontagezelle angewendet.

## 5.5 Gestaltung der Module

### 5.5.1 Gestaltung des Endeffektormoduls

Die Hauptfunktion des ersten Moduls ist es, das erforderliche Drehmoment zum Schraubenlösen an einer zum Schraubenkopfantrieb passenden Schrauberklinge zur Verfügung zu stellen. Zur Charakterisierung des Funktionsumfangs von Modul 1 wird auf eine Darstellung nach der VDI-Richtlinie 2860 zurückgegriffen (VDI 2860). Da diese Richtlinie die Montage- und Handhabungstechniken einordnet und voneinander abgrenzt, wird keine eigene Darstellung für die *Demontage* als Fertigungsverfahren gegeben. Die in der Richtlinie beschriebenen Fertigungsschritte entsprechen im Wesentlichen den in DIN 8580 definierten Fertigungsverfahren. Daher wird für die Darstellung in dieser Arbeit die in Abbildung 5-3 dargestellte symbolische Ergänzung nach Härtwig vorgenommen (Härtwig, 2005, S. 99).



*Abbildung 5-3: Symbolische Darstellung von Fertigungsschritten (eigene Darstellung in Anlehnung an (Härtwig, 2005, S. 99))*

In der folgenden Abbildung 5-4 ist ein nach VDI 2860 aufgestellter Funktionsplan für den Funktionsumfang von Modul 1 dargestellt. Zu beachten ist, dass bei der Demontage ein aufspreizender Funktionsplan vorliegt. Im Gegensatz zur Montage steigt die Anzahl der Materialflüsse mit der Anzahl an Fertigungsschritten. Je mehr Montage- und Handhabungsfunktionen angewendet werden, desto mehr Komponenten werden aus der Baugruppe vereinzelt.

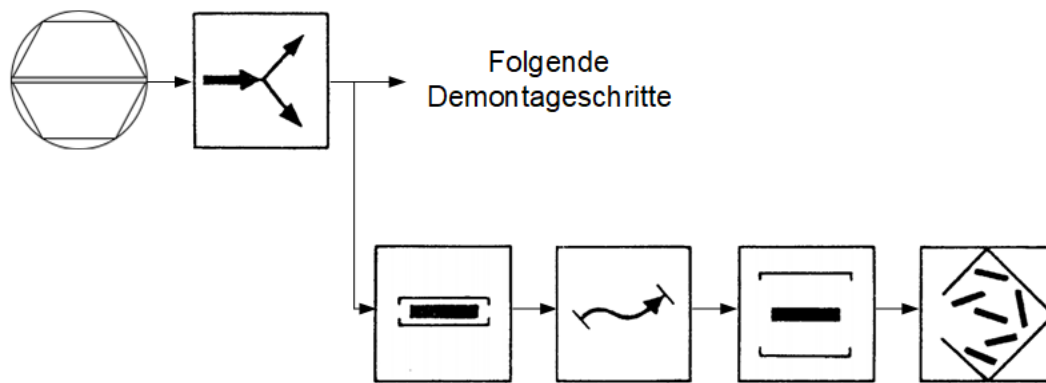


Abbildung 5-4: Funktionsumfang von Modul 1

Zur technischen Realisierung sollen in diesem Modul vor allem zwei wesentliche Komponenten Anwendung finden. Erstens lassen sich mithilfe einer handelsüblichen industriellen Schraubspindel für automatisierte Produktionsanlagen bereits die essenziellen Aufgabenumfänge realisieren und zweitens soll ein Greifsystem für gelöste Schrauben die handhabungstechnischen Funktionen in Modul 1 übernehmen.

### **Teilsystem Schraubspindel**

In diesem Teilsystem wird die Hauptfunktion HF1 *Generierung von Drehmoment und Drehzahl von passenden Schraubwerkzeugen* realisiert. Zur Wandlung der elektrischen in mechanische Leistung soll ein industriell verfügbares Schraubsystem verwendet werden. Um dieses den verschiedenen Schraubenkopfantrieben anzupassen, muss es mit einem Wechselsystem für Klingen ausgestattet sein. Die Analyse der im Use-Case auftretenden Verbindungselemente hat folgende Werkzeuge ergeben: Innensechsrund (Torx) T20, Innensechsrund (Torx) T25 sowie Außensechskant SW7. Zur Umsetzung insbesondere der Anforderungen, die sich aus den Prozessmodellen für die automatisierte Schraubendemontage nach Kapitel 4 ergeben, muss das Schraubsystem zusätzlich mit Sensoriken ausgestattet sein, die das Drehmoment und den Drehwinkel in Abhängigkeit der Zeit ermitteln können.

In Kapitel 2.3 wurde bereits die besondere Herausforderung der Formschlusserstellung zwischen Schraubenkopfantrieb und Schrauber Klinge herausgestellt. Im Kontext der vorliegenden Arbeit soll das Problem mittels eines aktiven Verfahrens gelöst werden. Bei aktiven Ansätzen wird nach dem aktuellen Stand von Forschung und Technik eine definierte Trajektorie durch die Steuerung der Roboterkinematik abgefahren, welche

von den geometrischen Merkmalen des Schraubenkopfantriebes abhängt. Als etabliertes Beispiel für ein aktives Verfahren sei die Spiralsuche genannt (R. Li et al., 2020). Bei passiven Ansätzen werden Ausgleichselemente in die Endeffektoren integriert. Diese besitzen eine charakteristische elastische Nachgiebigkeit, mit deren Hilfe Positions- und Orientierungstoleranzen der Kinematik ausgeglichen werden. Als einschlägiges Beispiel lässt sich der in der Arbeit von Nave entstandene Endeffektor anführen (Nave, 2003, S. 86). Bei beiden Verfahrenstypen wird das Werkzeug in Schraubenanzugsrichtung mit geringer Drehzahl so lange gedreht, bis eine formschlüssige Verbindung zwischen Schraubenkopfantrieb und Schrauber Klinge hergestellt ist. In der vorliegenden Arbeit soll die Formschlusserstellung zwischen Schraubenkopfantrieb und Schrauber Klinge darüber hinaus als ein zweistufiges Verfahren ausgeführt werden. Dies bedeutet, dass die Roboterkinematik die grobe Position der Schraube noch vor der Suchstrategie bildverarbeitungsgestützt (engl. *Visual Servoing*) anfahren soll. Beim *Visual Servoing* wird eine am Roboterwerkzeug montierte Tiefenbildkamera angewendet (engl. *Eye-in-Hand*), welche Bilddaten für die erste Prozessphase, das *Anfahren der Schraubverbindung*, aufnimmt. Für die Positionierung des TCPs wird dann der Abstand der kalibrierten TCP-Pose zu den ermittelten Positionsdaten der Schraube durch einen Regelalgorithmus minimiert. In der angeleiteten Arbeit von Felk werden verschiedene Suchstrategien umgesetzt und in praktischen Versuchen vor dem Hintergrund des betrachteten Anwendungsfalles miteinander verglichen (A\_Felk, 2022). Ein darüber hinaus untersuchter Ansatz, das Problem mittels bestärkendem Lernen (engl. *Reinforcement Learning, RL*) in Simulation zu lösen, hat sich als nicht zielführend herausgestellt. Durch den erheblichen Unterschied zwischen Realität und Simulation war der Übertrag in die praktische Anwendung erfolglos (A\_Knierim, 2023).

Abbildung 5-5 zeigt eine Skizze, welche das Kräfteverhältnis am TCP während der Formschlusserstellung veranschaulicht. Im rechten Teil der Abbildung ist der Zustand unmittelbar vor einer erfolgreichen Formschlusserstellung skizziert. Die anliegende Normalkraft  $F_N$  ergibt sich durch die Regelung der Roboterkinematik. Der Bewegungsvektor  $v$  repräsentiert den vorgegebene Richtungsvektor der Roboterkinematik. Die Lateralkraft  $F_H$  ist die resultierende Gegenkraft und ergibt sich aus der Roboterbewegung und der Bewegung der Kupplung, welche durch die Einführschrägen des Werkzeugs und die Fasen des Schraubenkopfes ausgelöst wird. Aus der Schnittansicht ist nicht ersichtlich, dass das Werkzeug zu diesem Zeitpunkt in Anzugsrichtung rotiert. Durch diese Rotation spielt die Orientierung der Schraubenköpfe eine untergeordnete Rolle.

Im linken Teil der Abbildung ist dargestellt, wie die Schrauberklinge neben einem Schraubenkopf auf der Oberfläche der umliegenden Komponenten aufliegt. Bei einer ausschließlich über die Normalkraft  $F_N$  geregelten Suchstrategie kann die Weiterführung der Trajektorie in Richtung des Bewegungsvektors  $v$  dazu führen, dass sehr hohe Lateralkräfte  $F_H$  entstehen, die das Schraubwerkzeug beschädigen könnten. Durch das Verwenden einer lateralkraftgeregelten Suchstrategie lässt sich neben der Schutzfunktion für das Werkzeug auch die Robustheit der Formschlusserstellung in dem vorliegenden Anwendungsfall steigern.

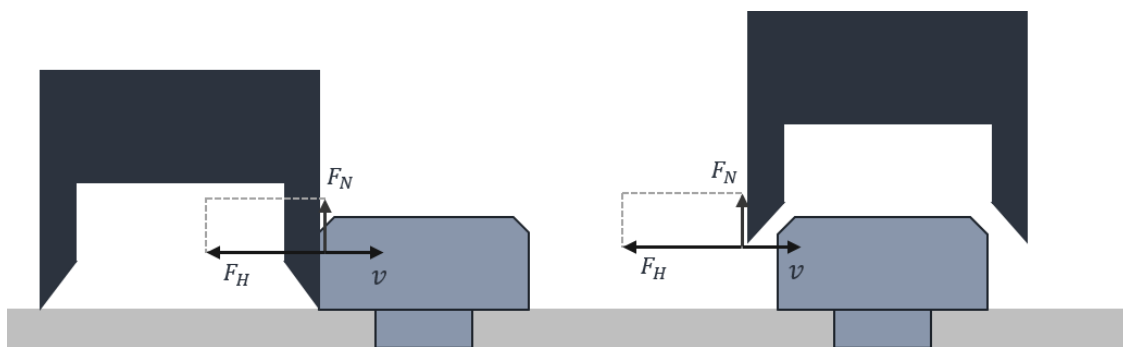
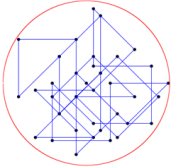
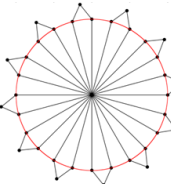
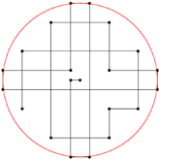
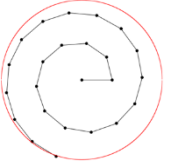
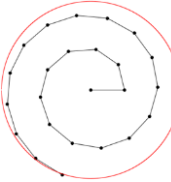
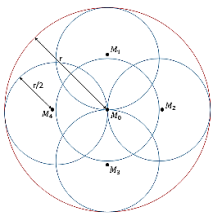
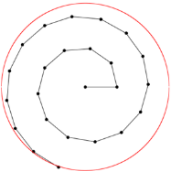


Abbildung 5-5: Kräfteverhältnis am TCP bei Bewegung entlang des Schraubenkopfes, nach (A\_Felk, 2022)

In Tabelle 5-2 sind die verglichenen Suchstrategien mitsamt der wesentlichen Charakteristika und den ermittelten Kenndaten enthalten. Zur Ermittlung der Suchzeit wurde die Zeitdifferenz zwischen dem Start der Ausführung, genauer dem Ende der Grobpositionierung, und der erfolgreichen Formschlusserstellung gemessen. Es wurden jeweils 10 Messungen pro Schraubenkopfantrieb durchgeführt. In Tabelle 5-2 sind die Suchzeiten als Durchschnittswerte zusammengefasst. Der Vergleich der sieben untersuchten Suchstrategien zeigt, dass die *Spiralsuche mit lateraler Kraft* die besten Ergebnisse für den betrachteten Anwendungsfall liefert. Bei dieser handelt es sich um eine Weiterentwicklung der Spiralsuche, die durch das Hinzufügen eines zum Zentrum der Spirale zeigenden Kraftvektors charakterisiert ist.

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung verschiedener Suchstrategien

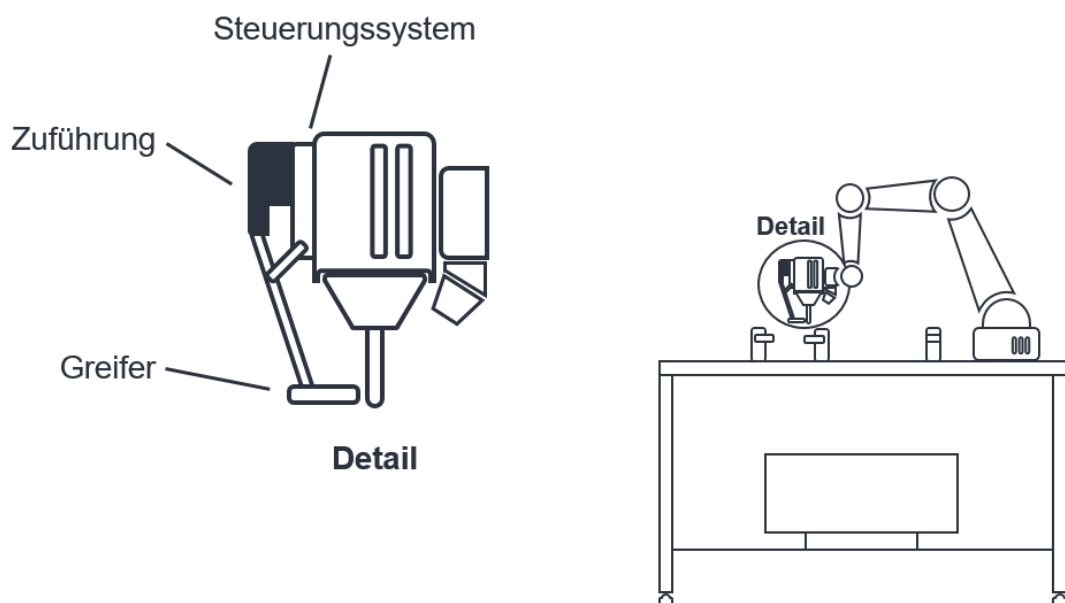
Innensechsrund Nennmaß 20 (T20); Innensechsrund Nennmaß 25 (T25); Außensechskant Nennmaß 7 (SK 7)

Suchstrategie	Skizze	Charakteristik	Durchschn. ermittelte Suchzeit	Ermittelte Erfolgschance
<b>Sukzessive Approximation ohne Anheben</b> (Nave, 2003, S. 74)		Zufällig gestapelte Werte im Suchradius	T20: 26,58 s T25: 115,81 s SK7: 69,55 s	T20: 20 % T25: 40 % SK7: 30 %
<b>Linearschwingung um den Mittelpunkt</b> (Nave, 2003, S. 74)		Lineare Schwingung um den Mittelpunkt	T20: 25,97 s T25: 142,65 s SK7: 41,75 s	T20: 10 % T25: 20 % SK7: 20 %
<b>Lissajous Figur</b> (Nave, 2003, S. 74)		Zweiachsige Linearschwingung um den Mittelpunkt	T20: 21,09 s T25: 100,93 s SK7: 29,50 s	T20: 0 % T25: 30 % SK7: 10 %
<b>Spiralsuche</b> (Nave, 2003, S. 74)		Archimedische Spirale im Suchradius	T20: 114,86 s T25: 147,82 s SK7: 38,51 s	T20: 40 % T25: 90 % SK7: 40 %
<b>Spiralsuche mit Normalkraft</b> (Gerbers et al., 2016; R. Li et al., 2020)		Archimedische Spirale mit Normalkraftregelung	Nicht Betrachtet, (Linsenkopf der Schrauben)	-
<b>Quadranten-Spiralsuche</b> (W. H. Chen et al., 2020)		Archimedische Spirale mit halbem Suchfeldradius im Zentrum. Dann auf halbem Radius oben, links, unten und rechts der erneut.	T20: 170,93 s T25: 147,37 s SK7: 71,96 s	T20: 80 % T25: 90 % SK7: 40 %
<b>Spiralsuche mit lateraler Kraft</b> (A_Felk, 2022)		Archimedische Spirale in der Ebene und lateralkraftabhängige Tiefenanpassung	T20: 21,87 s T25: 19,68 s SK7: 20,4 s	T20: 90 % T25: 80 % SK7: 90 %

### **Teilsystem Greifer für gelöste Schrauben**

Das *Greifsystem* setzt die dritte Hauptfunktion *Abführen von gelösten Schrauben* um. Zusätzlich sollen die Schrauben während des Ausschraubens aus den letzten Gewindengängen mechanisch geführt werden. Um die Störkontur des Aufbaus zu minimieren, soll das Teilsystem die Möglichkeit besitzen, bei Nichtgebrauch aktuiert in eine War-teposition bewegt zu werden. Neben der somit benötigten Zuführung sind ein Steuerungssystem und ein Greifer erforderlich. Die einzelnen Module des Systems sind in Abbildung 5-6 zu sehen. Sie übernehmen die folgenden Aufgaben:

- Zuführung – Positionierung des Greifers an den Wirkpunkt des Endeffektors und Entfernung zur Vermeidung von Störgeometrien
- Steuerungssystem – Steuerung der mit dem Greifsystem verbundenen Funktionen
- Greifer – Wandlung der Primärenergie in mechanische Bewegung des Greifens



*Abbildung 5-6: Konzept des Greifers*

Aus dem Vergleich verschiedener Konzepte, die aus eigenen Vorversuchen und angeleiteten Arbeiten (A\_Wiltz, 2020; A\_Wai, 2023; A\_Menke, 2022; A\_Berlin, 2021; A\_Gietzen, 2021) stammen, wird das am besten geeignete Konzept ausgewählt und konstruktionstechnisch in Kapitel 6.2.1 umgesetzt. In Abbildung 5-7 ist ein morphologischer Kasten nach Zwicky dargestellt, welcher die für diesen Zweck entstandenen und



untersuchten Lösungskonzepte enthält (Zwicky, 1966). Ein ergänzender morphologischer Kasten im Anhang (vgl. Abbildung 0-5) stellt darüber hinaus bestehende Lösungen entsprechend dem Stand von Forschung und Technik den gefundenen Lösungen gegenüber. Um die Anpassungsfähigkeit des Greifsystems an die verschiedenen Schraubenkopfantriebe im Anwendungsfall zu ermöglichen, kann bei dem Wirkprinzip des Greifers nicht zwingend auf materialspezifische Eigenschaften zurückgegriffen werden. Magnetgreifer scheiden somit ebenso aus wie Sauggreifer. Es soll ein mechanisches Wirksystem verwendet werden, welches die geometrischen Ausprägungen der Schraubenköpfe für ein kraftschlüssiges Greifen nutzt.

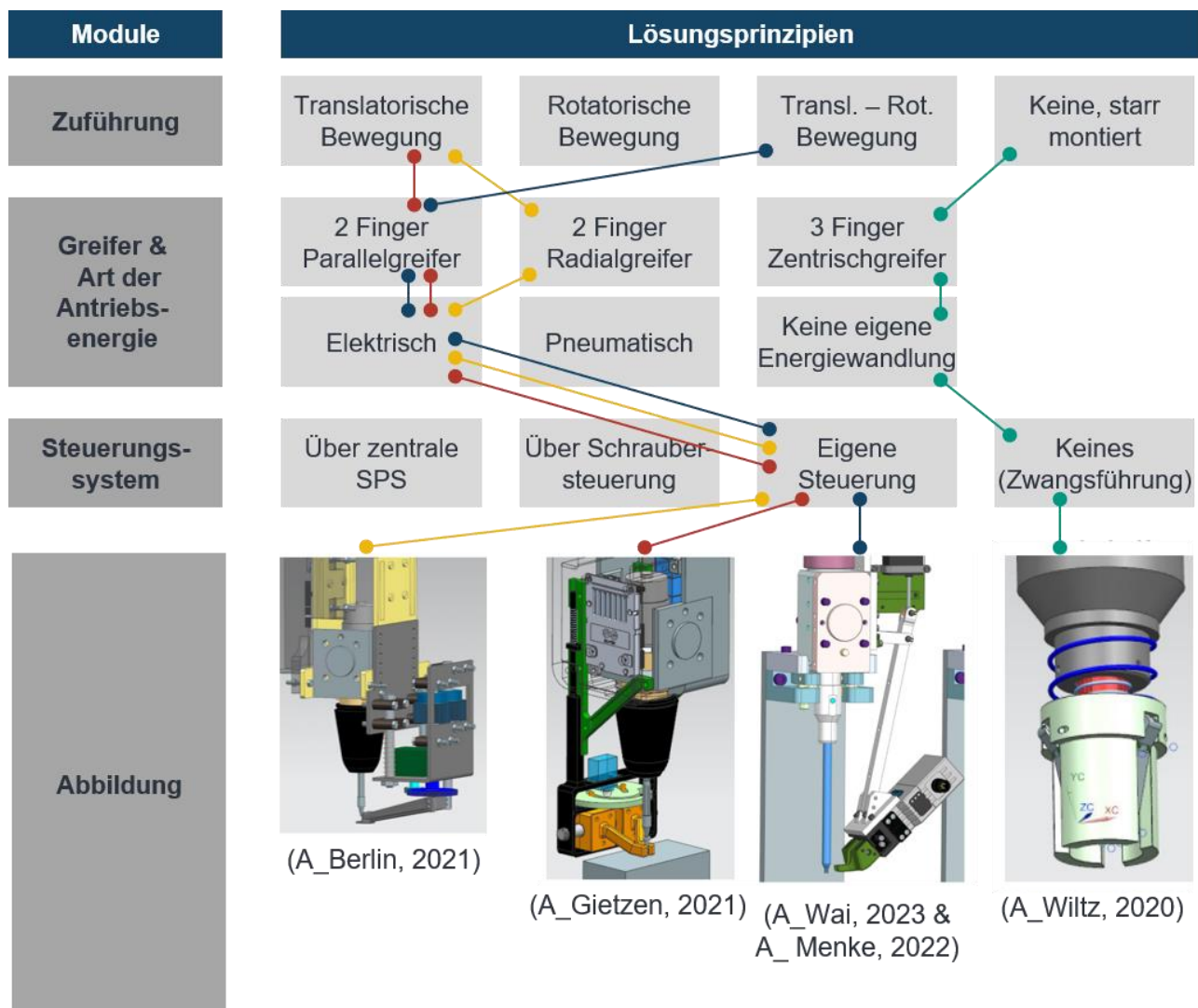


Abbildung 5-7: Lösungsalternativen für das Greifsystem



### 5.5.2 Gestaltung des Bildverarbeitungsmoduls

Das Bildverarbeitungsmodul soll mehrere Eigenschaften der Schraubenkopfantriebe in der Bilddomäne erfassen. Um das Ziel dieser Arbeit, die Integration von Domänenwissen in Form von modellierten Prozessgrößen in die automatisierte Demontage, zu erreichen, wurden in Kapitel 4 die zwei wesentlichen Aufgaben des Bildverarbeitungsmoduls herausgestellt: die **Lokalisation und Klassifikation von Schraubenkopfantrieben** und die **Ermittlung des relativen Korrosionsgrades** auf dem Schraubenkopf. Diese beiden Aufgaben ergeben sich aus den abgeleiteten Prozessmodellen für die automatisierte Demontage. Darüber hinaus sollte das Bildverarbeitungsmodul im Sinne der OEE eine geringe Laufzeit bei der Bildauswertung benötigen. Auf Grundlage der Ausgabe des Bildverarbeitungsmoduls soll das Roboterwerkzeug passend konfiguriert werden. Weiterhin soll überprüft werden, ob die von der übergeordneten Leitsteuerung geteilten Produktinformationen mit der vorliegenden Demontageaufgabe übereinstimmen.

Die folgende Abbildung 5-8 charakterisiert den Funktionsumfang anhand eines Funktionsplanes nach der VDI-Richtlinie 2860. Dem Bildverarbeitungsmodul werden die Funktionen *Messen von Orientierung* und *Position der Schraubenkopfantriebe* sowie *Identitätsprüfung* zugeordnet.

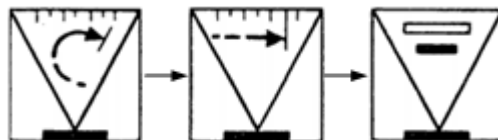


Abbildung 5-8: Funktionsumfang von Modul 2

In Kapitel 5.1 wurden bereits generelle Annahmen beschrieben, die sich durch die Integration der Demontagezelle in die Gesamtanlage ergeben. Zusätzlich ermöglicht diese Integration spezielle Annahmen für das Bildverarbeitungssystem. Die zur Ableitung von Lage und Orientierung der Demontageobjekte im Raum genutzten Punktwolken werden in einem vorhergehenden Schritt ausgewertet und entsprechend der Teilkomponenten segmentiert. Dadurch liegen bereits vage Positionen und Orientierungen der Schraubenköpfe vor. Diese sind allerdings mit Abweichungen in der Größenordnung von einigen Millimetern bzw. Graden behaftet und somit zu ungenau für die automatisierte Demontage. Die Positionen und Orientierungen im Raum sollen durch das

Bildverarbeitungsmodul bis zu einem für die Automatisierung erforderlichen Genauigkeitsgrad nachgeschärft werden. Dazu wird ein *Visual Servoing* Ansatz verfolgt. Dieses Verfahren wird im ersten Schritt auf horizontaler Ebene über dem Schraubenkopf durchgeführt und nach erfolgter Positionierung werden die Daten des Tiefenbildes verwendet, um den Abstand in vertikaler Ebene zu minimieren. Durch die mechanische Einspannung der Cores für die Demontageoperationen kann angenommen werden, dass das Bildverarbeitungsmodul ohne umfassende Planung der Aufnahmewinkel (engl. *View Planning*) auskommt.

Im Rahmen von Vorversuchen wurde die Auflösung des RGBD-Sensors bestimmt (A\_Gu, 2023). Der zu detektierende Bildausschnitt wird durch den Core definiert und ist etwa  $15 \times 15$  cm groß. Um den Demontageprozess effizient zu ermöglichen, sollte sich die Kamera während der Demontage in einem Abstand von etwa 20 cm zum Core befinden. Unter diesen Randbedingungen hat sich eine Auflösung von mindestens  $1280 \times 720$  Pixeln als ausreichend herausgestellt. Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass die Bildverarbeitung im Sinne einer angemessenen Laufzeit auf einem dedizierten Prozessor laufen sollte und die Ergebnisse der Auswertung über das Netzwerk geteilt werden sollten.

Die in Kapitel 4.2.1 entwickelte Formulierung des Losdrehmomentes beim Entschrauben durch Bildverarbeitung stellt an das zu gestaltende Bildverarbeitungssystem die Anforderung, den relativen Korrosionsgrad zu ermitteln. Zur Bestimmung dieses Korrosionsgrades wird eine semantische Segmentierung durchgeführt. Um die weiteren benötigten Informationen für die Prozessmodelle für die Schraubendemontage (siehe Kapitel 4) zu gewinnen, muss darüber hinaus eine Klassifikation der Schraubenköpfe erfolgen, im Anwendungsfall in die Klassen *Schlitz*, *Sechskant mit Flansch*, *Sechskant*, *Phillips*, *Pozidriv*, *Innen-Sechsrund (Torx)*. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz basiert auf zwei sequentiell angewendete Bildverarbeitungsalgorithmen, einen Algorithmus zur Lokalisation und Klassifikation von Schraubenkopfantrieben und einen Algorithmus zur Erkennung des Korrosionsgrades. Folgende Abbildung 5-9 fasst den in dieser Arbeit verfolgten Ablauf der Bildverarbeitung zusammen:

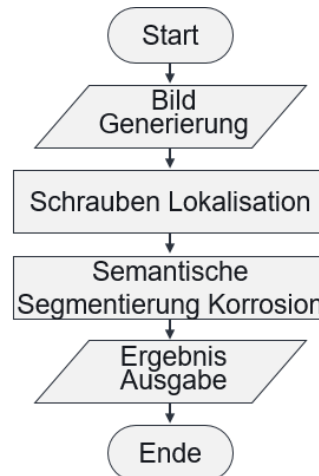


Abbildung 5-9: Ablauf der Bildverarbeitung

Im Rahmen von experimentellen Vorversuchen wurden für den Algorithmus zur Lokalisation und Klassifikation von Schraubenkopfantrieben verschiedene Ansätze gegenübergestellt. Um auf den in Kapitel 2.5 aufgezeigten vielversprechenden Ergebnissen der YOLO-Architektur im aktuellen Stand von Forschung und Technik aufzubauen, wurde insbesondere diese Architektur weiter untersucht. In den experimentellen Vorversuchen ließen sich richtungsweisende Erkenntnisse mit einem YOLOv5-Modell erzielen. Der verwendete Datensatz bestand aus 550 Graustufenbildern. Die erreichte Präzision des trainierten Modells ( $mAP@0,5 = 0,984$  und  $mAP@0,5:0,95 = 0,834$ ) hat sich als ausreichend genau für die automatisierte Demontage erwiesen. Eine umfassende Darstellung der Untersuchung sowie der Ergebnisse findet sich in den zugehörigen Publikationen (A\_Steiner, 2021; Mangold et al., 2022).

