



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 • E-Mail: 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

| | |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungen | IV |
| Formelzeichen | VI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Aufbau der Arbeit | 4 |
| 2 Stand von Forschung und Technik | 5 |
| 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 |
| 3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise | 41 |
| 3.1 Präzisierung der Zielsetzung | 41 |
| 3.2 Vorgehensweise zur Zielerreichung | 43 |
| 4 Prozessmodelle für die Schraubendemontage | 45 |
| 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 | Lösdrehmoment | 77 |
| 4.4.2 | Abschermoment | 81 |
| 5 | Konzeption einer Demontagezelle für das Remanufacturing | 88 |
| 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 |
| 6 | Realisierung der roboterbasierten Demontagezelle | 111 |
| 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 |
| 7 | Funktionsnachweis des Konzepts | 120 |
| 7.1 | Validierung des mechatronischen Aufbaus der automatisierten Demontagezelle | 120 |
| 7.2 | Prädiktive Prozesssteuerung auf Basis von Prozessmodellen in der Demontage | 124 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 127 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 127 |
| 8.2 | Ausblick | 129 |
| Publikationsliste | | 131 |
| Literaturverzeichnis | | 133 |

| | |
|------------------------------|-------------|
| Abbildungsverzeichnis | VIII |
| Tabellenverzeichnis | XII |
| Anhang | XIII |

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 ¹ | 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 ² |
| t | Zeit | s |
| W_t | Widerstandsmoment gegen Torsion | mm ³ |
| α | Öffnungswinkel Kraftangriffsmerkmal | ° |
| β | Öffnungswinkel Kraftangriffsmerkmal | ° |

¹ Geordnet in alphabetischer Reihenfolge und aufgenommen bei wiederholter Erscheinung über den Textverlauf

| | | |
|---------------|---------------------------------------|-------------------|
| ε | Relativer Korrosionsgrad | % |
| μ_K | Reibungszahl in der Kopfauflagefläche | - |
| μ_G | Reibungszahl im Gewinde | - |
| ϱ' | Reibungswinkel im Gewinde | ° |
| τ_{tB} | Torsionsfestigkeit | N/mm ² |
| τ_{max} | Maximale Torsionsschubspannung | N/mm ² |
| φ | 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 Ressourcenutzung 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).

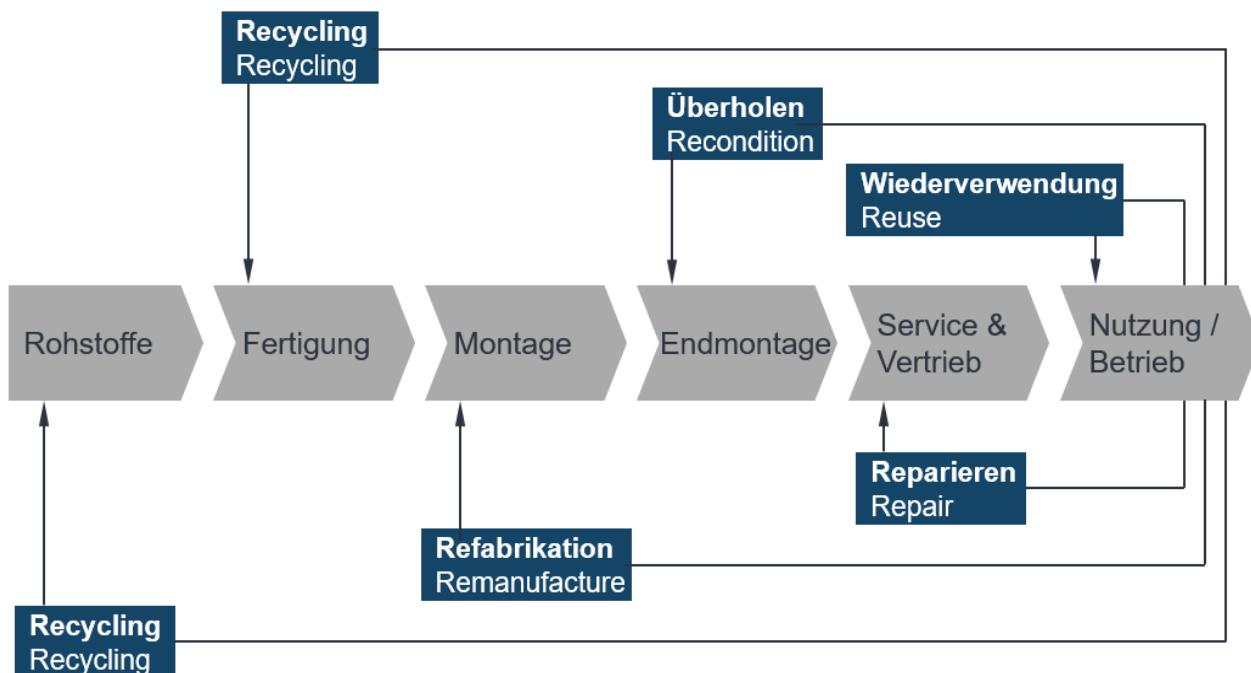


Abbildung 1-1: Geschlossener Lebenszyklus (eigene Darstellung in Anlehnung an (Parker et al., 2015))

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.

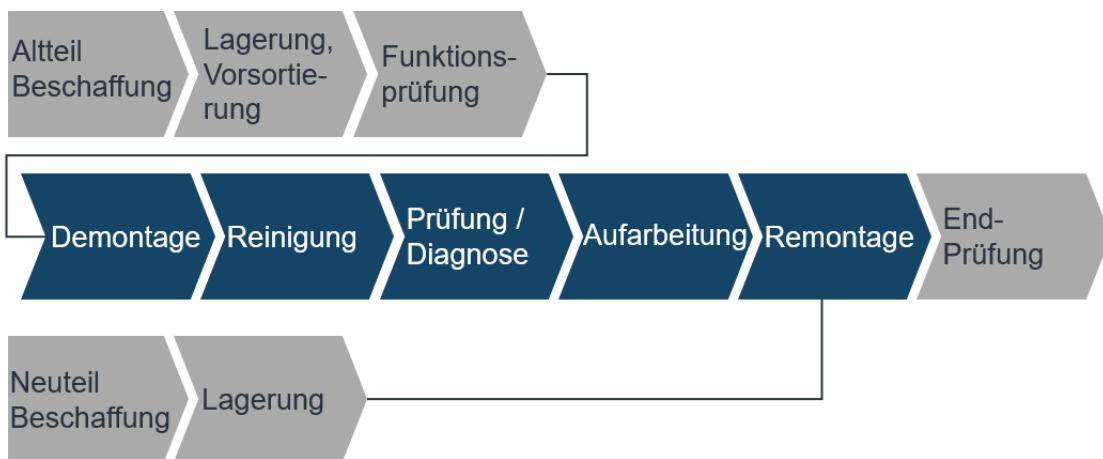


Abbildung 1-2: Prozesskette des Remanufacturing (eigene Darstellung in Anlehnung an (VDI Zentrum Ressourceneffizienz, 2017))

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 lösbar 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 Zusammenhalts von Körpern [...], wobei der Zusammenhalt teilweise oder im Ganzen vermindert wird“ (DIN 8580). Für dieses *Aufheben des Zusammenhalts 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 automobile 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 Bremssysteme² 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-Programm³. 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

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

³ 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/S⁴ sowie die Alec GmbH genannt⁵. 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.

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

⁵ 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 wundlungsfähige 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 Demontierbarkeit 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 Volumenanpassung (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 mit 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. Statt dessen 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 lösbar Verbindungen. Alle anderen Demontagearten werden als *teilweise zerstörende Demontage* oder *zerstörende Demontage* bezeichnet, bei denen nicht lösbar 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).