Um die Ergebnisse weiterzuführen und die Anforderungen aus den Prozessmodellen zu erfüllen, wurde die Arbeit in den Abschlussarbeiten (A\_H. Wang, 2023; A\_Gu, 2023) fortgeführt. Im Gegensatz zu den ersten Vorversuchen wurden in diesen Arbeiten RGB-Bilder verwendet. Die vielversprechenden Ergebnisse der YOLO-Architektur finden erneut Anwendung, werden aber auch in direkten Vergleich mit einem Einbild Multibox Detektor (engl. *Single Shot Multibox Detector*, SSD) gebracht. Um die Erkennung von kleinen Objekten zu verbessern, wird die ursprüngliche YOLOv5-Architektur um eine Schicht zur Erkennung kleiner Objekte erweitert. Dies führt im Speziellen zu folgenden Änderungen an der Architektur:

- Hinzufügen von Anchor Boxes: Ein zusätzlicher Satz kleinerer Anchor Boxes wird im Vergleich zur ursprünglichen Konfiguration eingeführt. Durch diese Änderung wird die Genauigkeit des Modells bei der Erkennung kleiner Objekte erhöht.
- Backbone: Die CSP-Darknet53-Struktur, welche im YOLOv5-Netzwerk verwendet wird, wird angepasst (C.-Y. Wang et al., 2019). Anstelle eines Convolutional Moduls beginnt der angepasste Backbone mit einem Focus Modul. Dieses kombiniert Informationen aus mehreren Pixeln und erhöht so die Komplexität der Merkmale. Es soll beim Erfassen von komplexen Mustern unterstützen, die für die Erkennung kleiner Objekte entscheidend sind.
- Head Structure: Im Vergleich zum Original hat die Head Structure der angepassten Konfiguration zusätzliche Schichten und eine andere Verkettungsstrategie. Diese Veränderungen lassen das Modell komplexere Merkmale erkennen und nutzen sie effektiver.
- Detection Layer: In der angepassten Konfiguration verwendet das Detection Layer Merkmale aus zusätzlichen Schichten im Vergleich zum Original. Diese Schichten können detailliertere Informationen für die Vorhersagen liefern und die Fähigkeit des Modells zur Erkennung kleiner Objekte verbessern.

Um die Performanz des Detektionsalgorithmus weiter zu verbessern, werden darüber hinaus verschiedene Optimierungsalgorithmen für das Training miteinander verglichen. Im Fokus stehen dabei:

- Stochastic Gradient Descent (SGD)
- Adaptive Moment Estimation (Adam)

Für den Datensatz zur Schrauben-Lokalisation werden Bilder der gesamten Szene manuell annotiert. Die so entstandenen 680 Bilder werden einer künstlichen Datenerweiterung unterzogen. Zunächst wird das jeweilige Bild der gesamten Szene auf die standardisierte Eingangsgröße von  $640 \times 640$  Pixel herunterskaliert. Bei dieser Bildgröße haben die Features typischerweise Größen von  $25 \times 25$  Pixeln. Anschließend werden zufällig ausgewählte Bilder gespiegelt und gedreht. Der Farbton wird um  $-20\%$  bis  $20\%$  verändert, die Sättigung um  $-20\%$  bis  $20\%$  und die Helligkeit um  $-15\%$  bis  $15\%$  angepasst. Der Begriff *Farbton* bezieht sich dabei auf die zufällige Anpassung der Farben in einem Bild. Der gesamte Datensatz besteht letztendlich aus 4.137 Bildern, welche in einem Verhältnis von 7:1,5:1,5 in einen Trainings-, Validierungs- und Testdatensatz unterteilt werden. Ein Auszug aus dem Datensatz ist in Tabelle 0-3 im Anhang

gegeben. Die angepasste YOLO-Netzwerkarchitektur wird mit den verschiedenen Optimierungsalgorithmen trainiert. Die Performanz der besten Netzwerkarchitektur (YOLOv5 mit SGD-Optimierungsalgorithmus) findet sich in der folgenden Tabelle 5-3. Die Performanz der weiteren miteinander verglichenen Netzwerkarchitekturen wird in Tabelle 0-5 im Anhang zusammengefasst.

*Tabelle 5-3: Kenndaten der YOLOv5s-Architektur mit SGD-Optimierungsalgorithmus*

<b>YOLOv5s mit SGD-Optimierungsalgorithmus</b>				
<b>Klasse</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>mAP@0.5</b>	<b>mAP@0.5:0.95</b>
Schlitz	1	0,968	0,986	0,665
Sechskant mit Flansch	0,991	0,889	0,966	0,727
Sechskant	0,995	0,923	0,985	0,746
Phillips	0,965	0,887	0,971	0,726
Pozidriv	0,982	0,908	0,970	0,734
Innen-Sechsrund (Torx)	0,993	0,952	0,992	0,766
<b>Gesamt</b>	<b>0,988</b>	<b>0,921</b>	<b>0,978</b>	<b>0,727</b>

Der zweite Teil des Bildverarbeitungsmoduls zur Bestimmung des relativen Korrosionsgrads des Schraubenkopfes wurde im Rahmen einer, vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten, studentischen Abschlussarbeit erarbeitet (A\_H. Wang, 2023). Eine erste Beschreibung des Algorithmus erfolgte bereits im vierten Kapitel im Abschnitt *Fazit zur experimentellen Untersuchung 2*. Der Bildverarbeitungsalgorithmus bestimmt zuerst die Größe des Schraubenkopfes im Bildbereich. Um den relativen Korrosionsgrad zu bestimmen, wird im Anschluss die Anzahl der korrodierten Pixel ermittelt und für die Ausgabe in Relation zur Größe der Schraubenköpfe gesetzt. Es handelt sich bei dieser Aufgabe somit um eine semantische Segmentierungsaufgabe. Zum Training der Modelle werden manuell annotierte Ground-Truth-Daten erstellt. Dazu werden die Ausgabebilder des YOLO-Netzwerks erneut annotiert. Innerhalb der Bilder werden die Pixel, die dem Schraubenkopf zugeordnet werden können, sowie die korrodierten Bereiche, gemäß den in Kapitel 4 beschriebenen visuellen Kriterien, markiert. Es werden 863 Bilder mit durchschnittlich  $150 \times 150$  Pixeln pro Bild annotiert. Um den Datensatz an die Laufzeitumgebung anzupassen und den Datensatz zu erweitern, wird eine künstliche Datenerweiterung durchgeführt. Die Bilder werden auf  $256 \times 256$  Pixel skaliert und weichgezeichnet, genauer mit einem *Gaussian Blur* von 30 % beaufschlagt. Die Bilder

werden mit einem statistischen Rauschen von maximal 2 % der Pixel versehen. Die so geänderten Bilder werden dem Datensatz hinzugefügt, sodass insgesamt ein Datensatz von etwa 2.600 Bildern zur Verfügung steht. Der Datensatz wird in einem Verhältnis von 8 : 1 : 1 in einen Trainings-, Validierungs- und Testdatensatz unterteilt.

Die folgende Abbildung 5-10 zeigt den Gesamtablauf der Bildverarbeitung anschaulich anhand eines Beispiels. In Tabelle 5-4 wird die Performanz der trainierten Modelle miteinander verglichen.

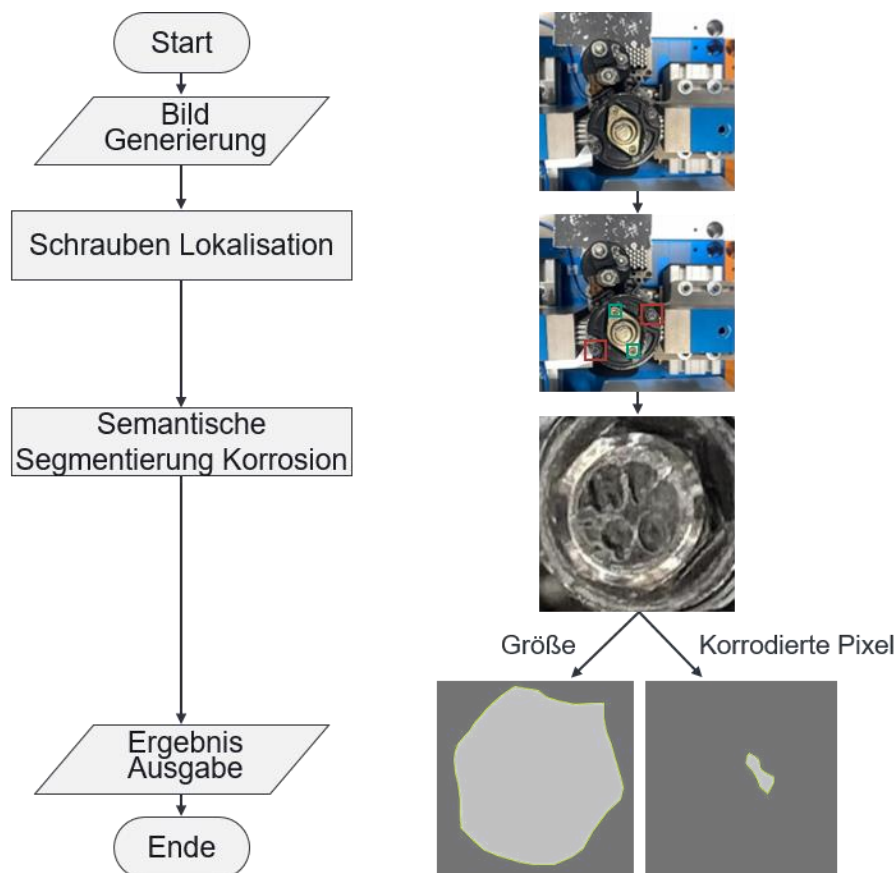


Abbildung 5-10: Ablauf der Bildverarbeitung mit Beispielen

Die in Tabelle 5-4 dargestellten Kennwerte (mIoU, mPA, Accuracy, Laufzeit) wurden im Rahmen einer, vom Verfasser dieser Arbeit angeleiteten, studentischen Abschlussarbeit ermittelt (A\_H. Wang, 2023). Die Werte stellen Mittelwerte über eine Validierungsmenge von 300 Bildern dar. Durch die Mittelwertbildung soll der Einfluss potenzieller Einzelabweichungen reduziert werden. Die Darstellung konzentriert sich dabei bewusst auf die Ergebnisse der Modellbewertung, da im Kontext der vorliegenden Arbeit vor

allen die Auswahl und Beurteilung der leistungsfähigsten Architektur im Vordergrund steht. Dennoch erlaubt die einheitliche Bewertungsmethodik einen vergleichenden Überblick über die Leistungsfähigkeit der getesteten Architekturvarianten.

*Tabelle 5-4: Kenndaten der verglichenen Architekturen*

<b>Architektur</b>	<b>Aufgabe</b>	<b>mIoU</b>	<b>mPA</b>	<b>Accuracy</b>	<b>Laufzeit</b>
U-Net (VGG16)	Größe	93,11	97,10	97,14	1,751 s
U-Net (Resnet50)	Größe	91,21	93,23	94,26	0,657 s
PSPnet (Resnet50)	Größe	91,10	94,81	95,70	0,801 s
PSPnet (MobileNet)	Größe	91,24	93,24	93,38	0,193 s
Deeplabv3+ (Xception)	Größe	91,32	94,11	94,32	0,997 s
Deeplabv3+ (MobileNet)	Größe	91,27	93,63	93,92	0,274 s
U-Net (VGG16)	Korr. Pixel	93,41	93,28	94,40	1,751 s
U-Net (Resnet50)	Korr. Pixel	94,35	96,78	96,83	0,657 s
PSPnet (Resnet50)	Korr. Pixel	92,51	96,83	97,22	0,801 s
PSPnet (MobileNet)	Korr. Pixel	93,21	96,08	97,29	0,193 s
Deeplabv3+ (Xception)	Korr. Pixel	95,12	97,01	98,14	0,997 s
Deeplabv3+ (MobileNet)	Korr. Pixel	93,33	97,25	97,89	0,274 s

Insgesamt wird PSPNet mit MobileNet als Backbone als finales Modell umgesetzt, vorrangig bestimmt durch die geringe Laufzeit bei annähernd gleicher Performanz. Die technische Implementierung und die verwendete Hardware wird in der Realisierungsphase der vorliegenden Arbeit (Kapitel 6) beschrieben.

### 5.5.3 Gestaltung des Steuerungsmoduls zur systemtechnischen Integration

Aus den Anforderungen an das Demontagesystem (Tabelle 0-4 im Anhang) lässt sich ableiten, dass das Steuerungsmodul zur systemtechnischen Integration im Wesentlichen die Schnittstellenaufgaben zwischen den einzelnen Softwareelementen übernimmt und als eine Applikation im Sinne der Softwaretechnologie gestaltet wird. In dieser Anwendung sollen die Softwareelemente der Demontagezelle verbunden werden und es soll eine Benutzerschnittstelle bereitgestellt werden. In Tabelle 5-5 sind diese Softwaremodule der Demontagezelle zusammengefasst und die jeweiligen Funktionen werden kurz charakterisiert. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird der Entwurf des

Steuerungsmoduls im Sinne des Wasserfall-Modells (Foster, 2022, S. 9–11) beschrieben.

*Tabelle 5-5: Wesentliche Softwaremodule*

<b>Softwaremodul</b>	<b>Funktionsumfang / Beschreibung</b>
Spindel-Steuerung	Die vom Hersteller der industriellen Schraubspindel mitgelieferte Steuerung wird durch dieses Softwaremodul mit einer Kommunikationsschnittstelle ausgestattet, um Informationen mit der Steuerung der Demontagezelle auszutauschen.
Greifer-Steuerung	Die Steuerung des Greifers und Aktuators des Endeffektormoduls nach Kapitel 5.5.1
Roboter-Steuerung	Die Steuerung des eingesetzten UR10e-Roboters der Firma Universal Robots wird durch dieses Softwaremodul zum Datenaustausch mit der Steuerung der Demontagezelle befähigt. Darüber hinaus übernimmt dieses Softwaremodul die Aufgabe der Pfadplanung und die in Kapitel 5.5.1 herausgestellte Suchstrategie wird umgesetzt.
Bild-Generierung	Interaktion mit dem am Endeffektor verbauten RGB-D-Bildsensor
Prozessmodelle	Die Laufzeitanwendung für die in Kapitel 4 hergeleiteten Prozessmodelle, wie im Speziellen in Kapitel 4.3 beschrieben
Bildverarbeitung	Das Softwaremodul, welches das in Kapitel 5.5.2 charakterisierte Bildverarbeitungsmodul softwaretechnisch umsetzt
Steuerungsmodul zur systemtechnischen Integration	Software Applikation, welche die einzelnen Softwaremodule orchestriert. Durch die Verwendung einer geeigneten Middleware wird eine Schnittstelle zur übergeordneten Steuerung der Demontagelinie bereitgestellt.
Punktwolken-Segmentierung	Die mit einer stationären Kamera aufgenommenen Punktwolken der Szenerie werden segmentiert und somit wird die Position und Orientierung der Cores abgeleitet.
Demontageplanung	Softwaremodul, welches die Demontagesequenz und Demontageaufgabe von der übergeordneten Steuerung der Gesamtanlage abfragt und auf den vorliegenden Core anwendet.
Beschreibungsformat	In einer Datenbank werden bereits vor den Demontageprozessen verfügbare Informationen in dem Beschreibungsformat nach Kapitel 4.3 gespeichert.



Das Steuerungsmodul zur systemtechnischen Integration soll dem Sense-Plan-Act-Paradigma folgen und damit Sensordaten sequentiell verarbeiten. Somit ist die Anwendung von intelligenten Algorithmen und Ansätzen in den verschiedenen Ebenen der Steuerung möglich. Die nachfolgende Abbildung 5-11 zeigt das Zusammenspiel der vorgestellten Systemkomponenten.

Die Übermittlung der Demontagesequenz und der Demontageaufgabe von der übergeordneten Steuerung der Gesamtanlage erfolgt über das in Kapitel 4.3 beschriebene Beschreibungsformat an das Steuerungsmodul. In diesem Beschreibungsformat werden neben den Material- und Gestaltinformationen der Fügepartner auch die Ergebnisse der Punktwolken-Segmentierung abgelegt. Es stellt damit die Systemgrenze dar. Für die in Kapitel 4 entwickelten Prozessmodelle für die Schraubendemontage sind weitere Informationen erforderlich, welche nicht von der Gesamtanlage oder durch die Punktwolken-Segmentierung übermittelt werden. Diese werden durch die Bildverarbeitung erhoben und in dem Beschreibungsformat aktualisiert. Über eine ROS basierte Kommunikation in der Netzwerkebene soll das Steuerungsmodul die einzelnen Komponenten ansteuern. Auf Geräte Ebene erhobene Informationen werden ebenfalls zurück in das Beschreibungsformat geschrieben und dieses wieder aktualisiert.

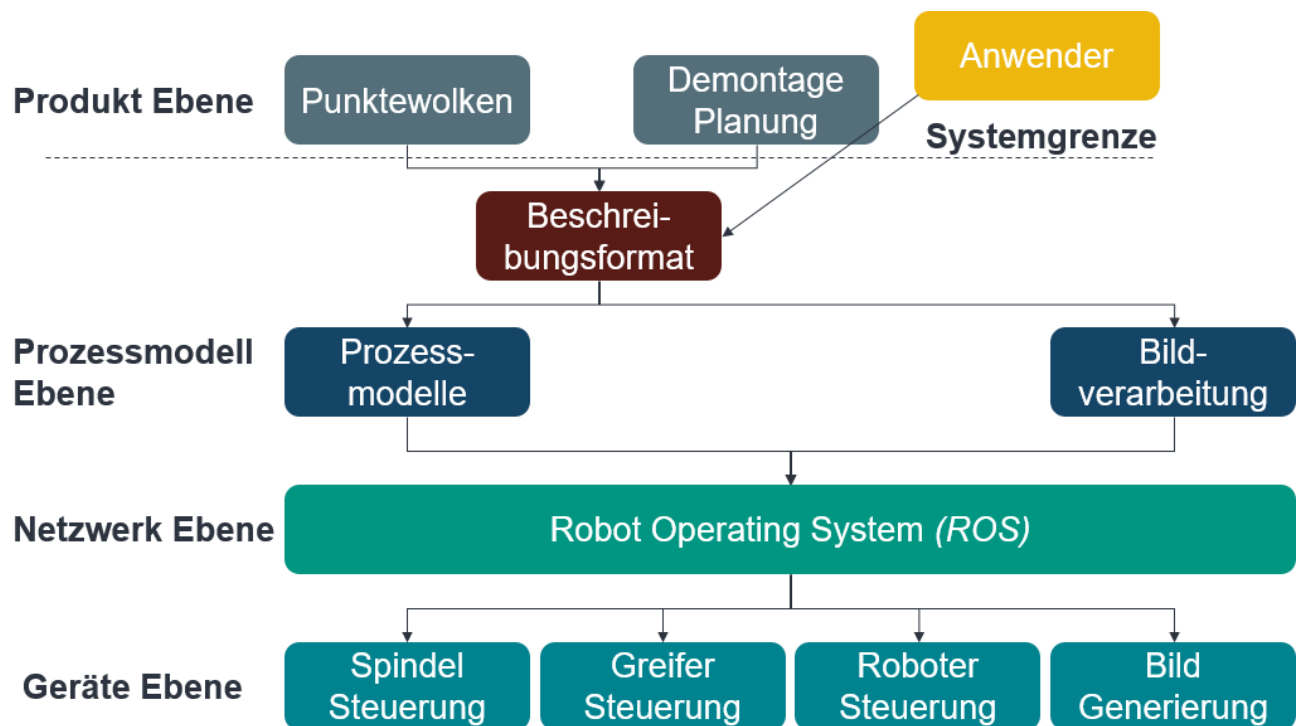


Abbildung 5-11: Aufteilung und Interaktion der Teilsysteme

## 6 Realisierung der roboterbasierten Demontagezelle

### 6.1 Realisierung des Gesamtaufbaus

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.4 getroffenen Modulzuordnungen wird die mechatronische Realisierung der roboterbasierten Demontagezelle in diesem Kapitel beschrieben. Abbildung 6-1 zeigt verschiedene Ansichten des CAD-Modells der konzipierten Demontagezelle.

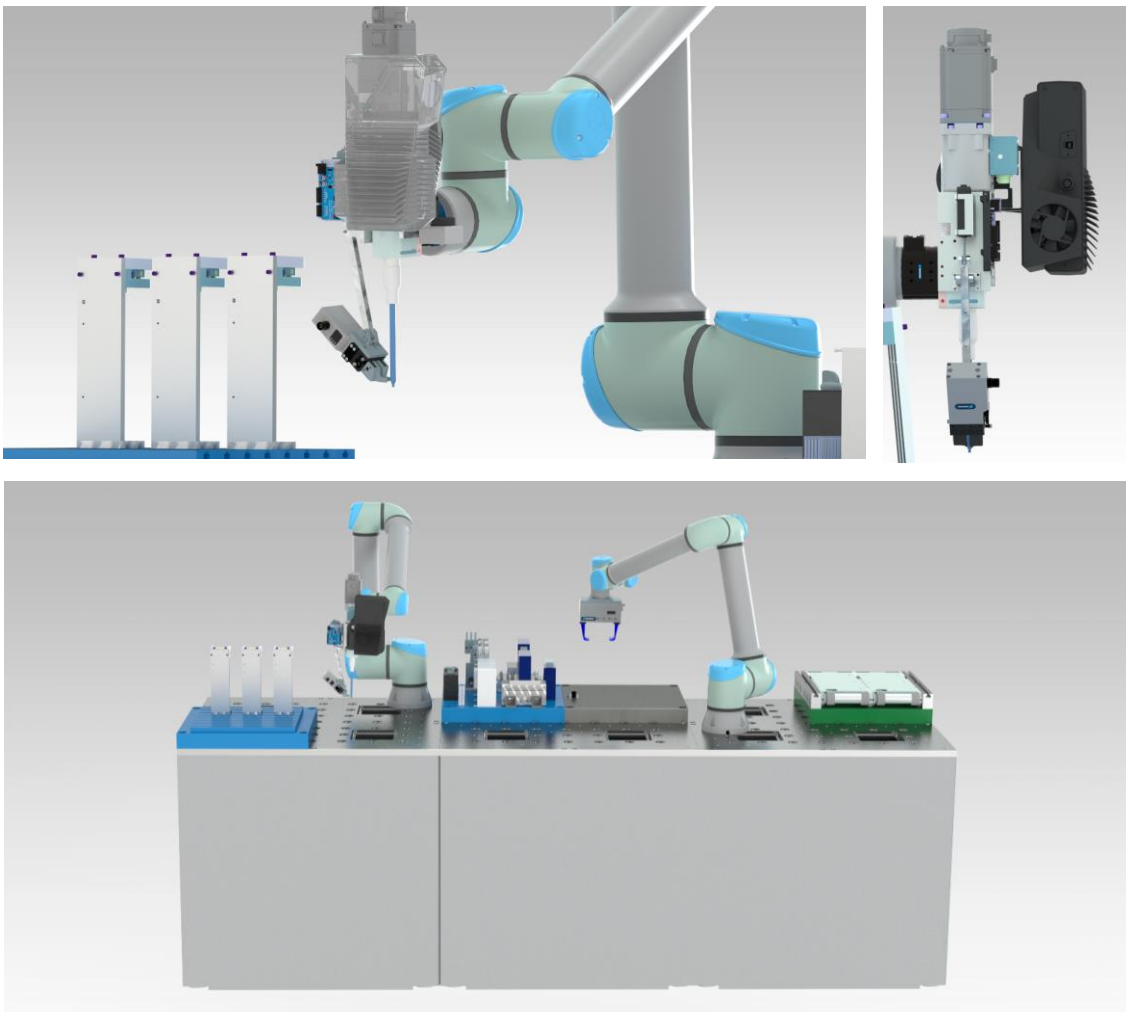


Abbildung 6-1: CAD-Modell der Demontagezelle

Die praktische Umsetzung der Module schließt zugleich auch die Erreichung des dritten Teilziels der vorliegenden Arbeit, die *mechatronische Realisierung, den Aufbau und die Inbetriebnahme der Demontagezelle*, ein. Die Zielerreichung lässt sich anhand der Anpassungsfähigkeit des Roboterwerkzeugs an die Geometrie der Schraubenkopfantriebe bemessen. Abbildung 6-2 zeigt einen typischen Ablauf der Demontage einer

Schraube anhand zeitlich gestaffelter Bilder. Die Bilder (a) bis (f) sind der ersten Prozessphase, dem *Anfahren der Schraubverbindung*, zuzuordnen. Dabei findet zunächst eine sensortechnische Erfassung des Cores mittels Bildverarbeitung statt (Bild (a) und Bild (b)). Im Anschluss wird das Roboterwerkzeug durch einen Wechsel der Schraub-  
erklinge an die Geometrie der Schraubenkopfantriebe angepasst (Bild (c) bis Bild (e)). Mit der endeffektorgeführten Kamera und dem Bildverarbeitungsmodul wird dann die Schraub-  
erklinge entsprechend dem Schraubenkopfantrieb positioniert (Bild (f)). Es folgen die *Formschlusserstellung* mittels der Suchstrategie in Bild (g) und das *Ausdrehen* der Schraube in Bild (h). Der vierte Prozessschritt, das *Abführen der gelösten Schraube*, ist in Bild (i) bis Bild (k) zu sehen. Im Anschluss bewegt sich die Roboterkinematik in die Ausgangslage zurück und weitere Schrauben können demontiert werden (Bild (l)).

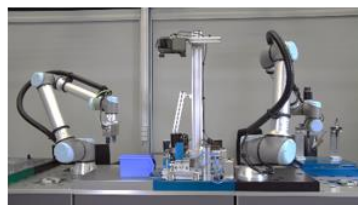
(a):  $t=0s$ (b):  $t=5s$ (c):  $t=9s$ (d):  $t=11s$ (e):  $t=17s$ (f):  $t=25s$ (g):  $t=37s$ (h):  $t=41s$ (i):  $t=43s$ (j):  $t=47s$ (k):  $t=53s$ (l):  $t=57s$ 

Abbildung 6-2: Ausführung der Demontageaufgabe mitsamt Werkzeugwechsel

## 6.2 Realisierung der Teilmodule

### 6.2.1 Realisierung des Endeffektormoduls

#### Mechatronischer Aufbau der Schraubspindel

Zentrales Element des modularen Roboterwerkzeuges ist eine industrielle Schraubspindel des Typs SEV-P des Herstellers WEBER Schraubautomaten<sup>15</sup>. Diese Spindel kann ein maximales Drehmoment von 10 Nm mit einer maximalen Drehzahl von 2.500 U/min aufbringen und ist mit einem mechanischen Wechselsystem für Schrauberklängen ausgestattet. Die verwendete Steuerung ist vom Typ C30S desselben Herstellers. Das CAD-Modell der Demontagezelle in Abbildung 6-1 zeigt neben der Schraubspindel auch den Greifer für gelöste Schrauben sowie die Sensoriken des Bildverarbeitungsmoduls.

#### Mechatronischer Aufbau des Schraubengreifers

Die Zuführung des Greifsystems wird analog zu den Ansätzen von Gerbers et al. durch eine unteraktuierte Kinematik umgesetzt, welche die Bewegung eines elektrischen Linearaktors über ein Hebelsystem in eine translatorisch-rotatorische umsetzt. Die Funktion ist links oben in Abbildung 6-3 als Prinzipskizze dargestellt (Gerbers et al., 2016). Für den Aktor wird ein Servomotor des Herstellers MightyZap<sup>16</sup> eingesetzt. Die angetriebene Zahnstange ist mit einer Kniehebelkinematik verbunden und die geometrischen Abmessungen sind so gewählt, dass sich die Greiferfinger im ausgefahrenen Zustand genau unter dem Kopf der gelösten Schraube befinden. Die Greiferfinger können mit einer kleinen aufbauenden Störkontur eine breite Varianz an Schrauben greifen. Wenn der geführte Greifer in der aktuierten Position schließt, erfolgt ein formschlüssiger Griff am Schaft der Schraube. Dadurch ist der Schraubengreifer weitestgehend unabhängig vom Schraubenkopfantrieb. Mit dem elektrischen Zweibacken-Parallelgreifer des Typs EGP 40 vom Hersteller SCHUNK<sup>17</sup> lassen sich Griffweiten von 1 mm bis 8 mm realisieren.

---

<sup>15</sup> WEBER Schraubautomaten GmbH (2022), Schrauber für Leichtbauroboter MRK/LBR, Eindrehwerkzeug SEV-P Art.-Nr. C05418. [www.weber-online.com/stationaerschrauber/stationaerschrauber-sev-p](http://www.weber-online.com/stationaerschrauber/stationaerschrauber-sev-p) [19.07.2025]

<sup>16</sup> IR ROBOT (2020), 12Lf Servo Series Art.-Nr. 12Lf-35F-27. [www.mightyzap.com/en/12lf-35f-27](http://www.mightyzap.com/en/12lf-35f-27) [19.07.2025]

<sup>17</sup> SCHUNK SE & Co. KG (2023), Elektrischer 2-Finger-Parallelgreifer mit leichtgängiger, wälzgeführter Grundbackenführung EGP 40-N-N-IOL Ident.-Nr. 1372735. [www.schunk.com/de/de/greiftechnik/parallelgreifer/egp/egp-40-n-n-iol/p/000000000001372735](http://www.schunk.com/de/de/greiftechnik/parallelgreifer/egp/egp-40-n-n-iol/p/000000000001372735) [19.07.2025]

Sollwertvorgaben und Aktuationszeitpunkte für Greifer und Linearaktor werden durch die Steuerung der Demontagezelle über ROS-Services ausgelöst. Als Greifpose werden die vom Bildverarbeitungsmodul ausgegebenen Posen der Schraubenkopfantriebe ausgewählt. Die Orientierung der Greiferfinger wird zunächst zufällig ausgewählt. Zur Vermeidung von Kollisionen zwischen Greiferfingern und Störgeometrien der Cores wurde in der Arbeit A\_Geier ein auf RGBD-Informationen basierender Algorithmus umgesetzt, welcher mithilfe eines Raycasting-Ansatzes kollisionsfreie Vektoren für die Orientierung der Greiferfinger auf der Schraube ermittelt (A\_Geier, 2023). Abbildung 6-3 zeigt das realisierte Endeffektormodul in verschiedenen Ansichten.