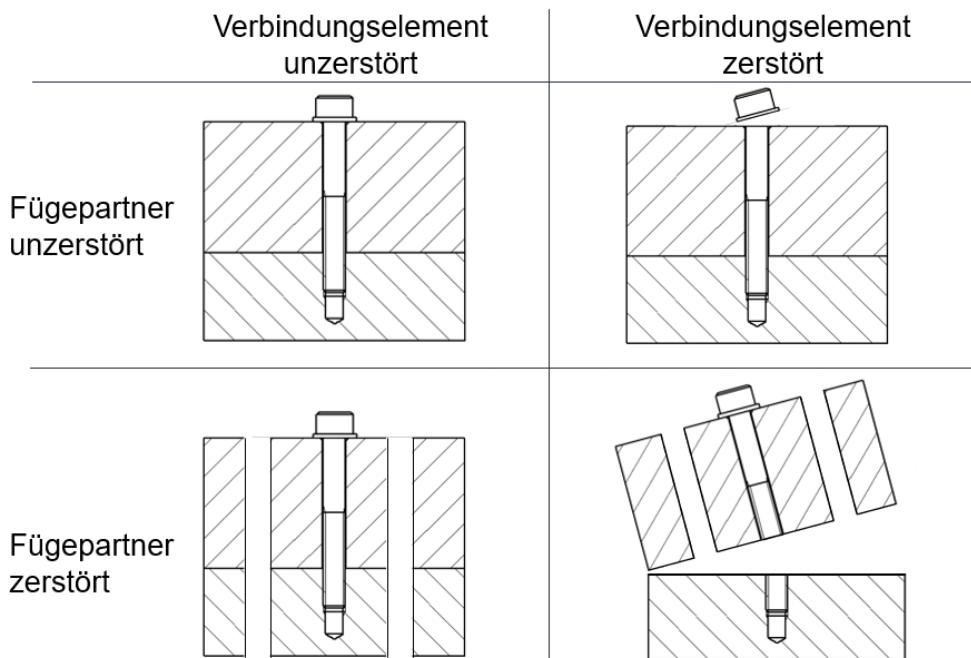


Abbildung 2-1: Demontagearten am Beispiel des Entschraubens (eigene Darstellung in Anlehnung an (Härtwig, 2005))

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 Schrauberklinge 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 Versagensmoment 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.

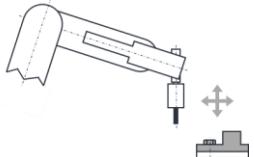
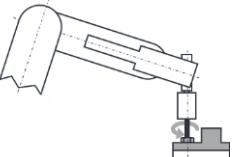
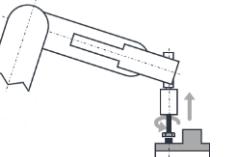
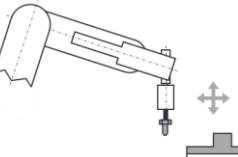
| | 1. Anfahren | 2. Formschluss | 3. Ausdrehen | 4. Abführen |
|-------------------|--|--|--|--|
| Prozess-Phase |  |  |  |  |
| Prozess-Parameter | <ul style="list-style-type: none"> > Position & Orientierung der Schraube > Geometrie des Werkstücks | <ul style="list-style-type: none"> > Lateral- und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

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 Formschlussverstellung 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 Werkern 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 Produktpool 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 Formschlussverbindung 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).