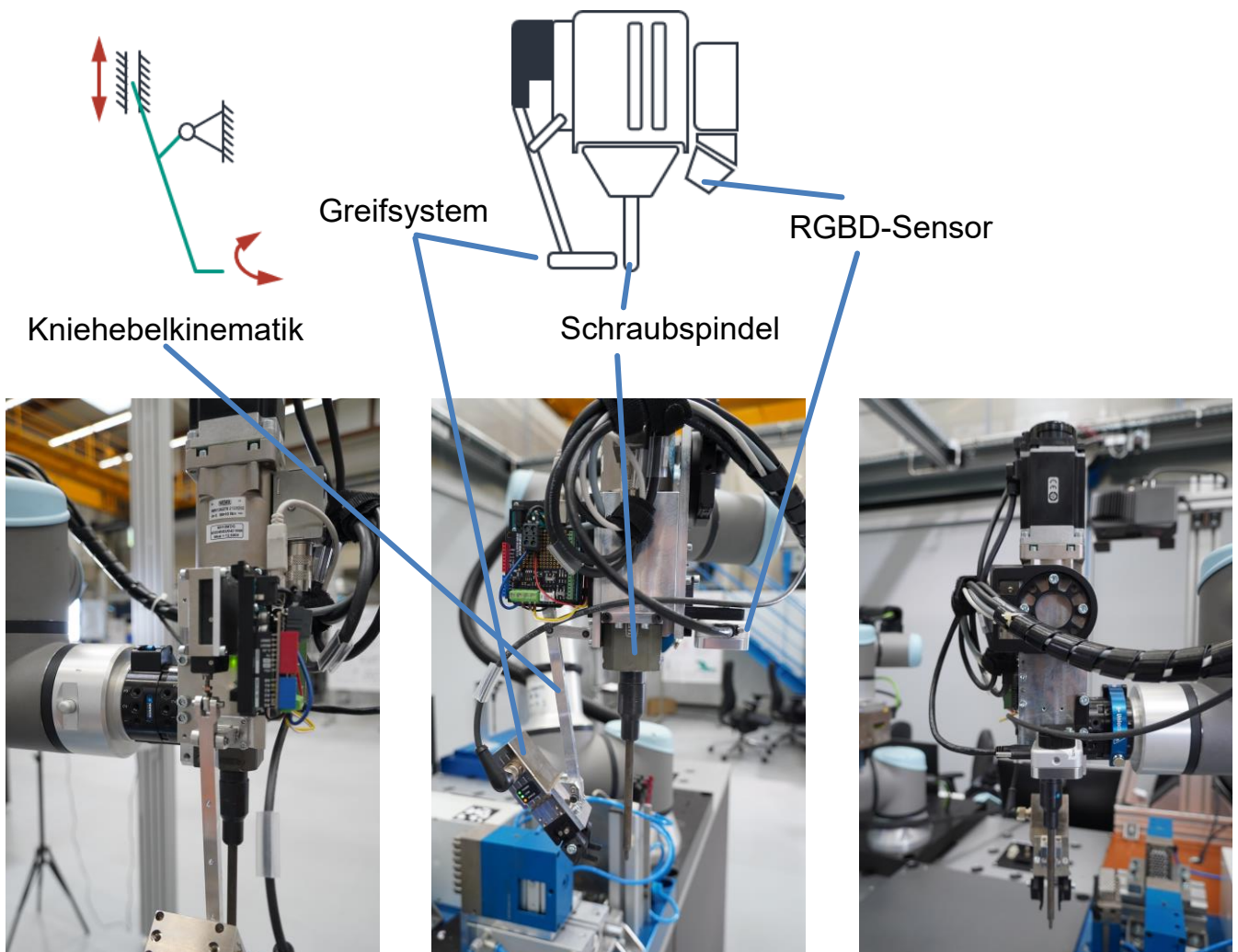


Abbildung 6-3: Realisiertes Endeffektormodul



### 6.2.2 Realisierung des Bildverarbeitungsmoduls

Für die Bildgenerierung wird ein RGBD-Sensor des Typs RealSense D405 von dem Hersteller Intel mit einer Auflösung von  $1280 \times 720$  Pixeln für die Bildinformationen und  $1280 \times 720$  Pixeln für die Tiefeninformationen verwendet<sup>18</sup>. Das Kamerasystem ist mit Autofokus-Funktionalität ausgestattet. Die beiden Bildverarbeitungsalgorithmen (Lokalisation und Klassifikation von Schraubenköpfen sowie Erkennung des Korrosionszustandes) werden, wie in Abbildung 5-9 dargestellt, sequenziell auf einem Intel-i5 Prozessor angewendet. Die Laufzeiten in diesem Setup sind in der Größenordnung von durchschnittlich ca. 230 ms und ergeben folglich ca. vier Bilder pro Sekunde, was hinreichend für die vom Visual Servoing bestimmte Geschwindigkeit ist. Zur Beleuchtung der Szene wird außer dem Umgebungslicht und der Beleuchtung des Labors keine weitere Lichtquelle genutzt. Entsprechend enthalten auch die Bilddatensätze Variationen des Umgebungslichtes. In praktischen Versuchen zeigte sich, dass durch die Auflösung eine maximale Entfernung von ca. 30 cm des Sensors gegenüber dem Objekt sinnvoll ist. Größere Distanzen lassen die Erkennungsgenauigkeit merklich abnehmen.

Zur Bemessung der korrekten Klassifikation der Schraubenkopfantriebe wird eine Versuchsreihe durchgeführt. Dazu werden  $n = 30$  Cores nach Abbildung 5-1 ausgewählt. Die bei den Cores vorhandenen Schraubverbindungen werden manuell in die Klassen *Idealzustand*, *Typische Korrosionserscheinung* und *Typische mechanische Abnutzung* eingeordnet. Der Endeffektor wird in die Erkennungsposition gefahren und die Cores werden dem Demontagesystem präsentiert. Zur Bemessung der Performanz wird ein Schwellenwert von 0,7 für die Konfidenz (engl. *Confidence threshold*) festgelegt. Detektionen, welche diesen Schwellenwert unter den Anwendungsbedingungen überschreiten, werden als korrekt bewertet. Insgesamt werden dem System somit 176 Schrauben gezeigt. Die folgende Tabelle 6-1 stellt die Ergebnisse der Untersuchungen dar.




Bei Betrachtung der Ergebnisse wird ersichtlich, dass das Bildverarbeitungsmodul sehr robust bei der Detektion der Schrauben mit Außensechskant-Kopfantriebsmerkmalen ist. Insbesondere bei Philipps-Schrauben, welche vom Idealzustand abweichen, arbeitet das System jedoch ungenau. Bei den Ergebnissen ist anzumerken, dass für die

---

<sup>18</sup> Intel Corporation (2022), Intel® RealSense™ D405. See the world up close. Depth Camera D405. [www.intelrealsense.com/depth-camera-d405/](https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d405/) [19.07.2025]

Bildaufnahme nur eine fixe Position des Endeffektors verwendet wird. In der Laufzeitanwendung des Systems wird durch den Demontagevorgang der Endeffektor bewegt. Entsprechend stehen dem System mehrere Perspektiven zur Erkennung zur Verfügung. Es ist zu erwarten, dass die Detektionsgenauigkeit gesteigert wird.

*Tabelle 6-1: Detektionsgenauigkeit in einer Feldstudie*

<b>Schraubenklasse</b>	<b>Idealzustand</b>	<b>Typische Korrosionserscheinung</b>	<b>Typische mechanische Abnutzung</b>
			
Innensechsrund (Torx) Nennmaß 20 (T20)	70,0 %	-	90,0 %
Innensechsrund (Torx) Nennmaß 25 (T25)	100,0 %	84,2 %	83,3 %
Außensechskant Nennmaß 7 (SK7)	90,9 %	100,0 %	100,0 %
Philipps Nennmaß 2 (PH2)	81,9 %	75,0 %	66,7 %

Bei der Visual-Servoing-Aufgabe dient der RGBD-Sensor als visueller Input für die Ausrichtung von Werkzeug und Schraube. Die RGBD-Kamera nimmt kontinuierlich Tiefen- und Farbbilder des Arbeitsbereichs auf, sodass das System die Schraubenposition und Klassifizierungsinformationen in Echtzeit erkennen kann. Der erfasste RGB-Datenstrom wird an das YOLO-Netzwerk gesendet, um die Schraubenerkennung durchzuführen. Der Tiefendatenstrom wird mit den Erkennungsergebnissen des YOLO-Netzwerks fusioniert, sodass die Ausrichtung des Endeffektors berechnet werden kann. Aufgrund der Suchstrategie mit rotierender Schrauberklinge und der Rotationssymmetrie der Geometrie der Schraubenkopfantriebe ist die rotatorische Ausrichtung irrelevant. Die Ausrichtung des Endeffektors wird daher auf Koaxialität der Achse der Schrauberklinge mit der Achse des Schraubenschaftes optimiert.

Somit steht das für die Hauptfunktion HF4 erforderliche Sensorsystem zur Verfügung. Die Verfahrbefehle der Roboterkinematik können in Abhängigkeit der vorliegenden Demontageaufgabe abgeleitet werden.

### 6.2.3 Realisierung des Steuerungsmoduls

Für das Steuerungsmodul wird die sogenannte *Karlsruhe Remanufacturing System Architecture* (KaReSA) angewendet. Eine umfassendere Darstellung dieser Systemarchitektur ist in der zugehörigen Publikation zu finden, in der die Details der Architektur umfassend erläutert werden (Mangold, Mata et al., 2023). Das folgende Kapitel stellt die für das Verständnis der Arbeit erforderlichen Aspekte heraus. In der Abbildung 6-4 ist die Systemarchitektur schematisch dargestellt.

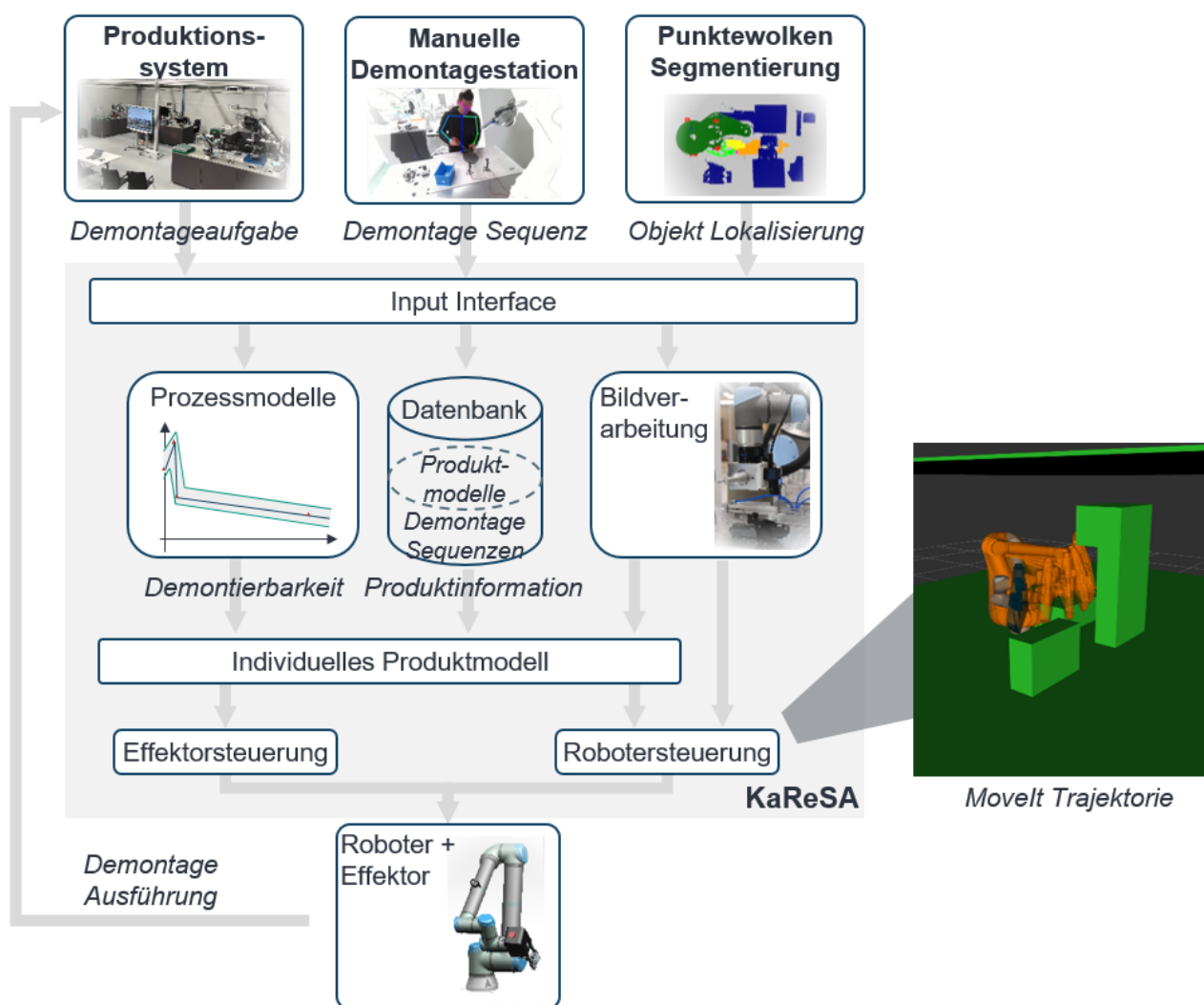


Abbildung 6-4: Systemarchitektur der Demontagezelle, nach (Mangold, Mata et al., 2023)

Die Softwarekomponenten des Systems werden unter Verwendung von ROS Noetic Ninjemys umgesetzt. Mithilfe dieses Meta-Betriebssystems können die einzelnen Programmbausteine Informationen nach dem Publish-Subscribe-Verfahren miteinander austauschen. Dazu werden im ROS-System logische Softwareeinheiten als Knoten



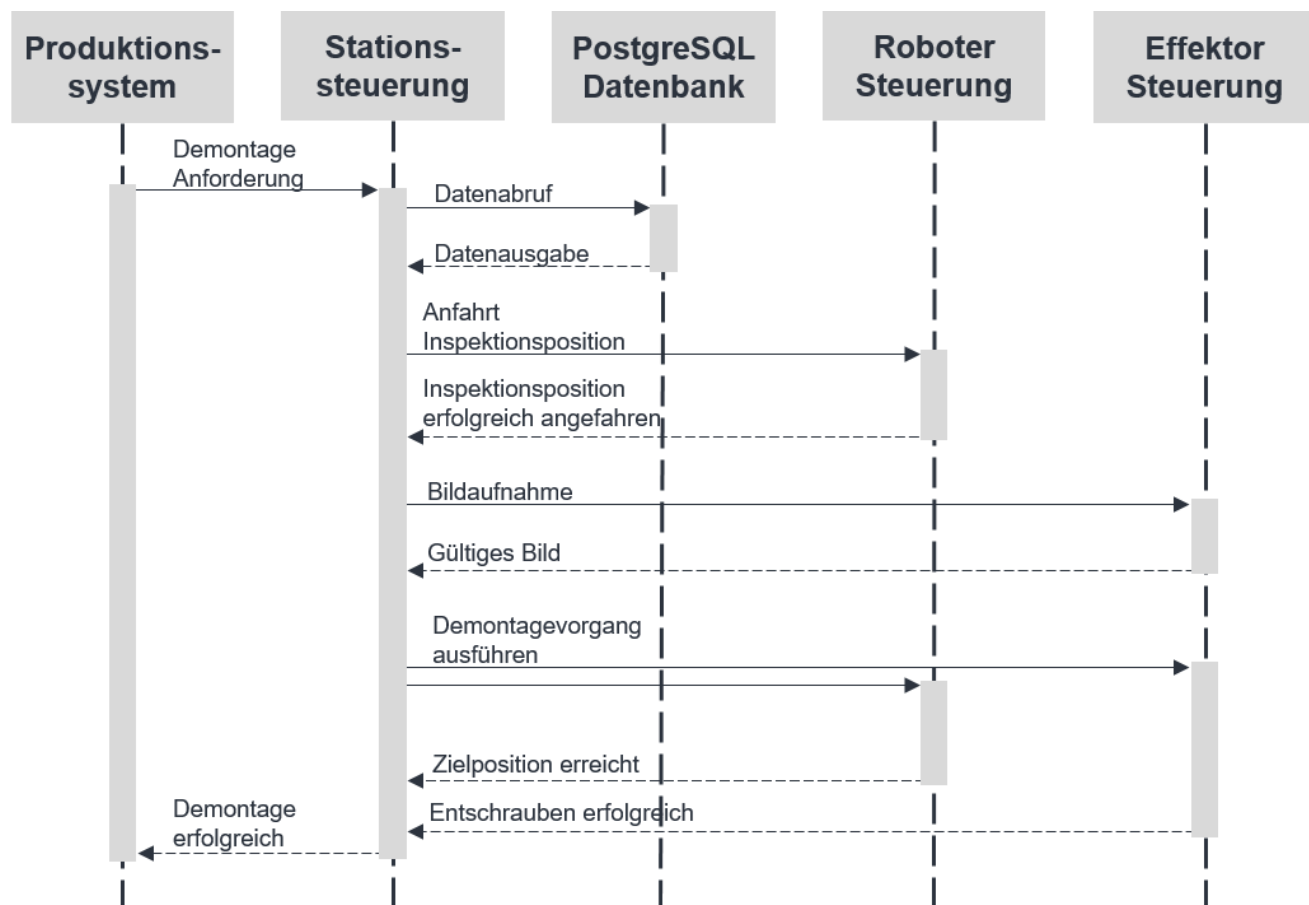
(engl. *Nodes*) zusammengefasst. In der umgesetzten Demontagezelle fungiert ein zentraler Kontrollknoten (engl. *central control node*) als wichtigstes Element und Koordinator des Systems. In dieser Node sind neben der Interaktion mit dem Roboter auch die wichtigsten Algorithmen und Prozesse programmiert. Für die Pfadplanung wird das Software Framework MoveIt<sup>19</sup> verwendet und die Interaktion mit der Roboterhardware nutzt das *Real-Time Data Exchange* (RTDE) Protokoll<sup>20</sup> des Roboterherstellers Universal Robots. Der central control node hat Zugriff auf die weiteren in Abbildung 6-4 dargestellten Elemente. Für die Interaktion mit der übergeordneten Steuerung und dem Anwender stellt ein Service-Server verschiedene ROS-Services zur Verfügung. So werden Operationen für andere Entitäten in diesem ROS-Netzwerk zugänglich gemacht. Da ROS-Services von Natur aus blockierend sind, kann dieser Node die eingehenden Service-Aufrufe automatisch planen, um sicherzustellen, dass jeweils nur eine Ausführung erfolgt. Die Bildverarbeitung ist in Form einer YOLO-Detektor-Node umgesetzt. Dort wird das in Kapitel 6.2.2 vorgestellte Bildverarbeitungsmodul in eine Laufzeitumgebung eingebettet. Erkannte Schrauben werden in einer Liste geteilt und in einer PostgreSQL-Datenbank werden die Informationen in dem Beschreibungsformat zusammengefügt.

In Abbildung 6-5 ist die umgesetzte Implementierung in Form eines Sequenzdiagrammes dargestellt. In der Abbildung ist der Informationsfluss bei der Demontage zu erkennen. Es wird deutlich, wie das übergeordnete Produktionssystem zunächst eine Demontageanforderung mit einem ROS-Serviceaufruf auslöst. Der central control node der Demontagezelle interagiert im Anschluss mit der Datenbank, der Endeffektor Steuerung (Greifer-Steuerung und Spindel-Steuerung) und der Roboter-Steuerung. Während der Prozessausführungen findet eine Aktualisierung des Informationssatzes in der Datenbank statt. Nach dem erfolgreichen Demontageprozess erhält das übergeordnete Produktionssystem eine entsprechende Rückmeldung über den ROS-Service.

---

<sup>19</sup> PickNik Robotics (o.D.), Moving robots into the future. <https://moveit.ros.org> [19.07.2025]

<sup>20</sup> Universal Robots A/S (2019), Real-Time Data Exchange (RTDE) Guide. <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/real-time-data-exchange-rtde-guide/> [19.07.2025]

*Abbildung 6-5: Demontage-Informationsfluss*

## 7 Funktionsnachweis des Konzepts

In dem folgenden Kapitel wird der Funktionsnachweis des Konzepts anhand von praktischen Versuchsreihen erbracht und die Tragweite der Ergebnisse wird an der entwickelten Demontagezelle untersucht. Die Ergebnisse der Versuchsreihen bemessen somit die Erfüllung des vierten Teilziels, die *Validierung des Beitrags anhand von praktischen Versuchsreihen*. Diese erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die mechatronische Umsetzung der Demontagezelle betrachtet und im Anschluss wird die modellbasierte Prozessregelung, im Speziellen die Demontierbarkeitsanalyse, experimentell untersucht.

### 7.1 Validierung des mechatronischen Aufbaus der automatisierten Demontagezelle

Nachdem die Funktion der einzelnen Teilmodule bereits in den Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.3 grundlegend charakterisiert wurde, erfolgt zur Validierung des mechatronischen Aufbaus der automatisierten Demontagezelle eine Reihe praktischer Demontageversuche. Ziel dieser Versuche ist, die Entsprechung zu den in Kapitel 5.2 definierten Anforderungen an die Demontagezelle zu überprüfen. Um eine Vergleichbarkeit mit aktuellen Demontagezelle für die automatisierte Schraubendemontage aus dem Stand von Forschung und Technik zu schaffen, wird die Zeitverteilung des Demontageprozesses nach dem *Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubverbindungen* (siehe Kapitel 2.3) analysiert. Diese Betrachtung ermöglicht nicht nur einen direkten Vergleich mit bestehenden Demontagezellen, sondern lässt auch Rückschlüsse auf die Interaktion der Teilmodule zu. In Abbildung 7-1 sind die Prozesszeiten eines repräsentativen Demontagevorgangs für die in Abbildung 5-1 dargestellten Cores aufgetragen.

Es ist festzustellen, dass die erste Prozessphase, das *Anfahren der Schraube*, die insgesamt längste Zeit benötigt. Die in dieser Prozessphase inkludierten Zwischenschritte *Erkennen* und *Werkzeugwechsel* benötigen zusammen 23 Sekunden pro Schraubverbindung. In dieser Prozessphase findet zunächst die Lokalisation und Klassifikation von Schraubenkopfantrieben und die Ermittlung des relativen Korrosionsgrades mittels Bildverarbeitung statt. Im Anschluss wird der Endeffektor mit einem Werkzeugwechsel

an die vorliegende Schraubenkopfgeometrie angepasst. Mit einer umfassenderen Demontageplanung ließe sich die Zeitspanne der ersten Prozessphase minimieren. Wenn Schrauben mit gleichen Kraftangriffsmerkmalen nacheinander demontiert werden könnten, wäre kein zeitaufwändiger Werkzeugwechsel erforderlich.

Die anschließende Formschlusserstellung benötigt durch die ausgeführte Suchstrategie ca. 20 Sekunden und ist damit die zweitlängste Prozessphase. Eine Optimierung der Bildverarbeitungsmethoden durch eine höhere Auflösung und Genauigkeit bei der Bestimmung der Mittelpunkte für die Suchstrategie könnte die Dauer dieses Schrittes verringern.

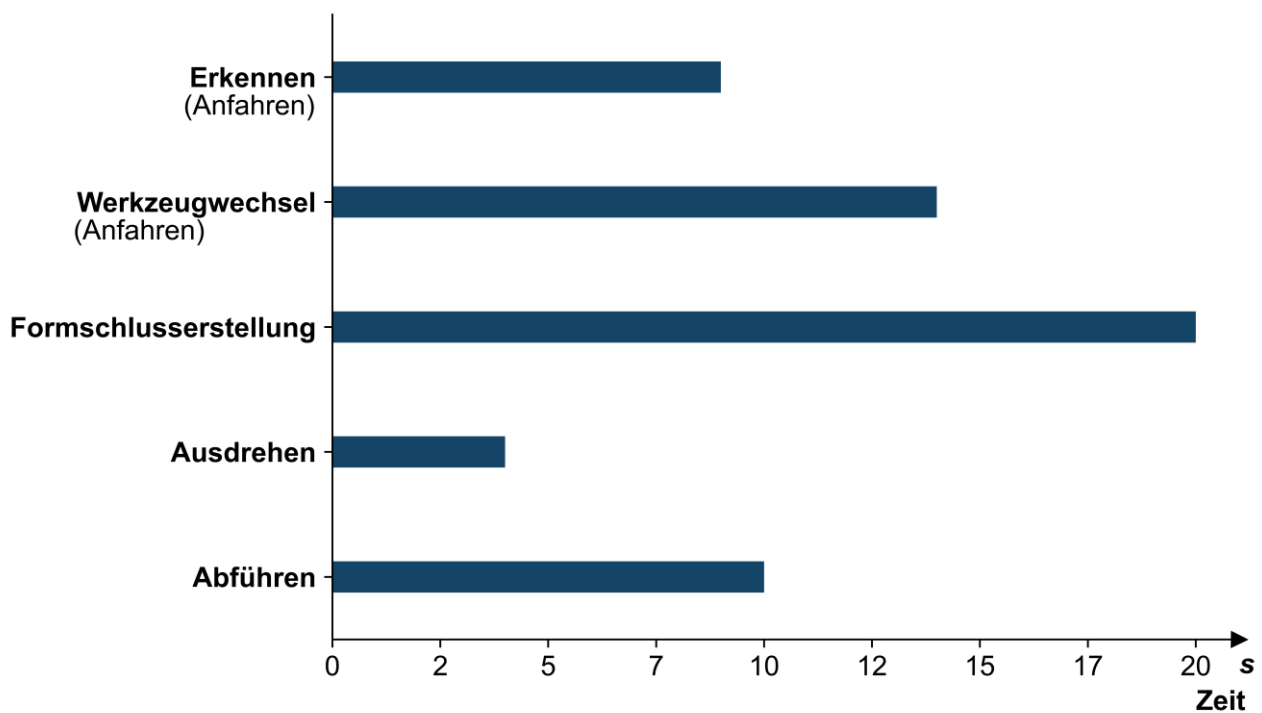


Abbildung 7-1: Prozesszeiten eines automatisierten Entschraubvorgangs, aufgeteilt nach dem Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubverbindungen

Um die Effizienz der Demontagezelle im Betrieb zu bewerten, wird die Prozesszeit mit der manuellen Durchführung derselben Demontageaufgabe verglichen. Für den Vergleich wird ein Startermotor von einem erfahrenen menschlichen Werker unter Einsatz von manuellem Werkzeug demontiert und die Prozesszeit wird anhand der Prozessphasen gemessen. Die folgende Abbildung 7-2 stellt die gemessenen Demontagezeiten grafisch in einem Balkendiagramm dar. Im Vergleich zu dem ersten Versuch der Validierung kommt bei dieser Versuchsdurchführung eine Prozessphase hinzu. Es wird angenommen, dass auch bei der manuellen Demontage die Ergebnisse und erhobenen Prozesswerte der Demontage an die übergeordnete Steuerung zurückgemeldet werden müssen. Somit wird das *Messwerte Eintragen* erforderlich.

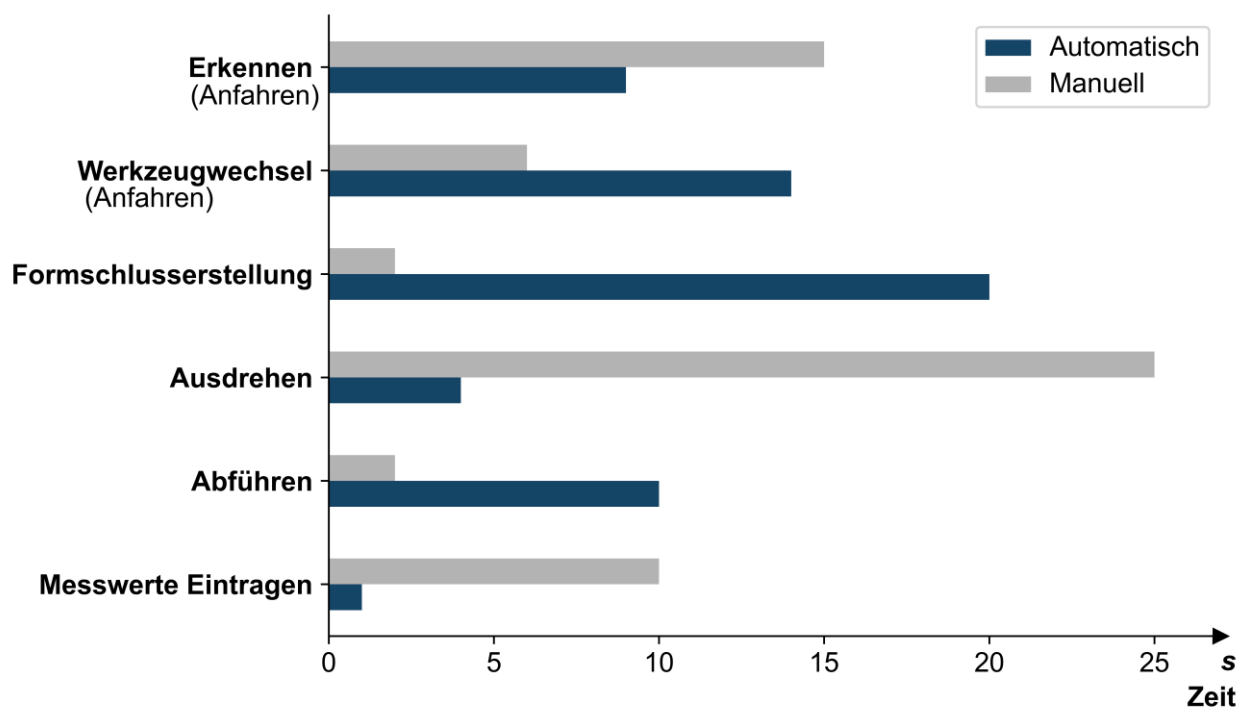


Abbildung 7-2: Prozesszeiten eines automatisierten Entschraubvorgangs im Vergleich zu einer manuellen Prozessdurchführung

Der direkte Vergleich zeigt wesentliche Unterschiede bei der Formschlusserstellung und dem Ausdrehen. Während der menschliche Werker das Werkzeug sehr schnell im Vergleich zur automatisierten Demontagestation in Formschluss bringen kann, ist die automatisierte Demontagestation schneller beim Ausdrehen. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass der menschliche Werker im Versuch lediglich ein manuelles Werkzeug verwendet. Auch der Werkzeugwechsel ist bei einer manuellen Durchführung deutlich schneller. Insgesamt benötigt die automatisierte Demontagezelle

ca. 60 Sekunden für die Demontage der betrachteten Schraubverbindung. Der manuelle Demontagevorgang dauert etwa genauso lange.

In der Literatur sind Daten von vergleichbaren Demontagesystemen zu finden, die ähnliche Ergebnisse wie die vorliegende Untersuchung liefern. Die an der TU Berlin entstandene automatisierte zerstörungsfreie Demontagestation des SFB 281 *Demontagefabriken* (vgl. Abbildung 2-3) wendet im Mittel ca. 50 Sekunden für den kompletten Demontagevorgang einer Schraubverbindung auf. Eine weitere Unterteilung in die Prozessphasen wird nicht angegeben. Es wird lediglich auf den Anteil der Nebenzeiten verwiesen, die etwa 50 Prozent ausmachen. Dazu wird unter anderem das Erkennen der Schraube mit nur zwei Sekunden gezählt (Keil, 2004, S. 133–135). In der Arbeit von Sawanishi et al. wird der Prozessschritt *Schraube ausdrehen* bei der manuellen Demontage von Mobiltelefonen mit durchschnittlich 2,4 Sekunden bemessen (Sawanishi et al., 2015). Vanegas et al. ermitteln in ihrer Studie eine Prozesszeit von ca. 2,2 Sekunden zum manuellen Schraubenlösen in Flachbildschirmen (Vanegas et al., 2016, May). Al Assadi et al. geben eine Schraubenlösezeit von ca. vier Sekunden für ihre automatisierte Demontagezelle an (Al Assadi, Rosenberg et al., 2022).

Ergänzende Betrachtungen zur Wirtschaftlichkeit von vollautomatisierten *Demontagefabriken*, in denen automatisierte Demontagezellen zum Einsatz gelangen, werden von Seelig et al. vorgenommen. Die Autoren kommen in ihren modellbasierten Untersuchungen zu der Erkenntnis, dass „die Demontage durch Roboter den Zeitaufwand um etwa ein Drittel gegenüber der manuellen Vorgehensweise verringern müsste“, um zu einem wirtschaftlichen Gesamtprozess zu führen (Seelig et al., 2019, S. 352). Die im Kontext dieser Arbeit entstandene Demontagezelle wird folglich in einem produktiven Umfeld nicht ohne weitere Optimierungen wirtschaftlich arbeiten können. Es handelt sich um eine prototypische Anlage, mit der insbesondere die Integration von Prozessmodellen in der automatisierten Demontage untersucht wird.

## **7.2 Prädiktive Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage**

Im zweiten Schritt der Validierung werden die modellbasierten Sollwertgeber untersucht. Mit dieser Charakterisierung wird auch das Erreichen des ersten Teilzieles bestimmt, der Aufbau und die a priori-Auswertung von Prozessmodellen für das mögliche Drehmoment-Prozessfenster beim automatisierten Entschrauben, welche mit fortschreitender Anzahl von Demontageoperationen eine höhere Genauigkeit erreichen. Zur Validierung wird eine praktische Versuchsreihe durchgeführt, bei der 17 Cores von der Demontagezelle demontiert und dabei insgesamt 52 Schraubverbindungen gelöst werden. Zur Charakterisierung der Genauigkeit der Prozessmodelle werden die Ergebnisse der errechneten Abschermomente und Losdrehmomente mit den während der Prozessdurchführung gemessenen Werten der Kenngrößen verglichen. Wenn die Modellierung des sich so ergebenden Drehmomentfensters ideal funktionieren würde, dann wäre die Differenz zwischen dem gemessenen Wert und dem modellierten funktionsrelevanten Wert gleich null. Bei einem Abscheren der Schraube entspräche der Messwert dem modellierten Abschermoment, bei einer erfolgreichen Demontage würde der Messwert idealerweise dem modellierten Losdrehmoment entsprechen.

Die Ergebnisse der Demontageuntersuchungen sind in der nachfolgenden Abbildung 7-3 grafisch und in Tabelle 0-8 im Anhang tabellarisch dargestellt.

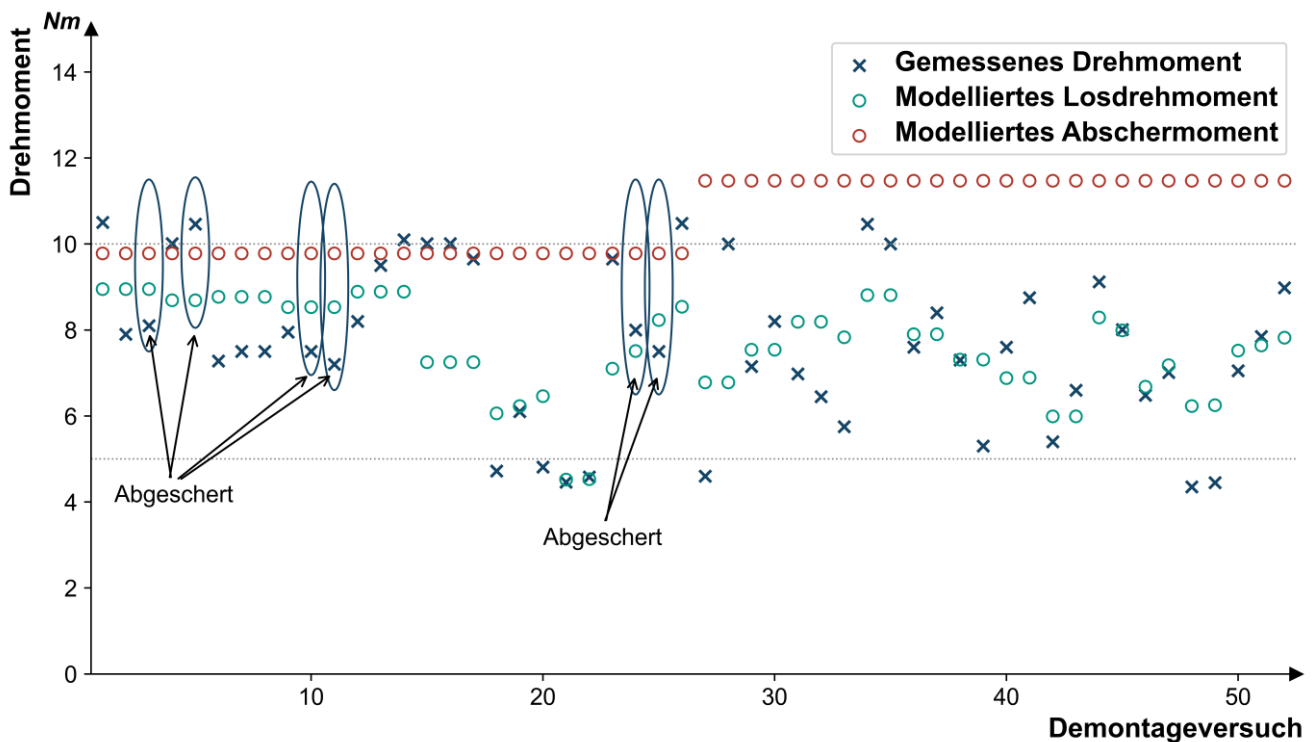


Abbildung 7-3: Bewertung der Performanz der Demontierbarkeitsanalyse

Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, wie die Abschermomente auf Grundlage der vorliegenden Informationen zur Schraubverbindung modelliert werden. In den praktischen Versuchsreihen wurden zwei verschiedene Schraubentypen demontiert. Entsprechend nehmen die als rote Kreise dargestellten Datenpunkte zum modellierten Abschermoment zwei verschiedene Werte ein. Bei der in dieser Arbeit umgesetzten Modellierung des Abschermoments nehmen keine Größen Einfluss, welche vom individuellen Zustand der Schraubverbindung abhängen. Die Einflussgrößen sind durch die Geometrie und das Material der Schraubverbindung bestimmt. Im Gegensatz dazu lässt sich bei dem als grüne Kreise dargestellten modellierten Losdrehmoment erkennen, wie ein individueller Wert in Abhängigkeit des Korrosionsgrades für jede Schraubverbindung errechnet wird. Für jede Schraubverbindung gibt das Modell einen anderen Wert aus, welcher durch den detektierten Korrosionsgrad beeinflusst ist. Damit passt das Verhalten prinzipiell zum ermittelten Losdrehmoment. Das modellierte Losdrehmoment liegt in der Versuchsreihe in einem Bereich zwischen ca. 4,5 Nm und ca. 8,5 Nm, was der Größenordnung der bei der Demontage gemessenen Werte entspricht.



Die in den Versuchen abgescherten Schraubenköpfe sind in Abbildung 7-3 mit einem Textverweis markiert. Im theoretischen Falle einer idealen Modellierung wäre zu erwarten, dass für diese Fälle das modellierte Losdrehmoment über dem modellierten Abschermoment liegt und genau gleich zu dem gemessenen Drehmoment ist. Allerdings lässt sich dieser Fall in der Versuchsreihe nicht zuverlässig durch die Prozessmodelle nachstellen, was auf eine Einschränkung der Modellgüte hinweist. Es gibt einen Hinweis darauf, dass die in dieser Arbeit angenommene Reduktion des modellierten Losdrehmoments auf die Reibungszahl in der Kopfauflagefläche eine vereinfachte Darstellung ist, die nicht alle relevanten Faktoren präzise abbildet.

Darüber hinaus tritt bei manchen Schraubversuchen der Fall auf, dass das gemessene Drehmoment größer ist als das modellierte Abschermoment. Bei einer theoretisch idealen Modellierung wäre zu erwarten, dass die Schraube für diese Fälle bei der Demontage zerstört wird und ein Defekt eintritt. In diesen Fällen wurde jedoch bei der Versuchsdurchführung kein Abscheren festgestellt. Dies gibt einen weiteren Hinweis darauf, dass die in dieser Arbeit angenommene Modellierung nicht alle relevanten Faktoren präzise abbildet.

Es ist zusammenfassend zu erkennen, dass die entwickelten Modelle die Größen zustandsindividuell ausgeben und damit den Einfluss der Korrosion wie erwartet abbilden. Die Ergebnisse der Berechnungen liegen zwar in der richtigen Größenordnung, sind aber mit einer relativ hohen Ungenauigkeit versehen. Dadurch können die auftretenden Prozessfehlschläge nicht immer zuverlässig detektiert werden. Ursächlich hierfür kann sein, dass die bei der Modellierung verwendeten Parameter und Annahmen nicht umfassend genug sind, um das Demontageverhalten präzise abzubilden. In Formel 4-5 ist speziell der große Einfluss der Vorspannkraft gezeigt. In dem Ansatz dieser Arbeit wird bei der Modellierung des Losdrehmoments für die Vorspannkraft eine Größe aus Referenzversuchen ermittelt. Aus dem Stand der Technik ist aber bekannt, dass sich diese Kraftverhältnisse sehr stark während des Lebenszyklus verändern können. Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz setzt darauf, dass die Vorspannkraft nicht zustandsindividuell modelliert wird, da es aufgrund der technischen Herausforderungen schwierig ist, diese Größe sensorisch zu erfassen. Die Messergebnisse legen jedoch nahe, dass es sinnvoll wäre, eine Möglichkeit zu entwickeln, um diese Prozessgröße ebenfalls zu berücksichtigen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Die Agenda 2030 der Vereinten Nationen mit den 17 Sustainable Development Goals erfordert einen Paradigmenwechsel in der Industrie hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Dabei ist Remanufacturing eine wichtige Strategie für ökologische Nachhaltigkeit, welche den nachhaltigen Konsum und die nachhaltige Produktion adressiert. Mit dem erwarteten Anstieg an wiederaufbereiteten Gütern aufgrund steigenden Umweltbewusstseins und gesetzlicher Vorschriften wird eine Automatisierung der Remanufacturing Prozesskette erforderlich. Dabei spielt die Produktionstechnik eine Schlüsselrolle für den Erfolg, da die Automatisierung der Demontage eine große Herausforderung darstellt. Im Gegensatz zur automatisierten Montage ergeben die vielen Einflüsse während des Lebenszyklus eine hohe Unsicherheit bezüglich der Zustände von Komponenten und Verbindungselementen. Durch den weitverbreiteten Einsatz der Schraubverbindung bedeutet die robuste Demontage dieses speziellen Verbindungselementes einen wesentlichen Beitrag zur Automatisierung. Allerdings verändern die Einflüsse während des Lebenszyklus bei dieser Verbindungstechnologie insbesondere das Löseverhalten. Bei den typischerweise für die Montage und den Betrieb ausgelegten Schraubverbindungen kann es vorkommen, dass die im Zuge der Demontage eingebrachten Prozesskräfte zu einem Versagen führen. Verbleibende Reste des zerstörten Verbindungselementes im Gewinde erfordern dann eine aufwendige manuelle Nacharbeit.

Das Ziel der Arbeit war es daher, einen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu schaffen, indem die Robustheit der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen gesteigert wird. Zur Zielerreichung wurden funktionsrelevante Prozessgrößen der Demontage von Schraubverbindungen modelliert und für die Bewertung der Demontierbarkeit bereits vor Beginn der Demontageprozesse herangezogen. Die Modelle fanden Anwendung im Betrieb einer systematisch konzipierten und entwickelten roboterbasierten Demontagezelle.

Die wesentlichen Funktionsgrößen bei der Demontage von Schraubverbindungen wurden in Kapitel 4 herausgestellt. Aus dem Bereich der Verbindungstechnik wurden analytische Modelle für die Anwendung in der automatisierten Demontage qualifiziert und in einem Laufzeitsystem umgesetzt. Wo erforderlich, wurden unbekannte Wirkzusammenhänge durch Referenzversuche erforscht und in die Modelle integriert. Es hat sich

gezeigt, dass das Losdrehmoment wesentlich von dem Korrosionsgrad und der Vorspannkraft in der Schraube beeinflusst wird. Die Messung der Vorspannkraft stellt eine technische Herausforderung dar, welche im produktiven Betrieb einer Demontagezelle nicht praktikabel wäre. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit ein Ansatz entwickelt, welcher das kontinuierliche Anpassen des quantifizierten Zusammenhangs zwischen relativem Korrosionsgrad und Losdrehmoment erlaubt. Da sich der Korrosionsgrad auch in einem Produktivbetrieb effizient mittels Bildverarbeitung bestimmen lässt, wurde dieser mit der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche korreliert. Mit zunehmender Anzahl an Demontageversuchen können die entwickelten Modelle zunehmend präziser werden. In praktischen Versuchen wurde dieser Zusammenhang für Beispielprodukte quantifiziert und es wurden die Einflüsse der vorherrschenden Faktoren bei der Demontage untersucht.

Mittels einer systematischen Analyse wurden die benötigten technischen Funktionen für die Schraubendemontage herausgearbeitet und modulweise für eine automatisierte Produktionsanlage umgesetzt. Neben einer Roboterkinematik besteht die entwickelte Demontagezelle aus einem Endeffektormodul mit integrierter Sensorik und Aktorik, einer intelligenten Bildverarbeitung sowie einem Steuerungsmodul. Die Module wurden mechatronisch umgesetzt und informationstechnisch miteinander verbunden. In experimentellen Versuchen wurde die Umsetzung der einzelnen Module bewertet.

Für die Erhebung der erforderlichen Messdaten in der Laufzeitumgebung wurde ein konzipiertes Bildverarbeitungsmodul eingesetzt. Neben der Möglichkeit fünf unterschiedliche, für den Anwendungsfall relevante, Schraubenkopfantriebe zu erkennen und zu lokalisieren, wurde es mit der Möglichkeit ausgestattet, den Korrosionsgrad auf Schraubenkopfantrieben zu erkennen. Die so erhobenen Informationen wurden von den Prozessmodellen zur Bewertung der Demontierbarkeit verwendet. Für den Informationsaustausch wurde ein Informationsmodell ausgewählt und an den entsprechenden Stellen für die Anwendung qualifiziert.

In praktischen Versuchsreihen wurden derzeit industriell wiederaufbereitete Cores aus dem automobilen Sektor demontiert und die Prozessdaten durch die hergeleiteten Modelle bewertet. Dabei konnte gezeigt werden, dass die umgesetzte Demontagezelle imstande ist, die Schrauben an den betrachteten Cores zu demontieren und sich an die vorliegende Demontageaufgabe anzupassen. Die dafür erforderliche Wandlungsfähigkeit wurde durch eine umfassende sensorische Erfassung der Umgebung realisiert.

Grundlage hierfür bildeten die aufgenommenen Bilddaten, deren automatisierte Auswertung sowie die Analyse der jeweiligen Aufgabenbeschreibung. Zur technischen Realisierung der Wandlungsfähigkeit kamen algorithmische Verfahren zur Bewertung der Lösbarkeit der Demontageaufgabe zum Einsatz. Die Versuchsreihen wurden mit zwei unterschiedlichen Typen von Elektromotoren durchgeführt, wodurch die Übertragbarkeit des Konzepts auf variierende Produktkonfigurationen erfolgreich nachgewiesen werden konnte. Die ermittelte Verteilung der Demontagezeiten ist vergleichbar mit derzeit im Stand von Forschung und Technik bestehenden weiteren automatisierten Demontagezellen.

Die Versuche dienten der Überprüfung des Ansatzes und zur Bemessung der Zielerreichung. Es zeigte sich, dass die Modelle die auftretenden Prozessfehlschläge nicht immer zuverlässig detektieren konnten. Trotz der zustandsindividuellen Bewertung der Prozessgrößen konnte die Steuerung der Demontagezelle das Auftreten der Prozessfehler nicht immer verlässlich vorhersagen. Es bedarf folglich einer weiteren Qualifizierung der Modelle, zum Beispiel durch den Einsatz von zusätzlicher Sensorik zum Erkennen des Schraubenzustands.

## 8.2 Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine automatisierte Produktionsanlage für die Demontage umgesetzt, welche derzeit in der Praxis größtenteils manuell stattfindet. Somit bietet eine Übertragung der Erfahrung der Werker auf die automatisierte Produktionsanlage das Potenzial, die Demontage noch weiter zu optimieren und zu flexibilisieren. In anschließenden Arbeiten kann untersucht werden, wie sich die Fähigkeiten der menschlichen Werker auf das automatisierte System übertragen lassen könnten. Das so beschriebene *Lernen vom Menschen* wird bereits in der Forschung thematisiert und bedarf ergänzender Forschungsarbeit (Lanza et al., 2022; Zaremski & Deml, 2020).

Das in dieser Arbeit umgesetzte Bildverarbeitungsmodul verwendet einen gleichbleibend großen Datensatz. In folgenden Arbeiten kann untersucht werden, ob sich die Genauigkeit der Bildverarbeitung durch einen dynamischen Datensatz weiter optimieren ließe. Ebenso wie in dieser Arbeit die Demontagevorgänge für eine Verbesserung der Genauigkeit der Prozessmodelle verwendet werden, könnten auch die aufgenommenen Bilddaten zu einem wachsenden Datensatz zusammengeführt werden.

Die Modellierung des Losdrehmoments setzt in der vorliegenden Arbeit darauf, dass die Montagevorspannkraft und die Reibungszahl im Gewinde bekannt sind. In der Realität handelt es sich allerdings um zwei Größen, die nicht ohne großen Mehraufwand zu bestimmen sind und häufig zerstörende Prüfverfahren im Labor erfordern. Weiterführende Arbeiten könnten sich dem Thema nähern, wie sich diese beiden Größen durch In-Line-Messungen ermitteln ließen. Ein alternativer Ansatz könnte auf eine Ergänzung des Vorwissens setzen, zum Beispiel könnten die bei der Schraubenauslegung genutzten Annahmen und Zielgrößen auch für die Demontageprozesse verwendet werden. Für den Kontext der vorliegenden Arbeit ist die derzeitige Umsetzung jedoch als ausreichend zu bewerten, da die Validierung bereits die grundsätzliche Funktionalität des Ansatzes gezeigt hat.

Aus dem Gebiet der Materialwissenschaften ist eine Abnahme der Festigkeit von Metallen, ausgelöst durch Korrosion, bekannt. Dieser Zusammenhang wird in den umgesetzten Modellen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da sie auf einen vom Zustand der Schraube unabhängigen Festigkeitswert zurückgreifen. Folgende Arbeiten könnten diesen Zusammenhang durch Referenzversuche charakterisieren und in die Anwendung der automatisierten Demontage einbringen.

## Publikationsliste

Die nachfolgende Auswahl an Publikationen ist unter Mitwirkung des Verfassers der vorliegenden Arbeit während der Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik entstanden.

- Simon Rieß, Jannis Laub, Sven Coutandin und Jürgen Fleischer (2020). Demontageeffektor für Schraubverbindungen mit ungewissem Zustand, ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115; DOI 10.3139/104.112401
- Jürgen Fleischer, Eduard Gerlitz, Simon Rieß, Sven Coutandin und Janna Hofmann (2021). Concepts and Requirements for Flexible Disassembly Systems for Drive Train Components of Electric Vehicles. Procedia CIRP, Elsevier, S. 577–582; DOI 10.1016/j.procir.2021.01.154
- Simon Rieß, Jonas Wiedemann, Sven Coutandin und Jürgen Fleischer (2022). Secure Clamping of Parts for Disassembly for Remanufacturing. Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021, DOI 10.1007/978-3-030-74032-0
- Simon Mangold, Christian Steiner, Marco Friedmann und Jürgen Fleischer (2022). Vision Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing. Procedia CIRP, Elsevier, S. 1–6; DOI 10.1016/j.procir.2022.02.001
- Marco Wurster, Jan-Felix Klein, Jan-Philipp Kaiser, Simon Mangold, Marco Friedmann, Jürgen Fleischer und Gisela Lanza (2022). Integrierte Steuerungsarchitektur für ein agiles Demontagesystem mit autonomer Produktbefundung; At-Automatisierungstechnik, DOI: 10.1515/auto-2021-0157
- Gisela Lanza, Tamim Asfour, Jürgen Beyerer, Barbara Deml, Jürgen Fleischer, Michael Heizmann, Kai Furmans, Constantin Hofmann, Alexander Cebulla, Christian Dreher, Jan-Philipp Kaiser, Jan-Felix Klein, Fabian Leven, Simon Mangold, Norbert Mitschke, Nicole Stricker, Julius Pfrommer, Chengzhi Wu, Marco Wurster und Manuel Zaremski (2022). Agiles Produktionssystem mittels lernender Roboter bei ungewissen Produktzuständen am Beispiel der Anlasser-Demontage, At-Automatisierungstechnik, DOI: 10.1515/auto-2021-0158
- Simon Mangold, Sebastian Kist, Marco Friedmann und Jürgen Fleischer (2022). Faserblasverfahren für biologische Bauteile. VDI-Z. 164, 67–69, DOI: 10.37544/0042-1766-2022-11-12-67

- Simon Mangold, Eduard Gerlitz, Sebastian Zimprich, Marco Friedmann, Sven Matthiesen und Jürgen Fleischer (2023). Systematic Quantitative Investigation of the Unscrewing Process with Regard to Breakaway Torque; Journal of Remanufacturing, DOI: 10.1007/s13243-022-00120-x
- Simon Mangold, Sara Mata, Asier Barrios, Marco Friedmann und Jürgen Fleischer (2023). The Control Architecture KaReSA: A Learning Disassembly System. CARV 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 562–569, DOI: 10.1007/978-3-031-34821-1\_61
- Simon Mangold, Malte Mehner, Moritz Ströhle, Sebastian Kist, Florian Kößler und Jürgen Fleischer (2025). Automated Production of Mycelium-Based Composite Products Using the Fiber Injection Molding Process. Circularity Days 2024. CD 2024. Zukunftstechnologien für den multifunktionalen Leichtbau, 42-52. DOI: 10.1007/978-3-658-45889-8\_4

## Literaturverzeichnis

Verweise gemäß dem Schema (A\_Name Jahr) bezeichnen studentische Arbeiten, die vom Verfasser der vorliegenden Arbeit angeleitet wurden.

(A\_Berlin, 2021)

Berlin, K. (2021). *Weiterentwicklung eines Schrauben Greifsystems*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Felk, 2022)

Felk, B. (2022). *Roboterbasiertes Entschrauben - Systemintegration und systematischer Vergleich von Suchstrategien zur Formschlusserstellung*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Geier, 2023)

Geier, A. (2023). *Greifen und Manipulation von kleinen Objekten in Umgebungen mit Störgeometrien*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Gietzen, 2021)

Gietzen, J. (2021). *Weiterentwicklung eines Schrauben Greifsystems*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Gu, 2023)

Gu, X. (2023). *Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing*.

Master Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Knierim, 2023)

Knierim, J. (2023). *Trajektorienoptimierung zur Verbesserung der Formschlusserstellung beim roboterbasierten Entschrauben mittels Reinforcement Learning*.

Master Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.



(A\_Menke, 2022)

Menke, V. (2022). *Konzeptualisierung und Entwicklung eines Schrauben Greifsystems für das Remanufacturing*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Merkle, 2020)

Merkle, A. (2020). *Analyse der menschlichen Demontagefähigkeiten*.

Seminararbeit. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Mlitzko, 2023)

Mlitzko, S. (2023). *Entwicklung von lernenden Modellen zur Vorhersage von physikalischen Eigenschaften von Verbindern auf Grundlage von Bildinformationen*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Schmidt, 2020)

Schmidt, A. (2020). *Systematische Ableitung der Anforderungen an Roboter - Demontagewerkzeuge*.

Seminararbeit. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Scholl, 2023)

Scholl, J. T. (2023). *Entwicklung eines Frameworks zur Ermittlung von Drehmomentwerten für die Demontage von Schraubverbindungen im Remanufacturing*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Steiner, 2021)

Steiner, C. (2021). *Bildverarbeitung zur Anpassung eines Roboterwerkzeugs an einen Schraubentyp*.

Master Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Wai, 2023)

Wai, H. (2023). *Konzeption und Implementierung eines Steuerungssystems für Roboter Greifsysteme*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Wang, 2023)

Wang, H. (2023). *Optimization of Corrosion and Contamination Detection through Implementation of a Run Time*.

Master Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Wiltz, 2020)

Wiltz, J. (2020). *Konzeption und Entwicklung einer Demontagestrategie und eines Demontagewerkzeugs für Elektromotoren*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Zhu, 2023)

Zhu, S. (2023). *Modelling the Transmittable Torque of Different Screw Head Drives*.

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Ahmad Hedayat & Ahmadi Afzadi et al., 2017)

Ahmad Hedayat, A., Ahmadi Afzadi, E. & Iranpour, A. (2017). Prediction of the Bolt Fracture in Shear Using Finite Element Method. *Structures*(12), 188–210.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.09.005>

(Al Assadi & Goes et al., 2023)

Al Assadi, A., Goes, D., Baazouzi, S., Staudacher, M., Malczyk, P., Kraus, W., Nägele, F., Huber, M. F., Fleischer, J., Peuker, U. & Birke, K. P. (2023). Challenges and prospects of automated disassembly of fuel cells for a circular economy. *SSRN Electronic Journal*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200172>

(Al Assadi & Holtz et al., 2022)

Al Assadi, A., Holtz, D., Nägele, F., Nitsche, C., Kraus, W. & Huber, M. F. (2022). Machine learning based screw drive state detection for unfastening screw connections. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 19–32.