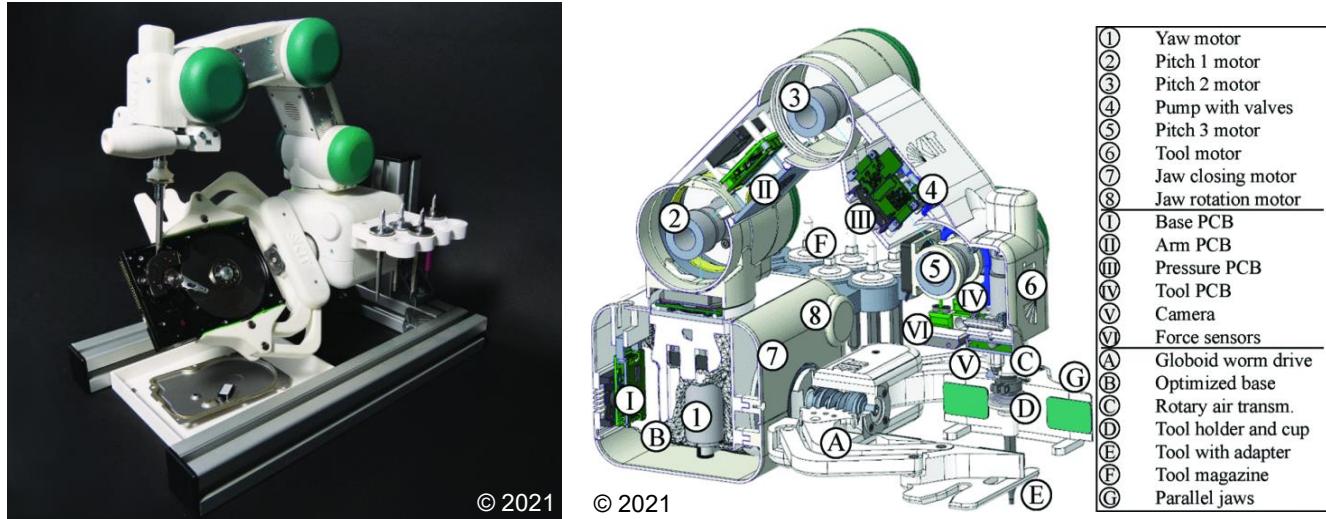


Abbildung 2-5: Der KIT-Greifer (Klas et al., 2021)

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*, *Entschräuben*, *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 Verfahrwege 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).

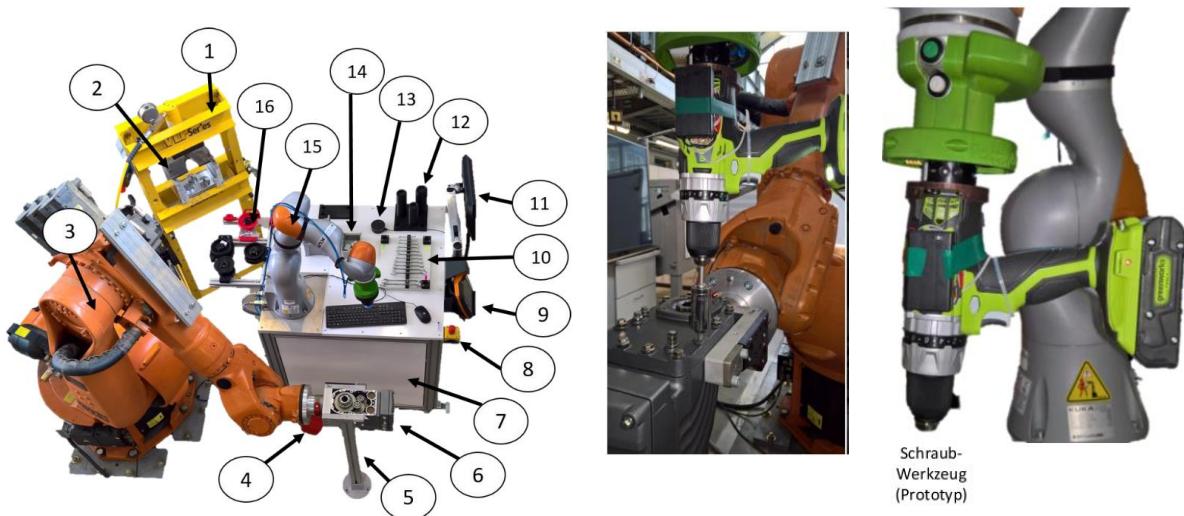


Abbildung 2-6: Demontagearbeitsplatz nach (Jungbluth, 2019)

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 Knarrenschraubwerkzeug, eine Abziehvorrichtung, mehrere mechanische Greifer, ein Sauggreifer sowie ein Schraubensystem entwickelt. Das in der Arbeit verwendete Schraubensystem kann über eine MQTT-Schnittstelle Informationen austauschen und parametrieren 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. Demontagefehlschläge 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 Tiefeinformationen 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 gezielte 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 Schraubenkopfantrieben**. 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 Schraubenkopfantrieben 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 Tiefensors wird die Lokalisierung im dreidimensionalen Raum vorgenommen. Kamera und Tiefensor 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 Schraubenhörner 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 Fehldetections 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 Fehldetections 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-Hauptplatten vorgestellt. Der Ansatz zur Schraubenkopferkennung kombiniert den Einsatz eines regionenbasierten faltenenden 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.