<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.07.013>

(Al Assadi & Rosenberg et al., 2022)

Al Assadi, A., Rosenberg, S., Huster, S., Baazouzi, S., Glöser-Chahoud, S. & Schultmann, F. (2022). Field Study and Multimethod Analysis of an EV Battery System Disassembly. *Energies*, 15(15), 5324. <https://doi.org/10.3390/en15155324>

(Alec GmbH, 2022)

Alec GmbH (2022). *First robotised electronic remanufacturing plant*.

<https://www.alec-electronics.de> Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Ansari, 2023)

Ansari, S. (2023). *Building Computer Vision Applications Using Artificial Neural Networks*. Apress. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-9866-4>

(Apley & Seliger et al., 1998)

Apley, D. W., Seliger, G., Voit, L. & Shi, J. (1998). Diagnostics in Disassembly Un-screwing Operations. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 10(2), 111–128. <https://doi.org/10.1023/A:1008089230047>

(Apple Inc., 2016)

Apple Inc. (01.09.2016). *Liam - An Innovation Story* [Pressemitteilung].

[https://www.apple.com/environment/pdf/Liam\\_white\\_paper\\_Sept2016.pdf](https://www.apple.com/environment/pdf/Liam_white_paper_Sept2016.pdf).

(Atha & Jahanshahi, 2018)

Atha, D. J. & Jahanshahi, M. R. (2018). Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection. *Structural Health Monitoring*, 17(5), 1110–1128. <https://doi.org/10.1177/1475921717737051>

(ATI Industrial Automation, 2019)

ATI Industrial Automation (2019). *F/T Sensor: Axia80-M20: Typenbezeichnung*

*Axia80-M20*. [www.ati-ia.com/products/ft/ft\\_models.aspx?id=Axia80-M20](http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Axia80-M20) Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Automotive Parts Remanufacturers Association, 2016)

Automotive Parts Remanufacturers Association (13.09.2016). *Remanufacturing Associations Agree on International Industry Definition: International agreement an important milestone in further development of a growing industry* [Pressemitteilung]. Frankfurt. <https://clepa.eu/mediaroom/remanufacturing-associations-agree-international-industry-definition/>.

(Bailey-Van Kuren, 2002)

Bailey-Van Kuren, M. (2002). Automated Demanufacturing Studies in Detecting and Destroying, Threaded Connections for Processing Electronic Waste. *Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.02CH37273)*, 295–298. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2002.1003283>

(Bailey-Van Kuren, 2006)

Bailey-Van Kuren, M. (2006). Flexible robotic demanufacturing using real time tool path generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22(1), 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2005.01.002>

(Bdiwi & Rashid et al., 2017)

Bdiwi, M., Rashid, A., Pfeifer, M. & Putz, M. (2017). Disassembly of Unknown Models of Electrical Vehicle Motors Using Innovative Human Robot Cooperation. *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, 85-86. <https://doi.org/10.1145/3029798.3038425>

(Bdiwi & Rashid et al., 2016)

Bdiwi, M., Rashid, A. & Putz, M. (2016). Autonomous disassembly of electric vehicle motors based on robot cognition. *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2500–2505. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487404>

(Beck & Neb et al., 2021)

Beck, J., Neb, A. & Barbu, K. (2021). Towards a CAD-based Automated Robot Off-line-Programming Approach for Disassembly. *Procedia CIRP*, 104(104), 1280–1285. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.215>

(Bender & Göhlich, 2020)

Bender, B. & Göhlich, D. (Hrsg.). (2020). *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 2: Anwendungen*. Springer. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59713-2>

(Bigorra, 2020)

Bigorra, E. M. (2020). *Design and Implementation of a Computer Vision System for Robotic Disassembly of Electric Vehicle Battery Pack*. University of Agder, Kristiansand. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/333087>.

(Bilal & Tyapin et al., 2022)

Bilal, M. T., Tyapin, I., Choux, M. M. H. & Hubert Choux, M. M. (2022). Enhancing Object Localization Accuracy by using Multiple Camera Viewpoints for Disassembly Systems. *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IECON49645.2022.9968575>

(Bochkovskiy & Wang et al., 2020)

Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y. & Liao, H.-Y. M. (2020). *YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection*. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.

(BORG Automotive A/S, 2023)

BORG Automotive A/S (2023). *Über die BORG Automotive Gruppe*. <https://borgautomotive-group.com/about-us> Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Borras & Heudorfer et al., 2018)

Borras, J., Heudorfer, R., Rader, S., Kaiser, P. & Asfour, T. (2018). The KIT Swiss Knife Gripper for Disassembly Tasks: A Multi-Functional Gripper for Bimanual Manipulation with a Single Arm. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 4590–4597. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593567>

(Borst & Akkermans, 1997)

Borst, P. & Akkermans, H. (1997). An ontology approach to product disassembly. *Knowledge Acquisition, Modeling And Management*(1319), 33–48. <https://doi.org/10.1007/BFb00267>

(Bosch, 2020)

Bosch (2020). *Bosch eXchange Zeitwertgerechte Reparatur*. <https://www.boschaftermarket.com/de/de/services/programme/bosch-exchange> Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Braunschweig, 2002)

Braunschweig, A. (2002). *Automatisierung der Demontage* [Habilitationsschrift] Technische Universität Ilmenau, Ilmenau.

(Brazier & Prasetxo, 2023)

Brazier, J. P. & Prasetxo, J. (2023). Robotic Solution for the Automation of E-waste Recycling. *JASAE Journal of Applied Science and Advanced Engineering*, 1(1), 11–17. <https://jasae.org/index.php/JASAE/article/view/9>.

(Brogan & DiFilippo et al., 2021)

Brogan, D. P., DiFilippo, N. M., Jouaneh, M. & Jouaneh, M. K. (2021). Deep learning computer vision for robotic disassembly and servicing applications. *Array*, 12, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100094>

(Büker & Drüe et al., 2001)

Büker, U., Drüe, S., Götze, N., Hartmann, G., Kalkreuter, B., Stemmer, R. & Trapp, R. (2001). Vision-based control of an autonomous disassembly station. *Robotics*

*and Autonomous Systems*, 35(3-4), 179–189. [https://doi.org/10.1016/S0921-8890\(01\)00121-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8890(01)00121-X)

(Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (01.11.2016). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II: Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen* [Pressemitteilung]. Berlin. [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/progress\\_ii\\_broschuere\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf).

(Chen & Liu et al., 2023)

Chen, J., Liu, Z., Xu, J., Yang, C., Chu, H. & Cheng, Q. (2023). A Novel Disassembly Strategy of Hexagonal Screws Based on Robot Vision and Robot-Tool Cooperated Motion. *Applied Sciences*, 13(1), 251. <https://doi.org/10.3390/app13010251>

(Chen, 2017)

Chen, W. H. (2017). *Towards a generic and robust system for the robotic disassembly of end-of-life electronics* [Dissertation]  
The University of New South Wales, Kensington.

(Chen & Foo et al., 2020)

Chen, W. H., Foo, G., Kara, S. & Pagnucco, M. (2020). Application of a multi-head tool for robotic disassembly. *Procedia CIRP*, 90(2), 630–635. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.047>

(Chen & Foo et al., 2021)

Chen, W. H., Foo, G., Kara, S. & Pagnucco, M. (2021). Automated generation and execution of disassembly actions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68(2), 102056. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102056>

(Cheng & Jia et al., 2019)

Cheng, X., Jia, Z. & Mason, M. T. (2019). Data-Efficient Process Monitoring and Failure Detection for Robust Robotic Screwdriving. *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 1705–1711. <https://doi.org/10.1109/COASE.2019.8842854>

(Choux & Bigorra et al., 2021)

Choux, M., Bigorra, E. M. & Tyapin, I. (2021). Task Planner for Robotic Disassembly of Electric Vehicle Battery Pack. *Metals*, 11(3), 387.

<https://doi.org/10.3390/met11030387>

(Croccolo & Agostinis et al., 2017)

Croccolo, D., Agostinis, M. de, Fini, S. & Olmi, G. (2017). Tribological properties of bolts depending on different screw coatings and lubrications: An experimental study. *Tribology International*, 107, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.028>

(Croccolo & De Agostinis et al., 2018)

Croccolo, D., De Agostinis, M. de, Fini, S., Olmi, G., Robusto, F., Cavalli, O. & Vincenzi, N. (2018). The Influence of Material, Hardness, Roughness and Surface Treatment on the Frictional Characteristics of the Underhead Contact in Socket-Head Screws. *ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference*, 2018.

<https://doi.org/10.1115/pvp2018-84530>

(Croccolo & De Agostinis et al., 2020)

Croccolo, D., De Agostinis, M. de, Fini, S., Olmi, G., Robusto, F., Paiardini, L. & Gualdi, G. (2020). Experimental Investigation on the Friction Coefficients for Different Materials, Lubrication Conditions and Coatings in Bolted Joints. *ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference*. Vorab-Onlinepublikation.

<https://doi.org/10.1115/pvp2020-21541>

(Cruz-Ramirez & Mae et al., 2008)

Cruz-Ramirez, S. R., Mae, Y., Ishizuka, Y., Takubo, T. & Arai, T. (2008). Detection of screws on metal ceiling structures for dismantling systems. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 155–162.

<https://doi.org/10.3846/isarc.20080626.155>

(Dankert & Dankert, 2013)

Dankert, J. & Dankert, H. (2013). *Technische Mechanik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://rd.springer.com/book/10.1007/978-3-8348-2235-2>.

<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2235-2>

(Deng & Guan et al., 2022)

Deng, Z., Guan, D., Qiao, Y. & Zhuang, C. (2022). Tiny Screw and Screw Hole De-

tection for Automated Maintenance Processes. *Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 847–851.

<https://doi.org/10.1109/ICMA54519.2022.9855990>

(Deutsche Forschungsgemeinschaft, 2022)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (2022). *FSReman - Funktionsmodellierung von Schraubenverbindungen bei ungewissen Produktzuständen für das Remanufacturing: Projektnummer 525034540*. <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/525034540>  
Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Dieterle, 1995)

Dieterle, A. (1995). *Recyclingintegrierte Produktentwicklung* [Dissertation]  
Technische Universität München, München.

(DiFilippo, 2016)

DiFilippo, N. D. (2016). *Framework for the Automated Disassembly of Electronic Waste Using the Soar Cognitive Architecture*  
University of Rhode Island. [https://digitalcommons.uri.edu/oa\\_diss/514](https://digitalcommons.uri.edu/oa_diss/514).

(DiFilippo & Jouaneh, 2018)

DiFilippo, N. M. & Jouaneh, M. K. (2018). A System Combining Force and Vision Sensing for Automated Screw Removal on Laptops. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15(2), 887–895.  
<https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2679720>

(DiFilippo & Jouaneh, 2019)

DiFilippo, N. M. & Jouaneh, M. K. (2019). Using the Soar Cognitive Architecture to Remove Screws From Different Laptop Models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16(2), 767–780.  
<https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2860945>

(DIN 8580)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.12.2022). *Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung* (DIN 8580). Berlin. Beuth Verlag GmbH.  
<https://www.beuth.de/de/norm/din-8580/331759492>.

(DIN 8588)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.08.2013). *Fertigungsverfahren Zerteilen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe* (DIN 8588). Berlin. Beuth Verlag GmbH.



(DIN 267-27)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.10.2023). *Mechanische Verbindungselemente: Teil 27: Schrauben aus Stahl mit klebender Beschichtung, Technische Lieferbedingungen* (DIN 267-27). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 8589-0)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.09.2003). *Fertigungsverfahren Spannen: Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe* (DIN 8589-0). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 8593-0)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.09.2003). *Fertigungsverfahren Fügen: Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe* (DIN 8593-0). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 743-3)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.12.2012). *Tragfähigkeitsberechnungen von Wellen und Achsen: Teil 3: Werkstoff-Festigkeitswerte* (DIN 743-3). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 743-2)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.12.2012). *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen: Teil 2: Formzahlen und Kerbwirkungszahlen* (DIN 743-2). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN ISO 11130)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.06.2018). *Korrosion von Metallen und Legierungen: Wechsellastprüfung in Salzlösung* (DIN EN ISO 11130). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN ISO 4762)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.06.2004). *Zylinderschrauben mit Innensechskant* (DIN EN ISO 4762). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN 10025-2)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.10.2019). *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen: Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle* (DIN EN 10025-2). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 50938)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.01.2018). *Brünieren von Bauteilen aus*

*Eisenwerkstoffen: Anforderungen und Prüfverfahren* (DIN 50938). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 8591)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.09.2003). *Fertigungsverfahren Zerlegen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe* (DIN 8591). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN 20898-7)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.04.1995). *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen: Teil 7: Torsionsversuch und Mindest-Bruchdrehmomente für Schrauben mit Nenndurchmessern 1mm bis 10mm* (DIN EN 20898-7). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 743-1)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.12.2012). *Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen: Teil 1: Grundlagen* (DIN 743-1). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(Doroftei & Cazan et al., 2023)

Doroftei, I., Cazan, S., Burlacu, A. & Chirita, D. (2023). Perspectives on Originally Designed Eco-Friendly Robotic Cell for PCB Dismantling. *Proceedings of SYROM 2022 & ROBOTICS 2022*, 127, 251–260. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25655-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25655-4_26)

(ECLASS e.V., 2023)

ECLASS e.V. (2023). *Enable your global business and digitization*. [www.eclass.eu](http://www.eclass.eu)  
Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Ellen Macarthur foundation, 2015)

Ellen Macarthur foundation (Hrsg.) (2015). *Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*. <https://ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>.

(ElSayed & Kongar et al., 2012)

ElSayed, A., Kongar, E., Gupta, S. M. & Sobh, T. (2012). A Robotic-Driven Disassembly Sequence Generator for End-Of-Life Electronic Products. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 68(1), 43–52. <https://doi.org/10.1007/s10846-012-9667-8>

(European Commission, Directorate-General for Communication, 2019)

European Commission, Directorate-General for Communication (11.12.2019). *Der*

*europäische Grüne Deal* [Pressemitteilung]. Brüssel. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN#document2>.

(Fadeev, 2023)

Fadeev, I. (2023). Protection of threaded connections against corrosion. *E3S Web of Conferences*, 376, 1056. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337601056>

(Festool GmbH, 2022)

Festool GmbH (2022). *Akku-Schlagbohrschrauber QUADRIVE TPC 18/4 I-Basic: Art.-Nr. 575604*. <https://www.festool.de/produkte/aktionen/bohren-und-schrauben/577625---tpc-184-i-basic-set> Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Fleischer & Gerlitz et al., 2021)

Fleischer, J., Gerlitz, E., Rieß, S., Coutandin, S. & Hofmann, J. (2021). Concepts and Requirements for Flexible Disassembly Systems for Drive Train Components of Electric Vehicles. *Procedia CIRP*, 98, 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.154>

(Foo, 2022)

Foo, G. (2022). *Robotic disassembly of waste electrical and electronic equipment* [Dissertation]  
UNSW Sydney, Sydney. <http://hdl.handle.net/1959.4/100866>.  
<https://doi.org/10.26190/UNSWORKS/24573>

(Foo & Kara et al., 2022)

Foo, G., Kara, S. & Pagnucco, M. (2022). Challenges of robotic disassembly in practice. *Procedia CIRP*, 105, 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.085>

(Foo & Kara et al., 2021a)

Foo, G., Kara, S. & Pagnucco, M. (2021). An Ontology-Based Method for Semi-Automatic Disassembly of LCD Monitors and Unexpected Product Types. *International Journal of Automation Technology*, 15(2), 168–181. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0168>

(Foo & Kara et al., 2021b)

Foo, G., Kara, S. & Pagnucco, M. (2021). Screw detection for disassembly of electronic waste using reasoning and re-training of a deep learning model. *Procedia CIRP*, 98(8), 666–671. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.172>

(Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020)

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (2020). xMCF Extended Master Connection File: A standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry. *FAT-Schriftenreihe*(286). <https://www.vda.de/vda/de/aktuelles/publikationen/publication/xmcf---a-standard-for-describing-connections---joints-in-mechanical-structures--version-3.1->.

(Foster, 2022)

Foster, E. C. (2022). *Software Engineering: A Methodical Approach*. Auerbach Publications. <https://doi.org/10.1201/9780367746025>

(Friedrich, 2003)

Friedrich, C. (2003). Drehmomentübertragung zwischen Schraubwerkzeug und Verbindungselement als hochbelastete, temporäre Welle-Nabe-Verbindung. In VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion und Vertrieb (Hrsg.), *VDI-Berichte 1790: Welle-Nabe-Verbindungen. Gestaltung, Fertigung, Anwendungen* (S. 217–229).

(Friedrich, 2019)

Friedrich, C. (2019). *Roboter manipulationsfähigkeiten zur Automatisierung von Instandhaltungsaufgaben* [Dissertation]  
Universität Stuttgart, Stuttgart.

(Friedrich & Lechler et al., 2016)

Friedrich, C., Lechler, A. & Verl, A. (2016). The control architecture RoViDiAsS: A Robotic Visual Disassembly and Assembly System. *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 113–118. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2016.7474735>

(Friedrich & von Arnim et al., 2017)

Friedrich, C., von Arnim, C., Lechler, A. & Verl, A. (2017). Visual Perception for Robot Based Maintenance Automation. *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 388–393.  
<https://doi.org/10.1109/AIM.2017.8014048>

(Gerbers & Mücke et al., 2016)

Gerbers, R., Mücke, M., Dietrich, F. & Dröder, K. (2016). Simplifying Robot Tools by Taking Advantage of Sensor Integration in Human Collaboration Robots. *Procedia CIRP*, 44(1), 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.135>

(Gibbons & Pierce et al., 2018)

Gibbons, T., Pierce, G., Worden, K. & Antoniadou, I. (2018). A Gaussian Mixture Model for Automated Corrosion Detection in Remanufacturing. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-902-7-63>

(Gil & Pomares et al., 2007)

Gil, P., Pomares, J., Diaz Baca, C. S., Candelas Herias, F. & Torres, F. (2007). Flexible multi-sensorial system for automatic disassembly using cooperative robots. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(8), 757–772. <https://doi.org/10.1080/09511920601143169>

(Göhlich & Fay, 2021)

Göhlich, D. & Fay, T.-A. (2021). Arbeiten mit Anforderungen: Requirements Management. In B. Bender & K. Gericke (Hrsg.), *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (S. 211–229). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-57303-7_8)

(Gruber, 1993)

Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), 199–220. <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008>

(Grudzien, 2002)

Grudzien, W. (2002). *Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch eine Life Cycle Unit* [Dissertation]  
Technische Universität Berlin, Berlin. <https://doi.org/10.14279/depositonce-454>

(Gschwendtner, 1996)

Gschwendtner, G. (1996). *Automatisierte Demontage: unter Berücksichtigung von Concurrent Engineering* [Dissertation]  
Technische Universität Wien, Wien. [https://catalogplus.tuwien.at/permalink/f/8j3js/UTW\\_alma2157794750003336](https://catalogplus.tuwien.at/permalink/f/8j3js/UTW_alma2157794750003336).

(Han & Choi et al., 2022)

Han, S., Choi, M.-S., Shin, Y.-W., Jang, G.-R., Lee, D.-H., Cho, J., Park, J.-H. & Bae, J.-H. (2022). Screwdriving Gripper That Mimics Human Two-Handed Assembly Tasks. *Robotics*, 11(18). <https://doi.org/10.3390/robotics11010018>

(Härtwig, 2005)

Härtwig, J.-P. (2005). *Verfahren und Systeme zur Demontage komplexer technischer Gebrauchsgüter* [Dissertation]

Technische Universität Berlin, Berlin.

(Hohm & Müller Hofstede et al., 2000)

Hohm, K., Müller Hofstede, H. & Tolle, H. (2000). Robot Assisted Disassembly of Electronic Devices. *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Vorab-Onlinepublikation.

<https://doi.org/10.1109/IROS.2000.893194>

(Holm & Transeth et al., 2020)

Holm, E., Transeth, A. A., Knudsen, O. O. & Stahl, A. (2020). Classification of corrosion and coating damages on bridge constructions from images using convolutional neural networks. *Proc. SPIE 11433, Twelfth International Conference on Machine Vision (ICMV 2019)*. Vorab-Onlinepublikation.

<https://doi.org/10.1117/12.2557380>

(Huang & Pham et al., 2021)

Huang, J., Pham, D. T., Li, R., Jiang, K., Lyu, D. & Ji, C. (2021). Strategies for Dealing with Problems in Robotised Unscrewing Operations. In S. Ratchev (Hrsg.), *Smart Technologies for Precision Assembly: IPAS 2020, IFIP Advances in Information and Communication Technology* (S. 93–107). Springer International Publishing.

[https://doi.org/10.1007/978-3-030-72632-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72632-4_7)

(Huang & Pham et al., 2020)

Huang, J., Pham, D. T., Li, R., Jiang, K., Qu, M., Wang, Y., Su, S. & Ji, C. (2020). A Screw Unfastening Method for Robotic Disassembly. *Industry 4.0 - Shaping the Future of the Digital World*, 95–100. <https://doi.org/10.1201/9780367823085>

(Huang & Pham et al., 2021)

Huang, J., Pham, D. T., Li, R., Qu, M., Wang, Y., Kerin, M., Su, S., Ji, C., Mahomed, O., Khalil, R., Stockton, D., Xu, W., Liu, Q. & Zhou, Z. (2021). An experimental human-robot collaborative disassembly cell. *Computers & Industrial Engineering*, 155(20), 107189. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107189>

(Hucht, 1997)

Hucht, A. (1997). *Beitrag zur Entwicklung einer flexiblen, robotergestützten Demontagezelle für Bildschirmgeräte* [Dissertation]

Universität Dortmund, Dortmund. <https://katalog.ub.tu-dortmund.de/id/ir01388a:ubd.lobid:990036402220206441>.

(Intel Corporation, 2022)

Intel Corporation (2022). *Intel® RealSense™ D405. See the world up close: Depth Camera D405*. [www.intelrealsense.com/depth-camera-d405/](http://www.intelrealsense.com/depth-camera-d405/) Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(ISO 898-7)

International Organization for Standardization (01.11.1992). *Mechanical Properties of Fasteners: Torsional test and minimum torques for bolts and screws with nominal diameters 1mm to 10 mm* (ISO 898-7). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(IR ROBOT, 2020)

IR ROBOT (2020). *12Lf Servo Series: Art.-Nr. 12Lf-35F-27*. [www.mighty-zap.com/en/12lf-35f-27](http://www.mighty-zap.com/en/12lf-35f-27) Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Jungbluth, 2019)

Jungbluth, J. (2019). *Entwicklung eines intelligenten, robotergestützten Assistenzsystems für die Demontage industrieller Produkte* [Dissertation]  
Universität du Luxembourg. <http://hdl.handle.net/10993/39452>.

(Jungbluth & Gerke et al., 2016)

Jungbluth, J., Gerke, W. & Plapper, P. (2016). Demontage von Elektroantrieben mit Assistenzrobotern zum wirtschaftlichen Recycling. *Tagungsband AALE*, 13, 109–119.

(Kahmeyer, 1995)

Kahmeyer, M. (1995). *Flexible Demontage mit dem Industrieroboter am Beispiel von Fernsprech-Endgeräten* [Dissertation]  
Universität Stuttgart, Berlin, Heidelberg. <http://publica.fraunhofer.de/documents/PX-47799.html>.

(Kalitsios & Lazaridis et al., 2022)

Kalitsios, G., Lazaridis, L., Psaltis, A., Axenopoulos, A. & Daras, P. (2022). Vision-Enhanced System For Human-Robot Disassembly Factory Cells: Introducing A New Screw Dataset, 204–208. <https://doi.org/10.1109/ICRCV55858.2022.9953178>

(Karlsson & Järrhed, 2000)

Karlsson, B. & Järrhed, J.-O. (2000). Recycling of electrical motors by automatic disassembly. *Measurement Science and Technology*, 11(4), 350–357.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/4/303>

(Kay & Farhad et al., 2022)

Kay, I., Farhad, S., Mahajan, A., Esmaeeli, R. & Hashemi, S. R. (2022). Robotic Disassembly of Electric Vehicles' Battery Modules for Recycling. *Energies*, 15(13), 4856.

<https://doi.org/10.3390/en15134856>

(Keil, 2004)

Keil, T. (2004). *Informationstechnische Integration hybrider Demontagesysteme* [Dissertation]

Technische Universität Berlin, Berlin. [https://tu-berlin.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/1ljtibe/TUB\\_ALMA\\_DS21539741520002884](https://tu-berlin.hosted.exlibrisgroup.com/permalink/f/1ljtibe/TUB_ALMA_DS21539741520002884).

(Kernbaum & Franke et al., 2009)

Kernbaum, S., Franke, C. & Seliger, G. (2009). Flat screen monitor disassembly and testing for remanufacturing. *Int. J. Sustainable Manufacturing (International Journal of Sustainable Manufacturing)*, 1(3), 347-360.

(Kistler Instrumente AG, 2022)

Kistler Instrumente AG (2022). *Drehmomentmesswelle: Typenbezeichnung 4501A020HA*. [www.kistler.com/DE/de/p/drehmomentmesswelle-4501a/000000000018026214](http://www.kistler.com/DE/de/p/drehmomentmesswelle-4501a/000000000018026214) Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Klas & Hundhausen et al., 2021)

Klas, C., Hundhausen, F., Gao, J., Dreher, C. R. G., Reither, S., Zhou, Y. & Asfour, T. (2021). The KIT Gripper: A Multi-Functional Gripper for Disassembly Tasks. *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.

(Klein & Wurster et al., 2021)

Klein, J.-F., Wurster, M., Stricker, N., Lanza, G. & Furmans, K. (2021). Towards Ontology-based Autonomous Intralogistics for Agile Remanufacturing Production Systems. *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1–8.

<https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613486>



(Knorr-Bremse, 2021)

Knorr-Bremse (2021). *Genuine Remanufacturing im Detail*. [www.knorr-bremse.com/remancaliper](http://www.knorr-bremse.com/remancaliper) Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Kopacek & Kopacek, 2003)

Kopacek, B. & Kopacek, P. (2003). Semi-automatisierte Demontage für Elektronikschrottreycling. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 120(5), 149–153. <https://doi.org/10.1007/BF03053933>

(Kopacek & Kopacek, 2003)

Kopacek, P. & Kopacek, B. (2003). Robotized Disassembly of Mobile Phones. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(23), 103–105. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37669-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37669-3)

(Kouvaritakis & Cannon, 2016)

Kouvaritakis, B. & Cannon, M. (Hrsg.). (2016). *Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic*. Springer International Publishing. Cham. <http://www.springer.com/series/4045>. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24853-0>

(Kraemer, 2019)

Kraemer, F. (2019). *Bewertung von Einflussfaktoren auf das Montage- und Ermüdungsverhalten gewindefurchender und metrischer Schraubenverbindungen* [Dissertation]

Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. <https://doi.org/10.25534/tuprints-00011315>

(Kreis, 2020)

Kreis, A. (2020). *Tailored Data Exchange Processes for Automotive Body Development* [Dissertation]

Graz University of Technology, Graz.

(Krüger & Lehr et al., 2019)

Krüger, J., Lehr, J., Schlüter, M. & Bischoff, N. (2019). Deep learning for part identification based on inherent features. *CIRP Annals*, 68(1), 9–12.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.095>

(KS Tools Werkzeuge und Maschinen GmbH, o.D.)

KS Tools Werkzeuge und Maschinen GmbH (o.D.). *Digitaler Drehmomentadapter mit Winkelmesser*. <https://www.kstools.com/produkte/lkw-spezialwerkzeuge/motorzylinderkopf-motorblock/werkzeuge-fuer-zylinderblock-verschraubungen/digitaler->

drehmomentadapter-mit-winkelmesser?number=516.1194 Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Küthe, 2015)

Küthe, D. (2015). *Robotergestütztes Lösen von Schraubverbindungen mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems* [Masterarbeit]  
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

(Laili & Wang et al., 2022)

Laili, Y., Wang, Y [Yongjing], Fang, Y., Duc Truong, P. & Pham, D. T. (Hrsg.). (2022). *Optimisation of Robotic Disassembly for Remanufacturing*. Springer International Publishing. Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81799-2>

(Lambert & Gupta, 2005)

Lambert, A. J. & Gupta, S. M. (2005). *Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse and Recycling. The St. Lucie Press series on resource management*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203487174>

(Lanza & Asfour et al., 2022)

Lanza, G., Asfour, T., Beyerer, J., Deml, B., Fleischer, J., Heizmann, M., Furmans, K., Hofmann, C., Cebulla, A., Dreher, C., Kaiser, J.-P., Klein, J.-F., Leven, F., Mangold, S., Mitschke, N., Stricker, N., Pfrommer, J., Wu, C., Wurster, M. & Zaremski, M. (2022). Agiles Produktionssystem mittels lernender Roboter bei ungewissen Produktzuständen am Beispiel der Anlasser-Demontage. *at - Automatisierungstechnik*, 70(6), 504–516. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0158>

(Li, 2016)

Li, J. (2016). *Robotic disassembly of electronic components to support end-of-life recycling of electric vehicles* [Dissertation]

Loughborough University, Loughborough. [https://repository.lboro.ac.uk/articles/Robotic\\_disassembly\\_of\\_electronic\\_components\\_to\\_support\\_end\\_of\\_life\\_recycling\\_of\\_electric\\_vehicles/9533096](https://repository.lboro.ac.uk/articles/Robotic_disassembly_of_electronic_components_to_support_end_of_life_recycling_of_electric_vehicles/9533096).

(Li & Zhang et al., 2022)

Li, J., Zhang, X. & Feng, P. (2022). Detection Method of End-of-Life Mobile Phone Components Based on Image Processing. *Sustainability*, 14(19), 12915. <https://doi.org/10.3390/su141912915>

(Li & Ji et al., 2020)

Li, R., Ji, C., Liu, Q., Zhou, Z., Pham, D. T., Huang, J., Tan, Y., Qu, M., Wang, Y.,

Kerin, M., Jiang, K. & Su, S. (2020). Unfastening of Hexagonal Headed Screws by a Collaborative Robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(3), 1455–1468. <https://doi.org/10.1109/TASE.2019.2958712>

(Li & Li et al., 2021)

Li, X., Li, M., Wu, Y., Zhou, D., Liu, T., Hao, F., Yue, J. & Ma, Q. (2021). Accurate screw detection method based on faster R-CNN and rotation edge similarity for automatic screw disassembly. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 34(11), 1177–1195. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1963476>

(Liu & Tan et al., 2018)

Liu, L., Tan, E., Zhen, Y., Yin, X. J. & Cai, Z. Q. (2018). AI-facilitated coating corrosion assessment system for productivity enhancement. *Proceedings of the 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2018)*, 606–610. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2018.8397787>

(Liu & Deng et al., 2023)

Liu, Q., Deng, W., Pham, D. T., Hu, J., Wang, Y. & Zhou, Z. (2023). A Two-Stage Screw Detection Framework for Automatic Disassembly Using a Reflection Feature Regression Model. *Micromachines*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/mi14050946>

(Mangold & Gerlitz et al., 2023)

Mangold, S., Gerlitz, E., Zimprich, S., Friedmann, M., Matthiesen, S. & Fleischer, J. (2023). Systematic quantitative investigation of the unscrewing process with regard to breakaway torque. *Journal of Remanufacturing*, 13(1), 53–66. <https://doi.org/10.1007/s13243-022-00120-x>

(Mangold & Mata et al., 2023)

Mangold, S., Mata, S., Barrios, A., Friedmann, M. & Fleischer, J. (2023). The Control Architecture KaReSA: A Learning Disassembly System. *CARV 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 562–569. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-34821-1\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-031-34821-1_61)

(Mangold & Steiner et al., 2022)

Mangold, S., Steiner, C., Friedmann, M. & Fleischer, J. (2022). Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 105, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.001>

(Meng & Xu et al., 2022)

Meng, K., Xu, G., Peng, X., Youcef-Toumi, K. & Li, J. (2022). Intelligent disassembly of electric vehicle batteries: a forward looking overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106207. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106207>

(Mironov & Altamirano et al., 2018)

Mironov, D., Altamirano, M., Zabihifar, H., Liviniuk, A., Liviniuk, V. & Tsetserukou, D. (2018). Haptics of Screwing and Unscrewing for Its Application in Smart Factories for Disassembly. *EuroHaptics 2018*, 11, 428–439. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93399-3\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93399-3_37)

(Nave, 2003)

Nave, M. (2003). *Beitrag zur automatisierten Demontage durch Optimierung des Trennprozesses von Schraubenverbindungen* [Dissertation] Universität Dortmund, Dortmund. <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/2801/1/NaveSeitenUNT.pdf>. <https://doi.org/10.17877/DE290R-14924>

(Papamarkou & Guy et al., 2021)

Papamarkou, T., Guy, H., Kroencke, B., Miller, J., Robinette, P., Schultz, D., Hinkle, J., Pullum, L., Schuman, C., Renshaw, J. & Chatzidakis, S. (2021). Automated detection of corrosion in used nuclear fuel dry storage canisters using residual neural networks. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2), 657–665. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.020>

(Parker & Riley et al., 2015)

Parker, D., Riley, K., Robinson, S., Symington, H., Tewson, J., Ramkumar, S., Peck, D. & Deegan, K. (01.10.2015). *Remanufacturing Market Study: For Horizon 2020*. Grant agreement No 645984 Oakdene Hollins. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a4bc7898&appId=PPGMS>.

(Parker & Robinson, 2015)

Parker, D. & Robinson, S. (01.10.2015). *Remanufacturing Future Market Report: For Horizon 2020*. Grant agreement No 645984 Oakdene Hollins. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5a55148a1&appId=PPGMS>.

(Peeters & Sterkens et al., 2021)

Peeters, J., Sterkens, W., Bracquene, E., Hans, R. & Dewulf, W. (2021). Software Applications Adopting Computer Vision for Repair, Reuse and Recycling. In N. F. Nissen & M. Jaeger-Ergben (Hrsg.), *PLATE – Product Lifetimes and the Environment* (S. 651–656). Universitätsverlag der TU Berlin.

(Petricca & Moss et al., 2016)

Petricca, L., Moss, T., Figueroa, G. & Broen, S. (2016). Corrosion Detection Using A.I : A Comparison of Standard Computer Vision Techniques and Deep Learning Model. *COMPUTER SCIENCE & INFORMATION TECHNOLOGY (CS & IT Conference Proceedings)*, 91–99. <https://doi.org/10.5121/csit.2016.60608>

(Pfrommer & Klein et al., 2022)

Pfrommer, J., Klein, J.-F., Wurster, M., Rapp, S., Grauberger, P., Lanza, G., Albers, A., Matthiesen, S. & Beyerer, J. (2022). An Ontology for Remanufacturing Systems. *at - Automatisierungstechnik*, 70(6), 534–541. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0156>

(Pham, 2017)

Pham, D. (2017, 5. Juni). *Robotic disassembly and autonomous remanufacturing* RECODE Network. RECODE International Symposium - Future Visions of Manufacturing: Customisation, Redistribution and Technology, London. [http://auto-reman.altervista.org/Event/EPSRC\\_Robotic\\_Disassembly\\_\\_International\\_RECODE\\_Network\\_Symposium\\_London\\_June\\_2017\\_v2.pdf](http://auto-reman.altervista.org/Event/EPSRC_Robotic_Disassembly__International_RECODE_Network_Symposium_London_June_2017_v2.pdf).

(PickNik Robotics, o.D.)

PickNik Robotics (o.D.). *Moving robots into the future*. <https://moveit.ros.org> Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Plociennik & Pourjafarian et al., 2022)

Plociennik, C., Pourjafarian, M., Nazeri, A., Windholz, W., Knetsch, S., Rickert, J., Citroth, A., do Carmo Precci Lopes, A., Hagedorn, T., Vogelgesang, M., Benner, W., Gassmann, A., Bergweiler, S., Ruskowski, M., Schebek, L. & Weidenkaff, A. (2022). Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy. *Procedia CIRP*, 105, 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.021>

(Poschmann, 2021)

Poschmann, H. (2021). *Konzeption und Entwicklung eines Robot Cognition Processors für adaptive Demontageanwendungen* [Dissertation]

TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld. [https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal\\_mods\\_00001862](https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/receive/clausthal_mods_00001862).

(Poschmann & Brüggemann et al., 2020a)

Poschmann, H., Brüggemann, H. & Goldmann, D. (2020). Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation. *Chemie Ingenieur Technik*, 92(4), 341–359. <https://doi.org/10.1002/cite.201900107>

(Poschmann & Brüggemann et al., 2020b)

Poschmann, H., Brüggemann, H. & Goldmann, D. (2020). Robotergestützte Demontage als Treiber der Digitalisierung im Recycling der Zukunft. *Recycling und Sekundärrohstoffe*, 13, 570–584.

(Priyono & Ijomah et al., 2016)

Priyono, A., Ijomah, W., Bititci, U. & Ijomah, W. (2016). Disassembly for Remanufacturing: A Systematic Literature Review, New Model Development and Future Research Needs. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(4), 899–932. <https://doi.org/10.3926/jiem.2053>

(Rahman & Wu et al., 2021)

Rahman, A., Wu, Z. Y. & Kalfarisi, R. (2021). Semantic Deep Learning Integrated with RGB Feature-Based Rule Optimization for Facility Surface Corrosion Detection and Evaluation. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 35(6), Artikel 04021018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000982](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000982)

(Rebafka, 2003)

Rebafka, U. (2003). *Beitrag zur Entwicklung modularer Demontagewerkzeuge* [Dissertation]

Technische Universität Berlin, Berlin.

(Redmon & Divvala et al., 2016)

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. & Farhadi, A. (2016). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection*. <https://arxiv.org/abs/1506.02640v1>.

(Rieß & Wiedemann et al., 2022)

Rieß, S., Wiedemann, J., Coutandin, S. & Fleischer, J. (2022). Secure Clamping of Parts for Disassembly for Remanufacturing. *Annals of Scientific Society for Assembly, Handling and Industrial Robotics 2021*, 79–87. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74032-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74032-0_7)

(Roth, 1996)

Roth, K. (1996). *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Band 3: Verbindungen und Verschlüsse Lösungsfindung*. Springer Berlin Heidelberg.

(Rupprecht, 1998)

Rupprecht, R. (1998). *Flexibel automatisierte Demontage von Fahrzeugdächern* [Dissertation]

Universität Stuttgart, Stuttgart. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-47917-5>. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-47917-5>

(Sawanishi & Torihara et al., 2015)

Sawanishi, H., Torihara, K. & Mishima, N. (2015). A Study on Disassemblability and Feasibility of Component Reuse of Mobile Phones. *Procedia CIRP*, 26, 740–745.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.090>

(Schlüter & Lickert et al., 2021)

Schlüter, M., Lickert, H., Schweitzer, K., Bilge, P., Briese, C., Dietrich, F. & Krüger, J. (2021). AI-enhanced Identification, Inspection and Sorting for Reverse Logistics in Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 98, 300–305. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.107>

(Schmolt, 1992)

Schmolt, B. (1992). Autonomous Robotic Disassembly in the Blocks World. *The International Journal of Robotics Research*, 11(5), 437–459.

(Scholz-Reiter & Scharke et al., 1999)

Scholz-Reiter, B., Scharke, H. & Hucht, A. (1999). Flexible robot-based disassembly cell for obsolete TV-sets and monitors. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*(15), 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(99\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(99)00022-8)

(SCHUNK SE & Co. KG, 2023)

SCHUNK SE & Co. KG (2023). *Elektrischer 2-Finger-Parallelgreifer mit leichtgängiger, wälzgeführter Grundbackenführung EGP 40-N-N-IOL: Ident.-Nr. 1372735*.

[www.schunk.com/de/de/greiftechnik/parallelgreifer/egp/egp-40-n-n-iol/p/0000000000001372735](http://www.schunk.com/de/de/greiftechnik/parallelgreifer/egp/egp-40-n-n-iol/p/0000000000001372735) Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Seelig & Birkenfeld et al., 2019)

Seelig, J. H., Birkenfeld, S., Keich, O. & Zeller, T. (2019). Digitalisierung in der Kreislaufwirtschaft am Beispiel der automatisierten Demontage für Cascade Use Anwendungen und Recycling. In S. Thiel, O. Holm, E. Thomé-Kozmiansky, D.

Goldmann & B. Friedrich (Hrsg.), *Recycling und Rohstoffe* (S. 349–362). Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR12/2019\\_rur\\_349-362\\_seelig.pdf](https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR12/2019_rur_349-362_seelig.pdf).

(Seliger, 2003)

Seliger, G [Günther] (Hrsg.) (2003). *Proceedings Colloquium e-ecological Manufacturing*. uni-edition GmbH.

(Seliger & Uhlmann et al., 2000)

Seliger, G., Uhlmann, E., Keil, T. & Härtwig, J.-P. (2000). Realisierung eines Pilot Demontagesystems. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*(7), 20-24 (Sonderbeilage Demontage).

(Shibata & Tanie, 1994)

Shibata, T. & Tanie, K. (1994). Ecologically Conscious Automated Disassembly System. *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, 1980–1985. <https://doi.org/10.1109/IROS.1994.407592>

(Sprenger & Klein et al., 2021)

Sprenger, K., Klein, J.-F., Wurster, M., Stricker, N. & Lanza, G. (2021). Industrie 4.0 im Remanufacturing. *Industrie 4.0 Management*, 2021(4), 37–40. [https://doi.org/10.30844/I40M\\_21-4\\_S37-40](https://doi.org/10.30844/I40M_21-4_S37-40)

(Stenzel, 2001)

Stenzel, A. (2001). *Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage* [Dissertation] Technische Universität Berlin, Berlin. [http://webdoc.sub.gwdg.de/e-book/diss/2003/tu-berlin/diss/2001/stenzel\\_alexander.pdf](http://webdoc.sub.gwdg.de/e-book/diss/2003/tu-berlin/diss/2001/stenzel_alexander.pdf).

(Thomala, 1984)

Thomala, W. (1984). Beitrag zur Berechnung der Haltbarkeit von Schraubenköpfen mit Kraft-Innenangriff. *VDI-Z Integrierte Produktion*, 126(9), 315–321.

(Thomala & Kloos, 2007)

Thomala, W. & Kloos, K.-H. (Hrsg.). (2007). *Schraubenverbindungen: Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung*. Springer Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68470-1>

(Tolio & Bernard et al., 2017)

Tolio, T., Bernard, A., Colledani, M., Kara, S., Seliger, G., Duflou, J., Battaia, O. &



Takata, S. (2017). Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems. *CIRP Annals*, 66(2), 585–609.

<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.001>

(Torres & Gil et al., 2004)

Torres, F., Gil, P., Puente, S. T., Pomares, J. & Aracil, R. (2004). Automatic PC disassembly for component recovery. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23(23), 39–46. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1590-5>

(Torres & Puente et al., 2009)

Torres, F., Puente, S. & Díaz, C. (2009). Automatic cooperative disassembly robotic system: Task planner to distribute tasks among robots. *Control Engineering Practice*, 17(1), 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2008.05.013>

(Tritsch, 1996)

Tritsch, C. (1996). *Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse* [Dissertation]

Universität Karlsruhe, Karlsruhe.

(Tu & Qin et al., 2017)

Tu, Z., Qin, Q., Jianfang, D. & Dongdong, Z. (2017). Design of platform for removing screws from LCD display shields. *Proc. SPIE*. Vorab-Onlinepublikation.

<https://doi.org/10.1117/12.2287626>

(Tuominen & Autere et al., 1995)

Tuominen, J., Autere, A., Berger, U. & Meier, I. R. (1995). Autonomous Robot Based Disassembly of Automotive Components. *Conf. Integration in Manufacturing*, 341–352.

(Tzafestas & Anthopoulos et al., 1997)

Tzafestas, S. G., Anthopoulos, Y., Katevas, N. & Spyropoulou, E. (1997). Architecture and implementation of an autonomous car-disassembly system. *Systems Analysis Modelling Simulation*(29), 129–149. <https://www.semanticscholar.org/paper/Architecture-and-implementation-of-an-autonomous-Tzafestas-Anthopoulos/f4235585de21fd42f4fcc19801dce4611703dcdc>.

(Uchiyama & Fujisawa et al., 1999)

Uchiyama, Y., Fujisawa, R., Oda, Y. & Hirasawa, E. (1999). Air conditioner and

Washing Machine Primary Disassembly Process // Air conditioner and washing machine primary disassembly process, 258–262. <https://doi.org/10.1109/ECO-DIM.1999.747619>

(Universal Robots A/S, 2019)

Universal Robots A/S (2019). *Real-Time Data Exchange (RTDE) Guide*. <https://www.universal-robots.com/articles/ur/interface-communication/real-time-data-exchange-rtde-guide/> Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Vanegas & Peeters et al., 2018)

Vanegas, P., Peeters, J. R., Cattrysse, D., Tecchio, P., Ardente, F., Mathieux, F., Dewulf, W. & Duflou, J. R. (2018). Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. *Resources, conservation, and recycling*, 135, 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.022>

(Vanegas & Peeters et al., 2016)

Vanegas, P., Peeters, J. R., Cattrysse, D. G., Duflou, J., Tecchio, P., Mathieux, F. & Ardente, F. (2016, May). *Study for a method to assess the ease of disassembly of electrical and electronic equipment: Method development and application in a flat panel display case study* (JRC technical reports JRC101479). Luxembourg. <https://doi.org/10.2788/130925>

(VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2017)

VDI Zentrum Ressourceneffizienz (01.08.2017). *Ressourceneffizienz durch Remanufacturing – Industrielle Aufarbeitung von Altteilen* [Pressemitteilung]. Berlin. [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/kurzanalysen/VDI\\_ZRE\\_Kurzanalyse\\_18\\_Remanufacturing\\_bf.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/kurzanalysen/VDI_ZRE_Kurzanalyse_18_Remanufacturing_bf.pdf).

(VDA, 2020)

Verband der Automobilindustrie e.V. (2020). *xMCF - A Standard for Describing Connections & Joints in Mechanical Structures (Version 3.1)*. <https://www.vda.de/de/aktuelles/publikationen/publication/xmcf---a-standard-for-describing-connections---joints-in-mechanical-structures--version-3.1-> Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau, 2012)

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Hrsg.). (2012). *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen: FKM-Richtlinie*. VDMA Verlag GmbH. Frankfurt am Main.

(VDI 2222 Blatt 1)

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (01.06.1997). *Konstruktionsmethodik: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien* (VDI 2222 Blatt 1). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(VDI 2860)

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (01.05.1990). *Montage- und Handhabungstechniken: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole* (VDI 2860). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(VDI 2221 Blatt 1)

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (01.11.2019). *Entwicklung technischer Produkte und Systeme: Modell der Produktentwicklung* (VDI 2221 Blatt 1). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(VDI 2243)

Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (01.07.2002). *Recyclingorientierte Produktentwicklung* (VDI 2243). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(Vongbunyong & Chen, 2015)

Vongbunyong, S. & Chen, W. H. (Hrsg.). (2015). *Sustainable production, life cycle engineering and management. Disassembly automation: Automated systems with cognitive abilities*. Springer. Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15183-0>

(Vongbunyong & Kara et al., 2012)

Vongbunyong, S., Kara, S. & Pagnucco, M. (2012). A Framework for Using Cognitive Robotics in Disassembly Automation. In D. A. Dornfeld & B. S. Linke (Hrsg.), *Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23 - 25, 2012* (S. 173–178). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5_30)

(Vongbunyong & Kara et al., 2013a)

Vongbunyong, S., Kara, S. & Pagnucco, M. (2013). Application of cognitive robotics in disassembly of products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62, 31–34. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.037>

(Vongbunyong & Kara et al., 2015)

Vongbunyong, S., Kara, S. & Pagnucco, M. (2015). Learning and revision in cognitive robotics disassembly automation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34(16), 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.11.003>

(Vongbunyong & Kara et al., 2013b)

Vongbunyong, S., Kara, S. & Pagnucco, M. (2013). Basic behaviour control of the vision-based cognitive robotic disassembly automation. *Assembly Automation*, 33(1), 38–56. <https://doi.org/10.1108/01445151311294694>

(Vorobel & Ivasenko et al., 2021)

Vorobel, R., Ivasenko, I., Berehulyak, O. & Mandzii, T. (2021). Segmentation of rust defects on painted steel surfaces by intelligent image analysis. *Automation in Construction*, 123, 103515. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103515>

(Wang & Liao et al., 2019)

Wang, C.-Y., Liao, H.-Y. M., Yeh, I.-H., Wu, Y.-H., Chen, P.-Y. & Hsieh, J.-W. (2019). *CSPNet: A New Backbone that can Enhance Learning Capability of CNN*. <https://arxiv.org/abs/1911.11929> Zuletzt geprüft am 29.08.2023.

(Wang, 2017)

Wang, S. (2017). Application of industrial robots in automatic disassembly line of waste LCD displays. *Proc. SPIE*(10605), 36. <https://doi.org/10.1117/12.2287583>

(WEBER Schraubautomaten GmbH, 2022)

WEBER Schraubautomaten GmbH (2022). *Schrauber für Leichtbauroboter MRK / LBR, Eindrehwerkzeug SEV-P: Art.-Nr. C05418*. [www.weber-online.com/stationaerschrauber/stationaerschrauber-sev-p](http://www.weber-online.com/stationaerschrauber/stationaerschrauber-sev-p) Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Wegener, 2015)

Wegener, K. (2015). *Mensch-Roboter-Kooperation zur Demontage von Traktionsbatterien* [Dissertation]

Technische Universität Braunschweig, Braunschweig. <https://katalog.ub.tu-braunschweig.de/vufind/Record/837646480>.

(Wegener & Chen et al., 2015)

Wegener, K., Chen, W. H., Dietrich, F., Dröder, K. & Kara, S. (2015). Robot Assisted Disassembly for the Recycling of Electric Vehicle Batteries. *Procedia CIRP*, 29, 716–721. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.051>

(Weigl, 1997)

Weigl, A. (1997). *Exemplarische Untersuchungen zur flexiblen automatisierten Demontage elektronischer Geräte mit Industrierobotern* [Dissertation]

Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt.

(Wilde & Wanielik et al., 2022)

Wilde, A.-S., Wanielik, F., Rolinck, M., Mennenga, M., Abraham, T., Cerdas, F. & Herrmann, C. (2022). Ontology-based approach to support life cycle engineering: Development of a data and knowledge structure. *Procedia CIRP*, 105, 398–403.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.066>

(Wittel & Jannasch et al., 2019)

Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J. & Spura, C. (Hrsg.). (2019). *Roloff/Matek Maschinenelemente*. Springer Fachmedien Wiesbaden. Wiesbaden.

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26280-8>

(Wu & Zhou et al., 2022)

Wu, C., Zhou, K., Kaiser, J.-P., Mitschke, N., Klein, J.-F., Pfrommer, J., Beyerer, J., Lanza, G., Heizmann, M. & Furmans, K. (2022). MotorFactory: A Blender Add-on for Large Dataset Generation of Small Electric Motors. *Procedia CIRP*, 106, 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.168>

(Wurster & Häfner et al., 2021)

Wurster, M., Häfner, B., Gauder, D., Stricker, N. & Lanza, G. (2021). Fluid Automation — A Definition and an Application in Remanufacturing Production Systems. *Procedia CIRP*, 97, 508–513. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.267>

(Yildiz & Brinker et al., 2020)

Yildiz, E., Brinker, T., Renaudo, E., Hollenstein, J., Haller-Seeber, S., Piater, J. & Wörgötter, F. (2020). A Visual Intelligence Scheme for Hard Drive Disassembly in Automated Recycling Routines. *Proceedings of the International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems (ROBOVIS)*, 2020(1), 17–27. <https://doi.org/10.5220/0010016000170027>

(Yildiz & Renaudo et al., 2022)

Yildiz, E., Renaudo, E., Hollenstein, J., Piater, J. & Wörgötter, F. (2022). An Extended Visual Intelligence Scheme for Disassembly in Automated Recycling Routines. In P. Galambos, E. Kayacan & K. Madani (Hrsg.), *Communications in Computer and Information Science: Bd. 1667. Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems: First International Conference, ROBOVIS 2020, Virtual Event November 4–6,*

2020, and Second International Conference ROBOVIS 2021, Virtual Event, October 27–28, 2021 Revised Selected Papers (S. 25–50). Springer Nature Switzerland.

<https://doi.org/10.1007/978-3-031-19650-82>

(Yildiz & Wörgötter, 2020)

Yildiz, E. & Wörgötter, F. (2020). DCNN-based Screw Classification in Automated Disassembly Processes. *Proceedings of the International Conference on Robotics, Computer Vision and Intelligent Systems (ROBOVIS)*(1), 61–68.

<https://doi.org/10.5220/0009979900610068>

(Yildiz & Wörgötter, 2019)

Yildiz, E. & Wörgötter, F. (2019). DCNN-Based Screw Detection for Automated Disassembly Processes, 187–192. <https://doi.org/10.1109/SITIS.2019.00040>

(Yin & Xiao et al., 2022)

Yin, H., Xiao, J., Wang, G. & Wang, G. (2022). Human-Robot Collaboration Re-Manufacturing for Uncertain Disassembly in Retired Battery Recycling, 595–598.

<https://doi.org/10.1109/WCMEIM56910.2022.10021388>

(Zaremski & Deml, 2020)

Zaremski, M. & Deml, B. (2020). Analyse von Augen- und Blickbewegungen zur Beschreibung von Handlungswissen in der manuellen Demontage. *Bericht zum 66. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 16. – 18. März 2020*.

(Zhang & Zhang et al., 2023)

Zhang, H., Zhang, Y., Wang, W., Zhang, S., Li, H. & Chen, M. (2023). A novel knowledge-driven flexible human–robot hybrid disassembly line and its key technologies for electric vehicle batteries. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 338–353. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.04.005>

(Zhou & Engelen et al., 2022)

Zhou, C., Engelen, B., Zaplana, I. & Peeters, J. (2022). Design of a robotic system for battery dismantling from tablets. *Procedia CIRP*, 105, 273–277.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.045>

(Zhu & Roy, 2015)

Zhu, B. & Roy, U. (2015). Ontology-based disassembly information system for enhancing disassembly planning and design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(9-12), 1595–1608. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6704-8>

(Zorn & Ionescu et al., 2022)

Zorn, M., Ionescu, C., Klohs, D., Zähl, K., Kisseler, N., Daldrup, A., Hams, S., Zheng, Y., Offermanns, C., Flamme, S., Henke, C., Kampker, A. & Friedrich, B. (2022). An Approach for Automated Disassembly of Lithium-Ion Battery Packs and High-Quality Recycling Using Computer Vision, Labeling, and Material Characterization. *Recycling*, 7(4), 48. <https://doi.org/10.3390/recycling7040048>

(Zussman & Zhou, 2000)

Zussman, E. & Zhou, M. C. (2000). Design and implementation of an adaptive process planner for disassembly processes. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(2), 171–179. <https://doi.org/10.1109/70.843173>

(Zwicky, 1966)

Zwicky, F. (1966). *Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild*. Droemer Knaur.





## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Geschlossener Lebenszyklus (eigene Darstellung in Anlehnung an (Parker et al., 2015))	1
Abbildung 1-2: Prozesskette des Remanufacturing (eigene Darstellung in Anlehnung an (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2017))	2
Abbildung 2-1: Demontagearten am Beispiel des Entschraubens (eigene Darstellung in Anlehnung an (Härtwig, 2005))	11
Abbildung 2-2: Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubverbindungen (eigene Darstellung in Anlehnung an (Kahmeyer, 1995; Tritsch, 1996))	12
Abbildung 2-3: Pilot-Demontagezelle der Demontagefabrik (Stenzel, 2001, S. 90)	15
Abbildung 2-4: Demontagezelle der University of New South Wales (Foo et al., 2021a)	16
Abbildung 2-5: Der KIT-Greifer (Klas et al., 2021)	17
Abbildung 2-6: Demontgearbeitsplatz nach (Jungbluth, 2019)	18
Abbildung 2-7: Versuchsaufbau am Fraunhofer IPA	19
Abbildung 2-8: YOLO v5 Architektur (eigene Darstellung in Anlehnung an (Bochkovskiy et al., 2020))	26
Abbildung 2-9: Modellierungsansätze im xMCF-Format (eigene Darstellung in Anlehnung an (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020))	33
Abbildung 2-10: Zusammenfassung des Standes von Forschung und Technik	39
Abbildung 2-11: Aktuelle Defizite der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen und Lösungsansätze	40
Abbildung 3-1: Ansatz zur Zielerreichung	43
Abbildung 4-1: Drehmoment-Zeitverlauf und Spindeldrehzahl-Zeitverlauf bei der Schraubendemontage (eigene Darstellung in Anlehnung an (Apley et al., 1998))	46
Abbildung 4-2: Drehmomentfenster der automatisierten Demontage	48

---

Abbildung 4-3: Ansatz zur Bewertung der Lösbarkeit von Schraubverbindungen	49
Abbildung 4-4: Kräfte am Flachgewinde nach (Wittel et al., 2019, S. 268)	51
Abbildung 4-5 : Skizze der relevanten Größen für das Reibungsmoment an der Auflagefläche	52
Abbildung 4-6: Losdrehmoment einer M6 10.9 Zylinderkopf-Einsteckschraube nach DIN EN ISO 4762 in Abhängigkeit der um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft und der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche	54
Abbildung 4-7: Effektdiagramm für die erste Untersuchung, bezogen auf ein 95 %-Konfidenzintervall	56
Abbildung 4-8: Effektdiagramm der zweiten Untersuchung	58
Abbildung 4-9: Effektdiagramm zu Untersuchung 3	59
Abbildung 4-10: Differenzdrehmoment in Abhängigkeit der Versuchszeit in einer Wechsellastprüfung	62
Abbildung 4-11: Schraubenkopfauflage (a) und Gewinde (b) im Detail	63
Abbildung 4-12: Zusammenhang zwischen dem relativen Korrosionsgrad und der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche	67
Abbildung 4-13: Versagensarten von Schraubverbindungen bei der Demontage	69
Abbildung 4-14: Minimalbeispiel für eine <connection_group> mit angepassten Parametern	76
Abbildung 4-15: Verbesserung der Regression mit zunehmender Anzahl an Demontagevorgängen	79
Abbildung 4-16: Validierung Modell Losdrehmoment	80
Abbildung 4-17: Ergebnisse zum Bruch infolge einer Torsionsbeanspruchung	82
Abbildung 4-18: Drehmomentwerte für das Versagensmodell Flankenscheren mit $k_{bit} = 1$ und $k_{ph} = 1$	84

Abbildung 4-19: Drehmomente für das Flankenscheren unter Berücksichtigung der Spaltmaße mit $k_{bit} \neq 1$ und $k_{ph} = 1$	85
Abbildung 4-20: Vergleich Querschnittsscheren und Schraubenbruch	86
Abbildung 5-1: Betrachtete Cores	91
Abbildung 5-2: Systemkonzeption in Teilmodulen	94
Abbildung 5-3: Symbolische Darstellung von Fertigungsschritten (eigene Darstellung in Anlehnung an (Härtwig, 2005, S. 99))	95
Abbildung 5-4: Funktionsumfang von Modul 1	96
Abbildung 5-5: Kräfteverhältnis am TCP bei Bewegung entlang des Schraubenkopfes, nach (A_Felk, 2022)	98
Abbildung 5-6: Konzept des Greifers	100
Abbildung 5-7: Lösungsalternativen für das Greifsystem	101
Abbildung 5-8: Funktionsumfang von Modul 2	102
Abbildung 5-9: Ablauf der Bildverarbeitung	104
Abbildung 5-10: Ablauf der Bildverarbeitung mit Beispielen	107
Abbildung 5-11: Aufteilung und Interaktion der Teilsysteme	110
Abbildung 6-1: CAD-Modell der Demontagezelle	111
Abbildung 6-2: Ausführung der Demontageaufgabe mitsamt Werkzeugwechsel	112
Abbildung 6-3: Realisiertes Endeffektormodul	114
Abbildung 6-4: Systemarchitektur der Demontagezelle, nach (Mangold, Mata et al., 2023)	117
Abbildung 6-5: Demontage-Informationsfluss	119
Abbildung 7-1: Prozesszeiten eines automatisierten Entschraubvorgangs, aufgeteilt nach dem Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubverbindungen	121
Abbildung 7-2: Prozesszeiten eines automatisierten Entschraubvorgangs im Vergleich zu einer manuellen Prozessdurchführung	122

---

Abbildung 7-3: Bewertung der Performanz der Demontierbarkeitsanalyse	125
Abbildung 0-1: Einflussgrößen auf die Spanne des Drehmomentfensters einer Schraubverbindung	XXI
Abbildung 0-2: Maßskizze für verschiedene Schraubenköpfe	XXII
Abbildung 0-3: Probekörper für experimentelle Versuchsreihe 1	XXIII
Abbildung 0-4: Probekörper für experimentelle Versuchsreihe 2	XXIII
Abbildung 0-5: Stand der Technik zu Schraubengreifsystemen	XXIX

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Faktorstufen des Versuchsplanes	55
Tabelle 4-2: Umrechnungsfaktoren zwischen Torsionsfestigkeit und Zugfestigkeit	72
Tabelle 4-3: Eingebettete Attribute	75
Tabelle 4-4: Zur Validierung verwendete Schraubenklassen	81
Tabelle 4-5: Schraubenklassen zur Validierung der Modelle	83
Tabelle 5-1: Auszug aus der Anforderungsliste für die Konstruktion der Demontagezelle (A_Merkle, 2020; A_Schmidt, 2020)	92
Tabelle 5-2: Gegenüberstellung verschiedener Suchstrategien	99
Tabelle 5-3: Kenndaten der YOLOv5s-Architektur mit SGD-Optimierungsalgorithmus	106
Tabelle 5-4: Kenndaten der verglichenen Architekturen	108
Tabelle 5-5: Wesentliche Softwaremodule	109
Tabelle 6-1: Detektionsgenauigkeit in einer Feldstudie	116
Tabelle 0-1: Auswahl einschlägiger Roboter-Demontagezellen aus der Wissenschaft	XIII
Tabelle 0-2: Auswahl einschlägiger Arbeiten mit Bildverarbeitungssystemen für die Schraubenkopferkennung	XVII
Tabelle 0-3: Auszug aus dem Datensatz	XXIV
Tabelle 0-4: Anforderungsliste für die Konstruktion der Demontagezelle (A_Merkle, 2020; A_Schmidt, 2020)	XXVII
Tabelle 0-5: Performanz der trainierten Modelle	XXVIII
Tabelle 0-6: Torx	XXX
Tabelle 0-7: Außensechskant	XXXI
Tabelle 0-8: Messwerte der Demontageversuche	XXXII

## Anhang

*Tabelle 0-1: Auswahl einschlägiger Roboter-Demontagezellen aus der Wissenschaft*

Jahr	Autor(en), Affiliation	Demontage- Objekte	Technologischer Fortschritt
1992	<b>Brian Schmult</b> AT&T Labs, New Jersey (Schmult, 1992)	Baugruppe aus Duplo-Steinen	Herausarbeitung der Herausforderungen der Roboter-Demontage
1994	<b>Takanori Shibata, Kazuo Tanie et al.</b> Mechanical Engineering Laboratory, Tsukuba (Shibata & Tanie, 1994)	Kraftfahrzeuge	Vision einer automatischen Demontagefabrik <i>Ecofactory</i>
1995	<b>Juha Tuominen et al.</b> <b>Peter Knackfuß et al.</b> Department of Computer Science, Helsinki University of Technology (Tuominen et al., 1995)	Kraftfahrzeugkomponenten	Demontagezelle für die Demontage von individuellen ( <i>one-of-a-kind</i> ) Produkten
1995	<b>Andreas Dieterle</b> Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, München (Dieterle, 1995)	Elektrokleingeräte	Methodik für die effiziente Einbeziehung von Recyclinganforderungen in die Produktentwicklung
1995	<b>Martin Kahmeyer</b> Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart (Kahmeyer, 1995)	Telefone	Systematische Untersuchung des Demontage-Prozesses von Schraubverbindungen
1995 bis 2006	<b>Günther Seliger et al.</b> Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Berlin (Seliger, 2003)	Waschmaschinen	Umfassende Betrachtung einer automatisierten Demontagefabrik
1996	<b>Gero Gschwendtner</b> Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik, Wien (Gschwendtner, 1996)	Computer	Methodik zur Konzeption automatisierter Demontagezellen
1996	<b>Christian Tritsch</b> wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe (Tritsch, 1996)	TV-Geräte	Umfassende Informationsmodellierung
1997	<b>Alexandra Weigl</b> Fachgruppe Regelsystemtheorie und Robotik, Darmstadt (Weigl, 1997)	Elektrokleingeräte (Video-Kameras, PC-Einsteckkarten)	Aufbau einer universellen Ablaufsteuerung und umfassende Sensorintegration
1997 (2003)	<b>Andreas Hucht</b> <b>Markus Nave</b> Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Dortmund (Hucht, 1997; Nave, 2003)	TV-Geräte	Umfassende Untersuchung des Entschraubens

1998	<b>Reinhard Rupprecht</b> Fraunhofer-Institut für Produkti- onstechnik und Automatisierung, Stuttgart (Rupprecht, 1998)	Fahrzeugdächer	Flexibilisierung der zerstörenden Demontage durch Sensordaten
1999	<b>Yukio Uchiyama et al.</b> Global Ecoindustry Center, To- kyo, Japan (Uchiyama et al., 1999)	Wärmetauscher & Waschmaschinen	Betrachtung der gesamten De- montage-Prozesskette
1999	<b>Bernd Scholz-Reiter</b> Lehrstuhl Industrielle Informati- onstechnik, Cottbus (Scholz-Reiter et al., 1999)	TV-Geräte	Bildverarbeitung zur Produkt- Identifikation; zwei Roboter im Einsatz: Handhabung und De- montage
2000	<b>Eyal Zussman et al.</b> Lehrstuhl Materials Engineering, Technion-Israel Institute of Tech- nology, Haifa (Zussman & Zhou, 2000)	Funksprechgerät	Demontage-Modellierung und Planung in Abhängigkeit des Core-Zustands
2000	<b>Karlheinz Hohm et al.</b> Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik, Darmstadt (Hohm et al., 2000)	Computer-Kompo- nenten	Bildverarbeitung und Demontage- planung
2000	<b>Björn Karlsson et al.</b> Department of Physics and Meas- urement Technology, Linköping (Karlsson & Järrhed, 2000)	Waschmaschinen- Motor	Bildverarbeitung
2001	<b>Ulrich Büker et al.</b> Institut für Elektrotechnik und In- formationstechnik, Paderborn (Büker et al., 2001)	Kraftfahrzeuge (Autoreifen)	Bildverarbeitung zur Detektion von Verbindungselementen
2003	<b>Bernd Kopacek et al.</b> COTRONICS GmbH, Wien (P. Kopacek & Kopacek, 2003; B. Kopacek & Kopacek, 2003)	Telefone, LCD-Dis- plays	Transfer zu industrienahen Systemen
2004 (2009)	<b>Fernando Torres et al.</b> Physics, Systems Engineering and Signal Theory Department, Alicante (Torres et al., 2004; Torres et al., 2009)	Computer	Bildverarbeitung und dynamische Aufgabenverteilung zwischen zwei Robotern
2006	<b>Michael Bailey-Van Kuren</b> Department of Manufacturing En- gineering, Miami (Bailey-Van Kuren, 2006)	Mobiltelefone	Pfadplanung für Automatisiertes Aufschneiden auf Grundlage von Bildverarbeitung
2007	<b>Pablo Gil et al.</b> Physics, Systems Engineering and Signal Theory Department, Al- icante (Gil et al., 2007)	Computer	Positioniersysteme auf Grundlage von Bildverarbeitung; Visuell- kraftgeregeltes System

2009	<b>Sebastian Kernbaum et al.</b> Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Berlin (Kernbaum et al., 2009)	TV-Geräte	Virtuelle Inbetriebnahme und Si- mulation der Demontage
2012	<b>Ahmed ElSayed et al.</b> Department of Computer Science and Engineering, Bridgeport (ElSayed et al., 2012)	Computer	Detektion von Komponenten und automatische Sequenzplanung
2015	<b>Supachai Vongbunyong et al.</b> School of Mechanical and Manu- facturing Engineering, New South Wales (Vongbunyong & Chen, 2015)	Platinen	Automatische Parameter-Anpas- sung und Sequenzplanung auf- grund von Bildverarbeitung
2015, 2016	<b>Kathrin Wegener; Gerbers et al.</b> Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Braun- schweig (Gerbers et al., 2016; Wegener, 2015)	Elektro-Kraftfahr- zeuge-Traktions- batterie	Anwendung von Mensch-Robo- ter-Kooperation in der Demontage
2016	<b>Mohamad Bdiwi et al.</b> Fraunhofer-Institut für Werkzeug- maschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Bdiwi et al., 2016)	Elektro-Kraftfahr- zeuge-Traktions- motoren	Detektion von Verbindungsele- menten
2016	<b>Nicholas DiFilippo et al.</b> Mechanical Engineering Depart- ment, Rhode Island (N. D. DiFilippo, 2016)	Taschenrechner	Anwendung der SOAR-Architek- tur für die Demontage
2016	<b>Jie Li et al.</b> Centre for Sustainable Manufac- turing and Recycling Technology, Loughborough (J. Li, 2016)	Motorsteuergerät	Trennprozess-Untersuchungen
2016	<b>Charissa Rujanavech et al.</b> Apple Inc., Cupertino (Apple Inc., 2016)	Mobiltelefone	Industrielle Robustheit bei ver- schiedenen Core-Varianten
2017 (2021)	<b>Hua Wei Chen</b> <b>Gwendolyn Foo</b> School of Mechanical and Manu- facturing Engineering, New South Wales (W. H. Chen, 2017; W. H. Chen et al., 2021)	Laptops	Multi-Kopf-Endeffektor-Entwick- lung und -Betrieb
2017	<b>Sujuan Wang</b> <b>Zimei Wu</b> Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai (S. Wang, 2017)	LCD-Displays	Robuste Bildverarbeitung, Simu- lation der Demontage, Schraub- Endeffektor
2018	<b>Cornelius Klas et al.</b> Institut für Anthropomatik und Ro- botik, Karlsruhe (Klas et al., 2021)	PC-Festplatten	Flexible Roboterkinematik



2019	<b>Christian Friedrich</b> Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Ferti- gungseinrichtungen (ISW), Uni- versität Stuttgart (Christian Friedrich, 2019)	Pneumatik Ventil	Verbesserte Pfadplanung, Ver- wendung von Aktionsprimitiven
2020	<b>Jun Huang et al.</b> Department of Mechanical Engi- neering, Birmingham (Huang et al., 2020)	Kraftfahrzeuge- Turbolader	Umfassende Demontageuntersu- chungen beim automatisierten Entschraubprozess
2021	<b>Hendrik Poschmann et al.</b> Institut für Aufbereitung, Deponie- technik und Geomechanik, Claust- hal (Poschmann, 2021)	Elektro-Kraftfahr- zeuge-Batterien	Umfassende, lernende Systemar- chitektur
2022	<b>Chuangchuang Zhou et al.</b> Centre for Industrial Management / Traffic and Infrastructure, KU Leuven (Zhou et al., 2022)	Computer, Tablets	Bildverarbeitung, Werkzeugent- wicklung
2022	<b>Anwar Al Assadi et al.</b> Fraunhofer-Institut für Produkti- onstechnik und Automatisierung IPA (Al Assadi, Holtz et al., 2022)	Elektro-Kraftfahr- zeug-Batterien	Schraubendreher-Status erlernt
2022	<b>Ioan Doroftei et al.</b> „Gheorghe Asachi“ Technical Uni- versity of Iasi, Romania (Doroftei et al., 2023)	PC-Leiterplatten	Spezieller Demontage Endeffek- tor, Bildverarbeitung für Objektde- tektion
2022	<b>Merle Zorn et al.</b> FH Münster IWARU Institut für Infrastruktur Wasser Ressourcen Umwelt (Zorn et al., 2022)	Elektro-Kraftfahr- zeuge-Batterien	Sensorbasierte Demontage in Ab- hängigkeit des Zustandes
2022	<b>Ian Kay et al.</b> Department of Mechanical Engi- neering, The University of Akron (Kay et al., 2022)	Lithium-Ionen-Kfz- Batterien	Entwicklung eines Trennschnei- desystems
2023	<b>James Phillip Brazier et al.</b> Middlesex University, Dubai, United Arab Emirates (Brazier & Prasetxo, 2023)	Elektroschrott aus Haushaltsanwen- dungen	Machbarkeitsuntersuchungen für Elektroschrott
2023	<b>Hengwei Zhang et al.</b> School of Mechanical Engineer- ing, Shanghai Jiaotong University, China (Zhang et al., 2023)	Kfz-Batterien	Bildverarbeitung, Visual Servoing

*Tabelle 0-2: Auswahl einschlägiger Arbeiten mit Bildverarbeitungssystemen für die Schraubenkopferkennung*

Referenz	Objekte	Methoden	Performanz (Metrik & Bewertung)
<b>M. Kahmeyer</b> Universität Stuttgart (Kahmeyer, 1995)	Schlitz-Schrauben- kopfantriebe mit- samt Oberflächen- zuständen (Krat- zer; Korrosions- klasse)	Filterbasiert	k. A. (keine Angabe)
<b>S.G. Tzafestas et al.</b> National University of Athens (Tzafestas et al., 1997)	k. A.	Filterbasierte Kan- tendetektion	k. A.
<b>B. Karlsson et al.</b> Linköping University (Karlsson & Järrhed, 2000)	k. A.	Template Basiertes Fuzzy Matching	k. A.
<b>U. Büker et al.</b> Universität Paderborn (Büker et al., 2001)	Außensechskant- Schrauben in Kfz- Rädern	Filterbasiert mit umfangreicher Vor- verarbeitung in Stere- o-Vision-Graustufen- Bildern	98 % der Versuchso- bjekte erzielen eine ausrei- chende Lokalisations- genauigkeit; 15 s Laufzeit für vier Schraubenköpfe
<b>M. Bailey-van Kuren</b> Miami University (Bailey-Van Kuren, 2002)	Laptop-Gehäuse, keine Angabe zu Schraubentypen	Stereo-Vision- Graustufenbilder	k. A.
<b>M. Nave</b> TU Dortmund (Nave, 2003)	M3, M4 und M5 Schrauben mit Phillips-, Sechskant- und Schlit- z-Kopfantrieben in TV-Geräten	k. A.	k. A.
<b>P. Gil et al.</b> University of Alicante (Gil et al., 2007)	Computergeräte, keine Angabe zu Schraubentypen	Filterbasiert mit verschiedenen Kanten-Detektio- nen	k. A.
<b>S.R. Cruz-Ramirez et al.</b> Osaka University (Cruz-Ramirez et al., 2008)	Phillips-Schrauben in Metallstrukturen	Template Matching in Stereo-Bildern	k. A.
<b>S. Vongbunyong et al.</b> University of New South Wales (Vongbunyong et al., 2012, 2013b; Vong- bunyong & Chen, 2015)	Laptops, keine An- gabe zu Schrau- bentypen	k. A.	Erkennungsgenauigkeit < 90 %
<b>K. Wegener et al.</b> TU Braunschweig (Küthe, 2015; Wegener, 2015)	M5-Schrauben mit versch. Schrauben- kopfantrieben	Haar Cascade	50 % Detektionsgenauig- keit
<b>M. Bdiwi et al.</b> Fraunhofer IWU (Bdiwi et al., 2016; Bdiwi et al., 2017)	Außensechskant- schrauben in Mo- torgehäuse	Mehrstufiger An- satz ausgehend von einem Harris- Detektor	ca. 95 % Detektions- genauigkeit

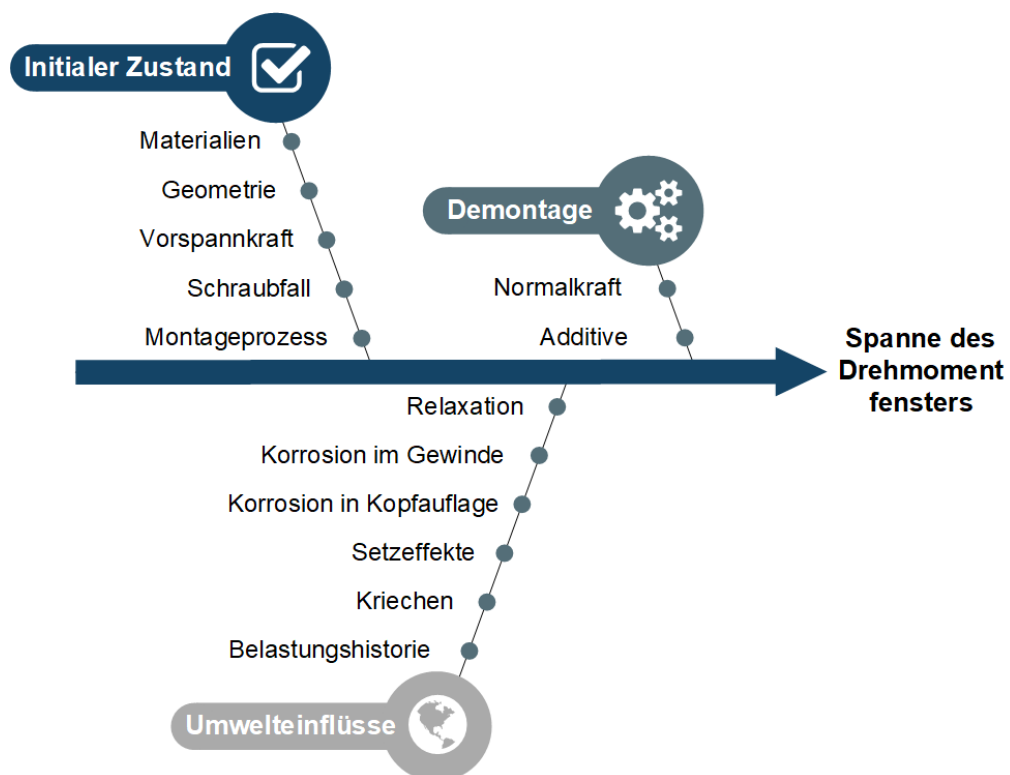
<b>N. DiFilippo</b> <b>N. DiFilippo et al.</b> University of Rhode Island (N. D. DiFilippo, 2016, S. 65; N. M. DiFilippo & Jouaneh, 2018, 2019)	Phillips-Schrauben in Laptop-Gehäusen	Mehrstufiger Ansatz auf Basis einer Kantendetektion und mehreren Filtern	86,7 % Detektionsgenauigkeit mit den besten Parametern
<b>Z. Tu et al.</b> Shanghai Polytechnic University (Tu et al., 2017)	Phillips-Schrauben in Display-Gehäusen	k. A.	k. A.
<b>T. Gibbons et al.</b> University of Sheffield, (Gibbons et al., 2018)	k. A.	Erlerntes Gaussian Mixture Model im Lab Farbraum	k. A.
<b>C. Friedrich</b> <b>C. Friedrich et al.</b> Universität Stuttgart (Christian Friedrich et al., 2017; Christian Friedrich, 2019)	Schrauben in typischen industriellen Komponenten wie Ventilen und Zylindern	Viola-Jones-Detektor basierend auf History of oriented Gradients (HOG) Features	96 % True Positive Rate
<b>J. Krüger et al.</b> Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (Krüger et al., 2019)	k. A.	ResNet-152 Netzwerkarchitektur	k. A.
<b>E. Bigorra &amp; Bilal et al.</b> University of Adger (Bigorra, 2020; Bilal et al., 2022)	Schrauben mit Innensechsrund-Kopfantrieb in Kfz-Batterien	Offline-Erkennung in Bildern aus mehreren Perspektiven, k. A. zum Klassifikationsalgorithmus	k. A. zur Schraubenkopferkennung
<b>E. Yildiz et al.</b> Georg-August University of Göttingen (Yildiz et al., 2020; Yildiz et al., 2022; Yildiz & Wörögötter, 2019, 2020)	Innensechsrund, Innensechskant, Phillips- und Schlitz-Kopfantrieb in Computer-Festplatten	Zweistufiges Verfahren mit Hough Circle Transformation und eigener DCNN-Architektur	80,23 % Detektionsgenauigkeit
<b>D. Brogan et al.</b> University of Rhode Island (Brogan et al., 2021)	Phillips-Schrauben in Elektrokleingeräten	Tiny-YOLO v2	Average Precision von 92,6 %, 99,20 % und 98,39 % in verschiedenen Datensätzen
<b>M. Choux et al.</b> University of Agder (Choux et al., 2021)	Schrauben mit Innensechsrund-Kopfantrieb in Kfz-Batterien	Offline-Erkennung in Bildern aus mehreren Perspektiven, YOLOv3-Ansatz	k. A. zur Schraubenkopferkennung
<b>G. Foo et al.</b> University of New South Wales (Foo et al., 2021b)	Phillips-Schrauben in LCD-Monitoren	Kombinierter Ansatz aus Schraubenerkennung, umfangreicher Bildvorverarbeitung und Visual Reasoning	Average Precision von 91,8 % im besten Setup
<b>C. Klas et al.</b> Karlsruher Institut für Technologie (Klas et al., 2021)	Innensechsrundschrauben in Computer-Festplatten	Zweistufiges Verfahren mit Circle Hough Transform und einem binären convolutional neural network	93,6 % Klassifikationsgenauigkeit

<b>X. Li et al.</b> Taiyuan University of Technology (X. Li et al., 2021)	Schrauben in Mobiltelefonen mit Phillips- und Innen-sechsrund-Kopf-antrieb	Mehrstufiges Verfahren basierend auf Faster R-CNN und Rotation Edge Similarity Ansatz	Gemittelte Average Precision von 98,4 % über alle Schraubenklassen
<b>H. Poschmann</b> TU Clausthal (Poschmann et al., 2020b; Poschmann, 2021)	M 6 × 12-Schrauben mit Innen-sechsrund-Schraubenkopfantrieben Nenngröße 30 in Kfz-Batterien	Mehrstufiges Verfahren basierend auf CNN mit 3D-Kamerasystem und Stereovision	Average Precision von 80,2 %; mAP von 45,1 % über alle Objektklassen der 50 Testbilder
<b>Z. Deng et al.</b> Shanghai Jiao Tong University (Deng et al., 2022)	Phillips-Schrauben in Mobiltelefon-Platinen	SqueezeNet Netzwerk	Average Precision von 99,4 % auf der Klassifikationsaufgabe
<b>G. Kalitsios et al.</b> Centre for Research & Technology Hellas (Kalitsios et al., 2022)	Schrauben in verschiedenen Elektrokleingeräten	Mask R-CNN	0,647 mAP@.5:.95
<b>J. Li et al.</b> Donghua University (J. Li et al., 2022)	Schrauben in Mobiltelefonen	YOLOv5m6	51% mAP@.5:.95
<b>H. Yin et al.</b> Wuhan University of Technology (Yin et al., 2022)	Schrauben in Kfz-Batterien	YOLOv7	k. A.
<b>M. Zorn et al.</b> FH Münster (Zorn et al., 2022)	Schrauben in Kfz-Batterien	Mask R-CNN mit Swin transformer backbone	k. A.
<b>J. Brazier et al.</b> Middlesex University (Brazier & Prasetxo, 2023)	Schrauben in Leiterplatten	Klassische Bildverarbeitung (Circle Hough Transformation)	k. A.
<b>J. Chen et al.</b> Beijing University of Technology, (J. Chen et al., 2023)	Außensechskant-schrauben	Eigene Netzwerkarchitektur basierend auf radial basis function Netzwerken	k. A.
<b>Q. Liu et al.</b> Wuhan University of Technology (Q. Liu et al., 2023)	Schrauben in Kfz-Batterie	Zweistufiger Ansatz, der Reflexionsfeatures aus RGB-Bildern verwendet	mAP@.5: 0,91 Average Precision: 0,91
<b>H. Zhang et al.</b> Shanghai Jiao Tong University (Zhang et al., 2023)	Schrauben und Muttern mit Sechskantköpfen	YOLOv5-s und Kalman Filter auf errechneter Position	mAP@.75: 87,56%
<b>L. Petricca et al.</b> Broentech Solutions A.S., Norwegen (Petricca et al., 2016)	Bilder mit korrodierten Flächen auf Bauwerken	Vergleich mehrerer Methoden	k. A.
<b>M. Schlüter et al.</b> Fraunhofer IPK Berlin (Schlüter et al., 2021)	Oberflächeninspektion bei Kfz Startermotoren	k. A.	k. A.

---

<b>D. Atha et al.</b> Purdue University, West Lafayette (Atha & Jahanshahi, 2018)	Bilder mit korrodier- ten Flächen auf Bauwerken	Vergleich verschie- dener VGG- Mo- delle ZF Net	k. A.
<b>L. Liu et al.</b> Singapore Polytechnic (L. Liu et al., 2018)	Bildern mit korro- dierten Flächen auf Schiffen	VGG19 basieren- des Faster-RCNN Netzwerk	Recognition Rate 81.4%
<b>E. Holm et al.</b> Norwegian University of Science and Technology (Holm et al., 2020)	Bilder mit korrodier- ten Flächen auf Bauwerken	Vergleich verschie- dener Deep-Learn- ing-Netzwerke	k. A.
<b>T. Papamarkou</b> Oak Ridge National Labor- atory (Papamarkou et al., 2021)	Kernbrennstoff Be- hälter	Verschiedene Res- Net Modelle	Average Precision für die beste Architektur: 0,94

---



*Abbildung 0-1: Einflussgrößen auf die Spanne des Drehmomentfensters einer Schraubverbindung*

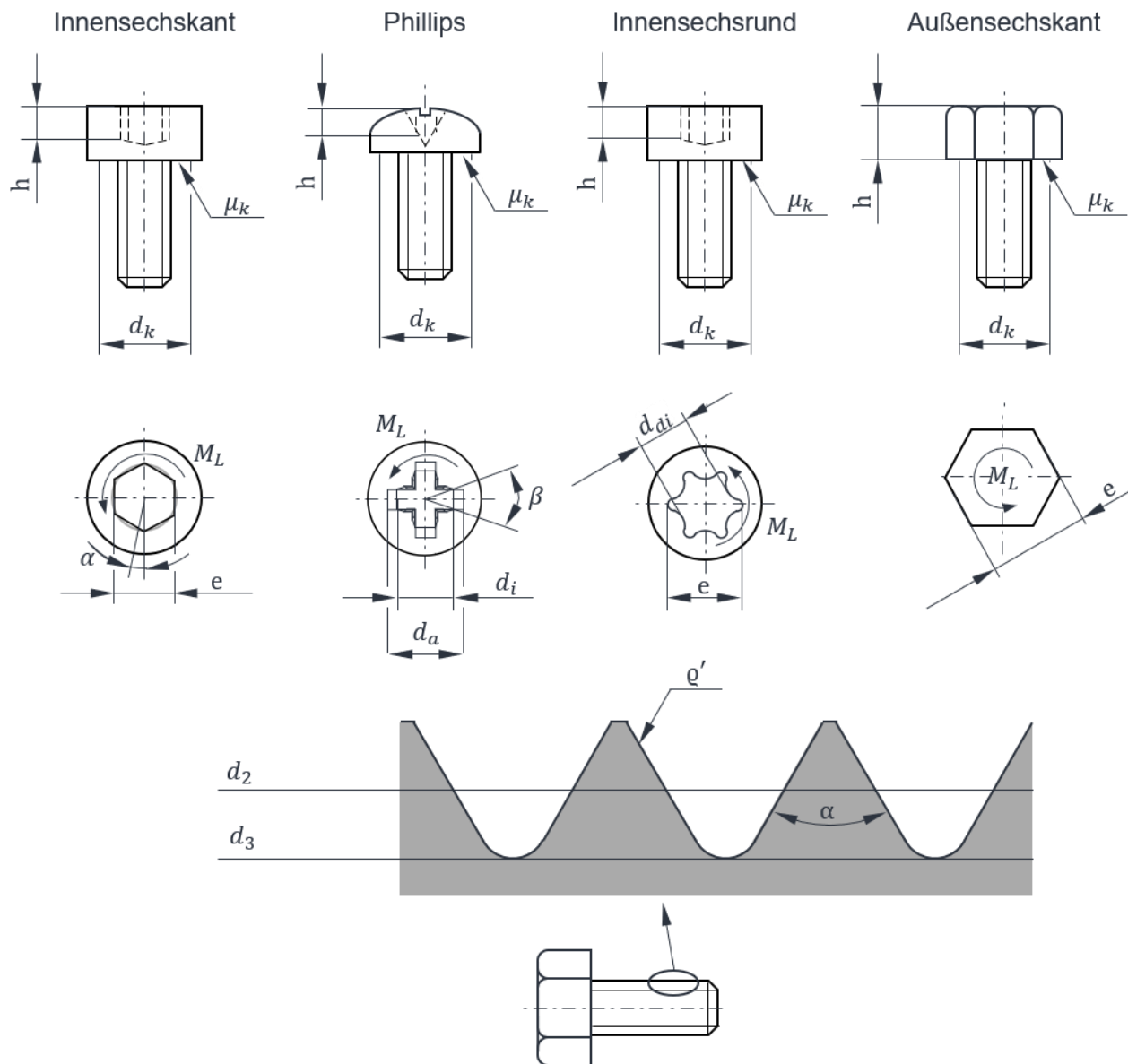
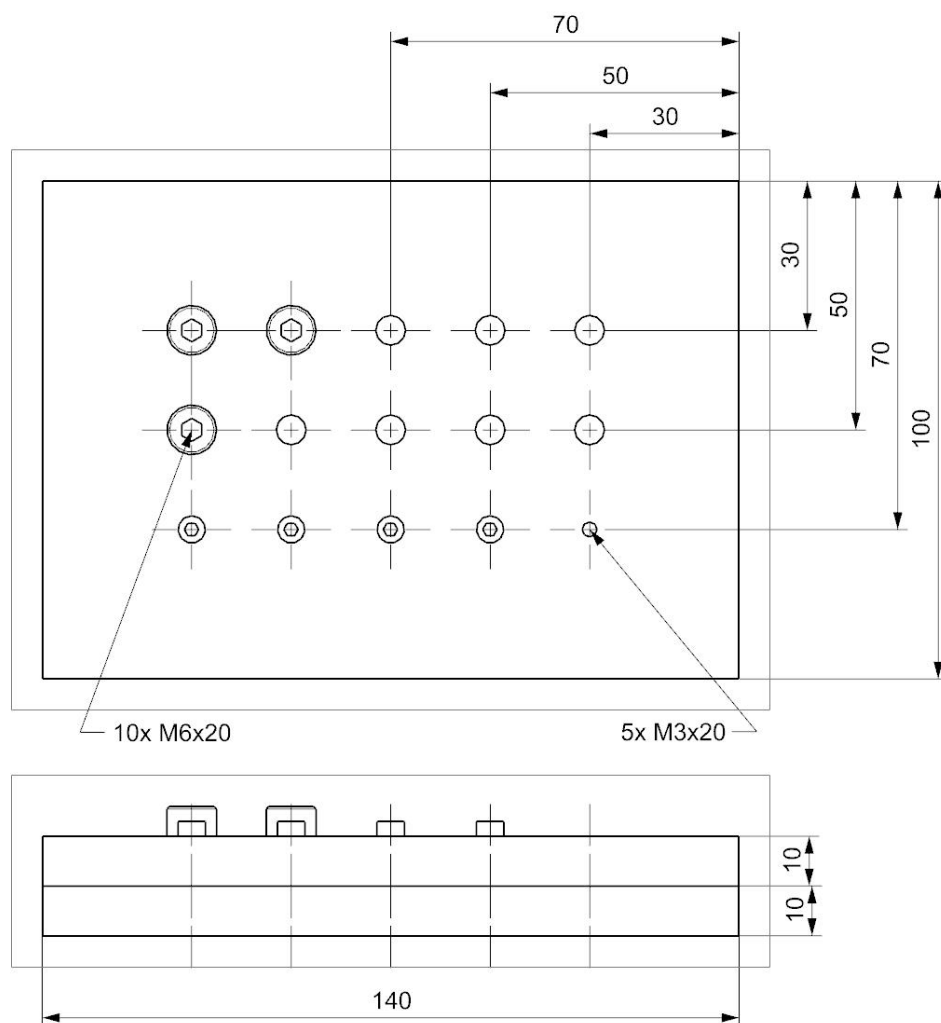
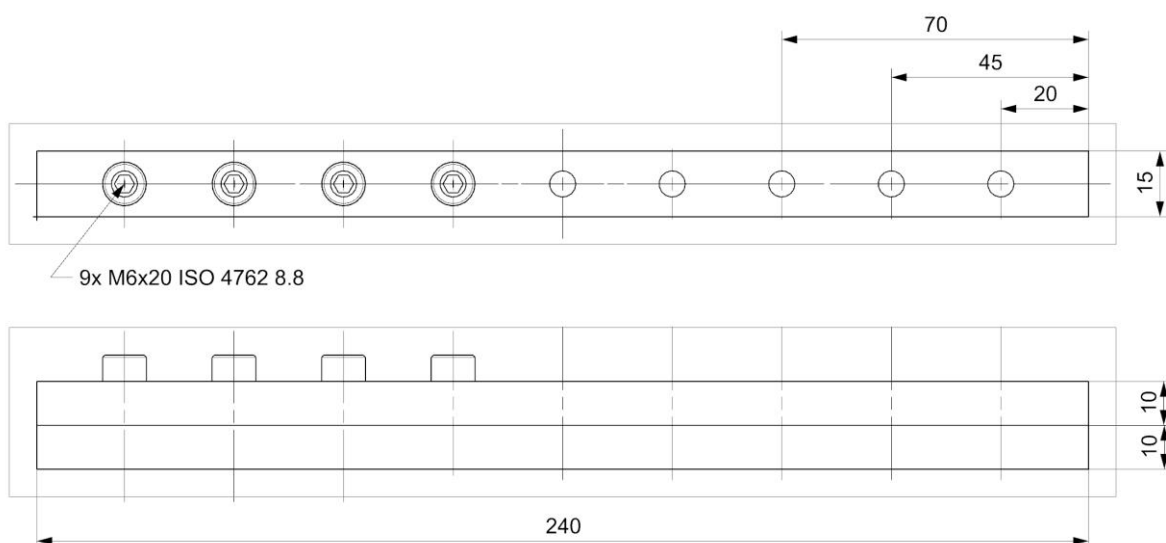


Abbildung 0-2: Maßskizze für verschiedene Schraubenköpfe






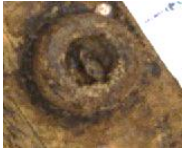





**Abbildung 0-3: Probekörper für experimentelle Versuchsreihe 1**



**Abbildung 0-4: Probekörper für experimentelle Versuchsreihe 2**



Tabelle 0-3: Auszug aus dem Datensatz

Probe	Bild	Differenz- drehmoment [Nm]	Relativer Kor- rosionsgrad $\epsilon$ [%]	Reibungszahl in der Kopf- auflagefläche $\mu_K$ [1]
1 S 9		2,83	14,2	0,3676
2 S 1		3,79	31,69	0,4253
2 S 4		2,02	92,94	0,3190
3 S 1		5,98	99,38	0,5580
3 S 6		7,21	99,98	0,6319
7 S 4		10,72	97,15	0,8437
9 S 4		6,30	52,10	0,5773
11 S 2		0,36	0,00	0,2188
11 S 5		0,08	0,00	0,2017

## Herleitung der Formulierung des Losdrehmomentes

In Kapitel 4.2.1 wird das Losdrehmoment hergeleitet als:

$$M_L = M_G + M_{RA} = \overline{F_{VM}} \cdot \left[ \frac{d_2}{2} \cdot \tan(-\varphi + \varrho') + \mu_K \cdot \frac{d_k}{2} \right] \quad \text{Formel 4-3}$$

Aus einschlägiger Fachliteratur lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem Reibungswinkel im Gewinde  $\varrho'$  und der Reibungszahl im Gewinde  $\mu_G$  für Gewinde mit dem Flankenwinkel  $\alpha$  formulieren (Thomala & Kloos, 2007, S. 299–303).

$$\tan(\varrho') = \frac{\mu_G}{\cos(\frac{\alpha}{2})} \quad \text{Formel 0-1}$$

mit

$\alpha$  = Flankenwinkel, siehe Abbildung 0-2

Zur Auflösung der trigonometrischen Funktion lässt sich das Additionstheorem für den Tangens anführen.

$$\tan(\varrho' - \varphi) = \frac{\tan(\varrho') - \tan(\varphi)}{1 + \tan(\varrho') \cdot \tan(\varphi)} \quad \text{Formel 0-2}$$

Einsetzen von Formel 0-1 in Formel 0-2 liefert

$$\Rightarrow \tan(-\varphi + \varrho') = \frac{\frac{\mu_G}{\cos(\frac{\alpha}{2})} - \tan(\varphi)}{1 + \frac{\mu_G}{\cos(\frac{\alpha}{2})} \cdot \tan(\varphi)} \quad \text{Formel 0-3}$$

Einsetzen von Formel 0-3 in Formel 4-5 liefert

$$\Rightarrow M_L = \overline{F_{VM}} \cdot \left[ \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\frac{\mu_G}{\cos(\frac{\alpha}{2})} - \tan(\varphi)}{1 + \frac{\mu_G}{\cos(\frac{\alpha}{2})} \cdot \tan(\varphi)} + \mu_K \cdot \frac{d_k}{2} \right] \quad \text{Formel 0-4}$$

Umstellen nach  $\mu_K$  liefert

$$\Leftrightarrow \frac{M_L}{F_{VM}} = \left[ \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \tan(\varphi)}{1 + \frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \tan(\varphi)} + \mu_K \cdot \frac{d_k}{2} \right] \quad \text{Formel 0-5}$$

$$\Leftrightarrow \frac{M_L}{F_{VM}} - \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \tan(\varphi)}{1 + \frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \tan(\varphi)} = \mu_K \cdot \frac{d_k}{2} \quad \text{Formel 0-6}$$

$$\Leftrightarrow \mu_K = \left[ \frac{M_L}{F_{VM}} - \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \tan(\varphi)}{1 + \frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \tan(\varphi)} \right] \cdot \frac{2}{d_k} \quad \text{Formel 4-6}$$

*Tabelle 0-4: Anforderungsliste für die Konstruktion der Demontagezelle (A\_Merkle, 2020; A\_Schmidt, 2020)*

Nr.	Anforderung	F/W	Kategorie
1	Kompatibilität mit Hardware der (De-)Montagelinien-Infrastruktur	F	Allgemein
2	Einsatz eines UR10e-Roboters, welcher mit einem speziell gestalteten Endeffektor für Demontageaufgaben auszustatten ist	F	Allgemein
3	Datenaustausch mit übergeordneter Steuerung	F	Allgemein
4	Kompatibilität mit betrachteten Cores	F	Allgemein
5	Einspannung der Cores	F	Allgemein
6	Übergabeposition der Cores ist von AGV zu erreichen	F	Allgemein
7	Ausschleusen nicht demontierbarer Cores	F	Allgemein
8	Demontagezelle ist mit einfachen Mitteln zu bewegen	W	Allgemein
9	Hohe Robustheit der Prozesse	W	Allgemein
10	Datenbank und Anbindung für den Informationsaustausch	F	Steuerung
11	Dem Zustand angepasste Prozessführung	F	Steuerung
12	Analyse und Inspektion der Cores vor und während der Demontage	F	Sensorik & Aktorik
13	Erkennung des Oberflächenzustands der Schrauben	F	Sensorik & Aktorik
14	Detektion & Klassifikation der Schraubenkopfantriebe	F	Sensorik & Aktorik
15	Lokalisation der Schraubenkopfantriebe	F	Sensorik & Aktorik
16	Robuste Sensorik gegenüber Störungseinflüssen	W	Sensorik & Aktorik
17	Drehmomentregelung der Schraubspindel	F	Sensorik & Aktorik
18	Drehzahlregelung der Schraubspindel	F	Sensorik & Aktorik
19	Modularität des Werkzeugs	W	Sensorik & Aktorik
20	Normalkraftregelung des Endeffektors	F	Prozess
21	Werkzeugwechsel des Endeffektors	F	Prozess
22	Suchstrategie für die Formschlusserstellung	F	Prozess
23	Abgreifen der gelösten Schraube	F	Prozess
24	Führen der Schraube in den letzten Gewindegängen	F	Prozess
25	Sortieren der gelösten Schrauben	W	Prozess
26	Möglichkeit zum Erhitzen der Cores	W	Prozess
27	Status-Erkennung der Demontagezelle von außen	W	Sicherheit & Ergonomie
28	Akzeptable Gefährdung während der Arbeit an der Anlage	F	Sicherheit & Ergonomie
29	Bedieneingriffe minimieren	W	Sicherheit & Ergonomie

**Es bedeuten:** **F** Festforderung, **Z** Zielforderung, **W** Wunsch

Tabelle 0-5: Performanz der trainierten Modelle

<b>YOLOv5s mit Adam-Optimierungsalgorithmus</b>				
<b>Klasse</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>mAP@0.5</b>	<b>mAP@0.5:0.95</b>
Schlitz	0,950	0,912	0,957	0,665
Sechskant mit Flansch	0,979	0,912	0,968	0,729
Sechskant	0,983	0,930	0,987	0,757
Phillips	0,969	0,902	0,967	0,729
Pozidriv	0,966	0,911	0,973	0,733
Innen-Sechsrund (Torx)	0,993	0,959	0,992	0,771
<b>Gesamt</b>	<b>0,973</b>	<b>0,921</b>	<b>0,974</b>	<b>0,731</b>
<b>YOLOv5s mit Erkennungsschicht für kleine Objekte und SGD-Optimierungsalgorithmus</b>				
<b>Klasse</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>mAP@0.5</b>	<b>mAP@0.5:0.95</b>
Schlitz	0,994	1	0,995	0,832
Sechskant mit Flansch	0,988	0,949	0,984	0,728
Sechskant	0,984	0,886	0,969	0,714
Phillips	0,998	0,947	0,991	0,755
Pozidriv	0,983	0,862	0,961	0,691
Innen-Sechsrund (Torx)	0,992	0,903	0,969	0,735
<b>Gesamt</b>	<b>0,990</b>	<b>0,925</b>	<b>0,978</b>	<b>0,742</b>
<b>YOLOv5s mit Erkennungsschicht für kleine Objekte und Adam-Optimierungsalgorithmus</b>				
<b>Klasse</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>mAP@0.5</b>	<b>mAP@0.5:0.95</b>
Schlitz	0,989	1	0,995	0,807
Sechskant mit Flansch	0,979	0,976	0,985	0,735
Sechskant	0,959	0,900	0,971	0,714
Phillips	0,992	0,967	0,992	0,759
Pozidriv	0,967	0,882	0,959	0,707
Innen-Sechsrund (Torx)	0,964	0,917	0,969	0,743
<b>Gesamt</b>	<b>0,975</b>	<b>0,940</b>	<b>0,978</b>	<b>0,744</b>
<b>YOLOv7 mit SGD-Optimierungsalgorithmus</b>				
<b>Klasse</b>	<b>Precision</b>	<b>Recall</b>	<b>mAP@0.5</b>	<b>mAP@0.5:0.95</b>
Schlitz	0,978	0,875	0,929	0,698
Sechskant mit Flansch	0,983	0,931	0,972	0,694
Sechskant	0,986	0,894	0,967	0,701
Phillips	0,972	0,897	0,964	0,713
Pozidriv	0,966	0,877	0,950	0,707
Innen-Sechsrund (Torx)	0,980	0,892	0,947	0,702
<b>Gesamt</b>	<b>0,978</b>	<b>0,894</b>	<b>0,955</b>	<b>0,703</b>
<b>SSD</b>				
<b>Klasse</b>	<b>Durchschn. Precision</b>			
Schlitz	0,903			
Sechskant mit Flansch	0,751			
Sechskant	0,748			
Phillips	0,657			
Pozidriv	0,778			
Innen-Sechsrund (Torx)	0,594			
<b>Gesamt</b>	<b>0,738</b>			

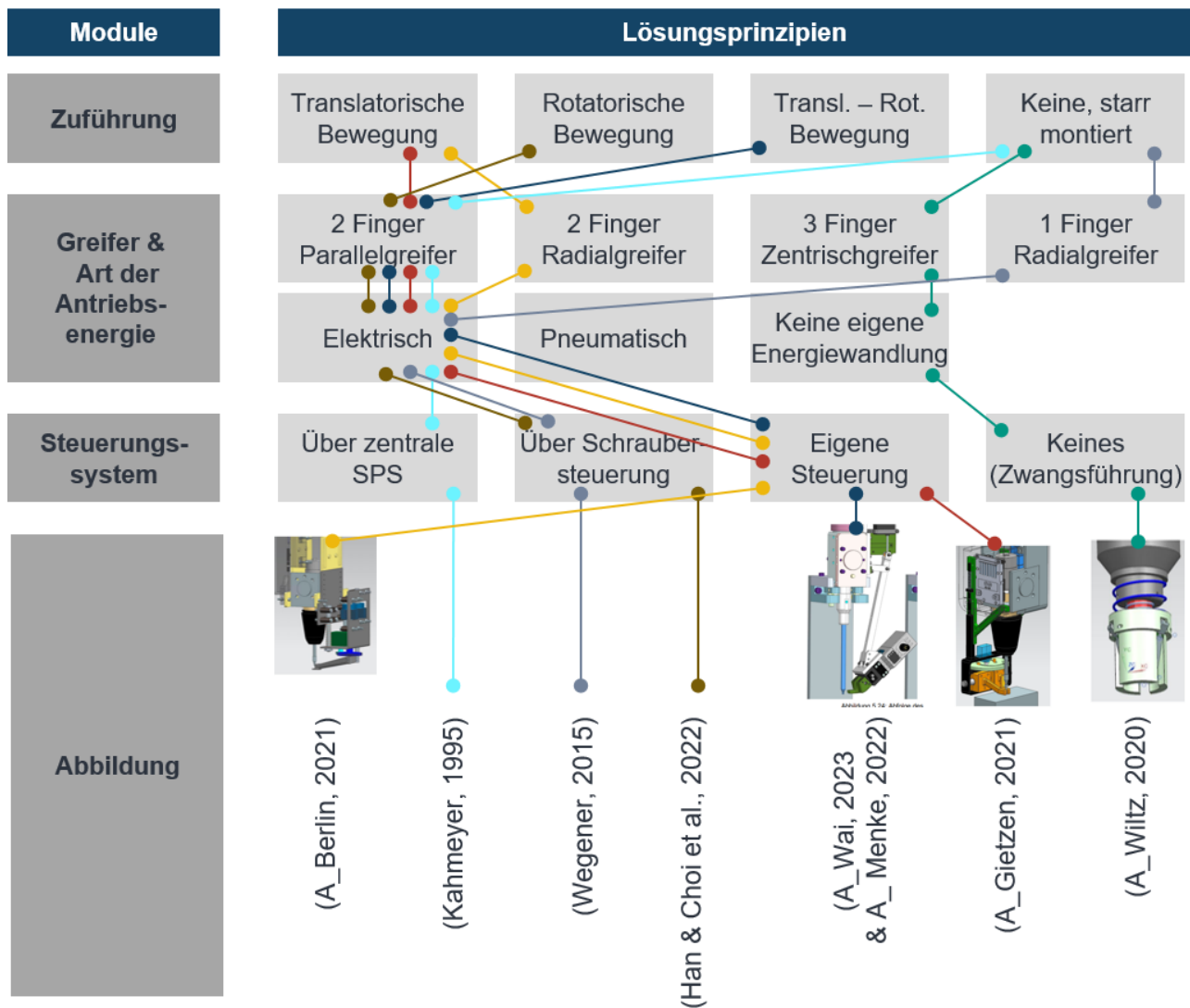


Abbildung 0-5: Stand der Technik zu Schraubengreifsystemen

Tabelle 0-6: Torx

Index Motor & Schraube	Rel. Korro- sions- grad $\epsilon$ [%]	Losdreh- moment [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 0 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 3 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 6 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 9 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 10 [Nm]	Abs. Diffe- renz [Nm]	Rel. Diffe- renz [%]
11,3	72,78	10,5	4,52					5,98	<b>56,95</b>
11,4	72,78	7,9	4,52					3,38	<b>42,78</b>
32,x	67,88	10,01	4,52					5,49	<b>54,85</b>
1,3	69,35	7,28		11,35				4,07	<b>55,91</b>
1,4	69,35	7,5		11,35				3,85	<b>51,33</b>
1,5	69,35	7,5		11,35				3,85	<b>51,33</b>
17,2	65,03	7,95		10,96				3,01	<b>37,86</b>
16,3	71,69	8,2		11,56				3,36	<b>40,98</b>
16,4	71,69	9,5		11,56				2,06	<b>21,68</b>
16,5	71,69	10,1		11,56				1,46	<b>14,46</b>
33,3	41,54	10,01			8,19			1,82	<b>18,18</b>
33,4	41,54	10,01			8,19			1,82	<b>18,18</b>
33,5	41,54	9,65			8,19			1,46	<b>15,13</b>
41,3	19,76	4,72				6,84		2,12	<b>44,92</b>
41,4	22,92	6,1				6,99		0,89	<b>14,59</b>
41,5	27,12	4,81				7,2		2,39	<b>49,69</b>
102,3	0	4,46				4,52		0,06	<b>1,35</b>
102,4	0	4,58				4,52		0,06	<b>1,31</b>
40,2	38,88	9,65					7,1	2,55	<b>26,42</b>
23,4	65,12	10,48					8,54	1,94	<b>18,51</b>

Tabelle 0-7: Außensechskant

Index Motor & Schraube	Rel. Korro- sions- grad $\varepsilon$ [%]	Losdreh- moment [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 0 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 3 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 6 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 9 [Nm]	Modell. Losdreh- moment Reg. 10 [Nm]	Abs. Diffe- renz [Nm]	Rel. Diffe- renz [%]
11,1	18,5	4,6	5,99					1,39	30,22
11,2	18,5	10	5,99					4,01	40,10
1,1	43,68	7,15		6,44				0,71	9,93
1,2	43,68	8,2		6,44				1,76	21,46
17,1	53,18	5,75		6,54				0,79	13,74
16,1	85,67	10,46		6,9				3,56	34,03
16,2	85,67	10		6,9				3,1	31,00
33,1	36,05	7,3			7,19			0,11	1,51
33,2	36,05	5,3			7,19			1,89	35,66
41,1	21,82	7,6				7,02		0,58	7,63
41,2	22,09	8,75				7,02		1,73	19,77
102,1	0	5,4				5,99		0,59	10,93
102,2	0	6,6				5,99		0,61	9,24
40,1	15,35	6,48					6,44	0,04	0,62
23,1	31,78	7,01					7,03	0,02	0,29



Tabelle 0-8: Messwerte der Demontageversuche

<b>Nummer Demonta- geversuch</b>	<b>Erwartetes Abschermoment [Nm]</b>	<b>Erwartetes Losdrehmoment [Nm]</b>	<b>Gemessenes Moment [Nm]</b>	<b>Bemerkung</b>
1	9,78	8,95	10,5	
2	9,78	8,95	7,9	
3	9,78	8,95	8,1	abscheren
4	9,78	8,69	10,01	
5	9,78	8,69	10,46	abscheren
6	9,78	8,77	7,28	
7	9,78	8,77	7,5	
8	9,78	8,77	7,5	
9	9,78	8,53	7,95	
10	9,78	8,53	7,5	abscheren
11	9,78	8,53	7,2	abscheren
12	9,78	8,89	8,2	
13	9,78	8,89	9,5	
14	9,78	8,89	10,1	
15	9,78	7,25	10,01	
16	9,78	7,25	10,01	
17	9,78	7,25	9,65	
18	9,78	6,06	4,72	
19	9,78	6,23	6,1	
20	9,78	6,46	4,81	
21	9,78	4,52	4,46	
22	9,78	4,53	4,58	
23	9,78	7,1	9,65	
24	9,78	7,51	8	abscheren
25	9,78	8,23	7,5	abscheren
26	9,78	8,54	10,48	
27	11,47	6,78	4,6	
28	11,47	6,78	10	
29	11,47	7,54	7,15	
30	11,47	7,54	8,2	
31	11,47	8,19	6,98	
32	11,47	8,19	6,45	
33	11,47	7,83	5,75	
34	11,47	8,81	10,46	
35	11,47	8,81	10	
36	11,47	7,9	7,6	
37	11,47	7,9	8,4	
38	11,47	7,31	7,3	
39	11,47	7,31	5,3	
40	11,47	6,88	7,6	
41	11,47	6,89	8,75	
42	11,47	5,99	5,4	
43	11,47	5,99	6,6	
44	11,47	8,29	9,12	
45	11,47	7,99	8,01	

---

46	10,21	6,68	6,48
47	10,21	7,18	7,01
48	10,21	6,23	4,35
49	10,21	6,25	4,45
50	10,21	7,52	7,05
51	10,21	7,64	7,85
52	10,21	7,82	8,98

---



Forschungsberichte aus dem wbk  
Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten  
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System  
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die  
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung  
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

**Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich**

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an  
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

**Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen**

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

**Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien**

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

**Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung**

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

**Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung**

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

**Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen**

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren**

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

**Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung**

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

**Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischen Vorschubsystem**

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

**Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder**

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

**Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen**

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

**Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen**

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

**Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben**

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

**Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen**

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

**Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen**

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

**Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik**

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

**Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen**

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

**Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion**

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

**Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen**

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

**Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen**

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

**Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen**

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

**Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung**

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

**Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen**



Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

**Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

**Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen**

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

**Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes**

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

**Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen**

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

**Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung**

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

**Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen**

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

**Verbesserung der Genauigkeit beim fünfschichtigen Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

**Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem**

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:  
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung  
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch  
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung  
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der  
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische  
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge  
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer  
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

**Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus**

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. WirtschaftsIng. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

**Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation**

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

**Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten**

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren  
Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossman

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitäts-  
methodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer  
Honprozessregelung**

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünfsachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlen-  
unterstützte CAM-Umgebung**

Band 93

Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94

Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95

Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96

Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97

Dr.-Ing. Frank Reinboth

**Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren**

Band 98

Dr.-Ing. Lutz Trender

**Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung**

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

**Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining**

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

**Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen**

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmäzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Managment-Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

**Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement**



Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser  
Abrasive Strahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

**Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen**

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

**Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses**

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des  
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen  
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

**Turbulenzreaktionsprozesse**

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

**Fabrikplanung im turbulenten Umfeld**

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in  
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-  
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung  
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und  
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen  
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere  
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile  
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung  
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels  
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften:** Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für µMIM-Bauteile**



Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

**Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe**

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptronischen Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen  
Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner  
Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel  
der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten  
Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess  
und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-  
effizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**  
Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**  
Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung**

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

**Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile**

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

**Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem**

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz**  
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

**Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**  
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

**Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

**Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion**

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen**



Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion**

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

**Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission**

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung**

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning**  
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation**  
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

**Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen**

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

**Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen**

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

**Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements**

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

**Hochiterative Technologieplanung**

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren**

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung**

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

**Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China**

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

**Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion**

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms**

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

**Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie**

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen**

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

**Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln**

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

**Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound**

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

**Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik**

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

**Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures**

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

**(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken**  
Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

**Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung**

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion**

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

**Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien**

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

**Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5**

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

**Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln**

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

**Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4**

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

**KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung**

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

**Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen**

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

**Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben**

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

**Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken**

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

**Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen**

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

**In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess**

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

**Digital Twins of production systems**

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

**Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing**

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

**Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden**

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

**Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung**

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

**Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen**

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

**Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission**

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

**Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile**

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

**Intelligent production control for time-constrained complex job shops**

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

**Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen**

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

**Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK**

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

**Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks**

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

**Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie**

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

**Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe**

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

**Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz**

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

**Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess**

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

**Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen**

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

**Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics**

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

**Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing**

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

**Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren**

Band 290

Dr.-Ing. Patrizia Konstanze Gartner

**Konzept eines Selbstheilungsmechanismus für Polymerelektrolytmembranen**

Optimierung der Lebensdauer und der Effizienz von Brennstoffzellen

Band 291

Dr.-Ing. Jens Schäfer

**Funktionsintegriertes Handhabungssystem zur geometrieflexiblen, positionsgenauen Einzellagenstapelung in der Brennstoffzellenstackfertigung**

Band 292

Dr.-Ing. Gwen Louis Steier

**Strategischer Fit in globalen Produktionsnetzwerken**

Entscheidungsunterstützung für die strategische Netzwerkkonfiguration

Band 293

Dr.-Ing. Louis Schäfer

**Assistierte, modellbasierte Grobplanung von Produktionssystemen mittels Mehrzieloptimierung:**

Anwendung am Beispiel hochautomatisierter Schweißlinien für die Automobilzuliefererindustrie

Band 294

Dr.-Ing. Jan-Philipp Kaiser

**Autonomous View Planning using Reinforcement Learning**

Modeling and Application for Visual Inspection in Remanufacturing

Band 295

Dr.-Ing. Wilken Wößner

**Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe**



Band 296

Dr.-Ing. Ann-Kathrin Wurba

**Reduktion der Längsfaltenbildung während des Kalandrierens von Batterieelektroden**

Band 297

Dr.-Ing. Simon Mangold

**Automatisierte Demontage von Schraubverbindungen für das Remanufacturing**

Konzeption, Aufbau und Betrieb einer Demontagezelle