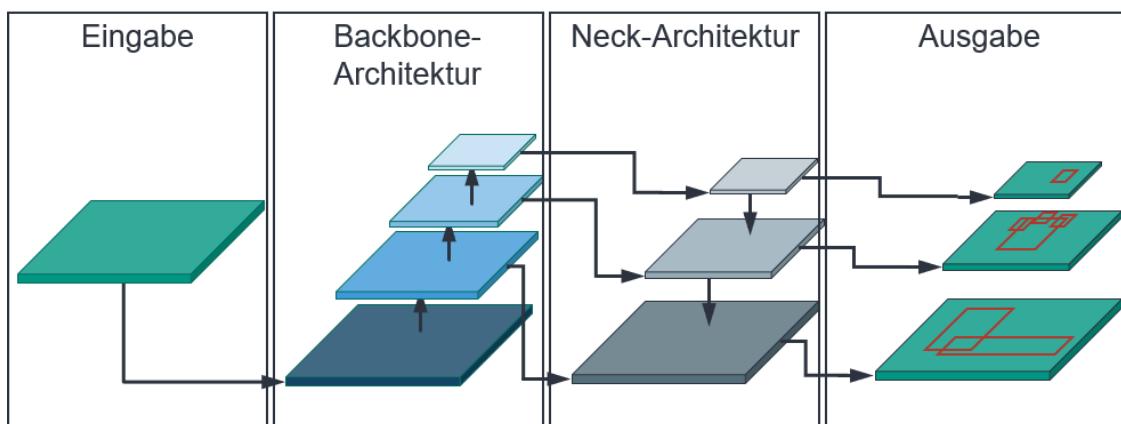


Abbildung 2-8: YOLO v5 Architektur (eigene Darstellung in Anlehnung an (Bochkovskiy et al., 2020))

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 416×416 oder 608×608 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 Verkettingsstrategie 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 Schraubenkopfantrieben in Mobiltelefonen (J. Li et al., 2022). In dem Beitrag von Zhang et al. wird ein YOLO v5 Algorithmus verwendet für die Erkennung von Schraubenkopfantrieben. In dem vorgestellten robotergeführten Demontage Endeffektor ist ein Bildverarbeitungssystem integriert, welches verschiedene Schraubenkopfantriebe 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 Schraubenkopferkennung ist mitamt 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 Netzwerkiefen 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 an⁶. Die ecl@ss-Umgebung, welche den Austausch von Produktstammdaten in der industriellen Praxis

⁶ ECLASS e. V. (2023), Enable your global business and digitization. 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).

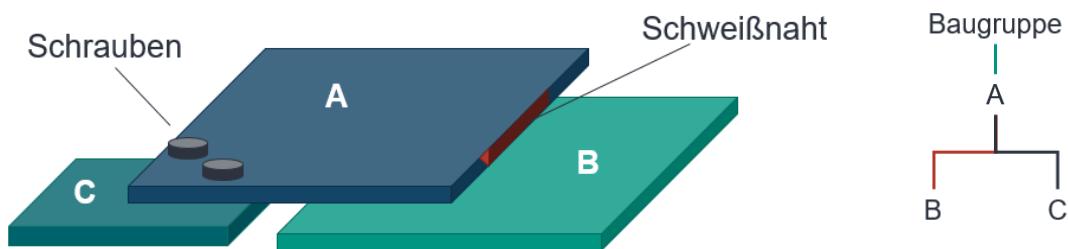


Abbildung 2-9: Modellierungsansätze im xMCF-Format (eigene Darstellung in Anlehnung an (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., 2020))

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 Rückkoppungssteuerungspolitik 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 adressiert⁷. 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).

⁷ 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 Schraubkopfantriebe, 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).

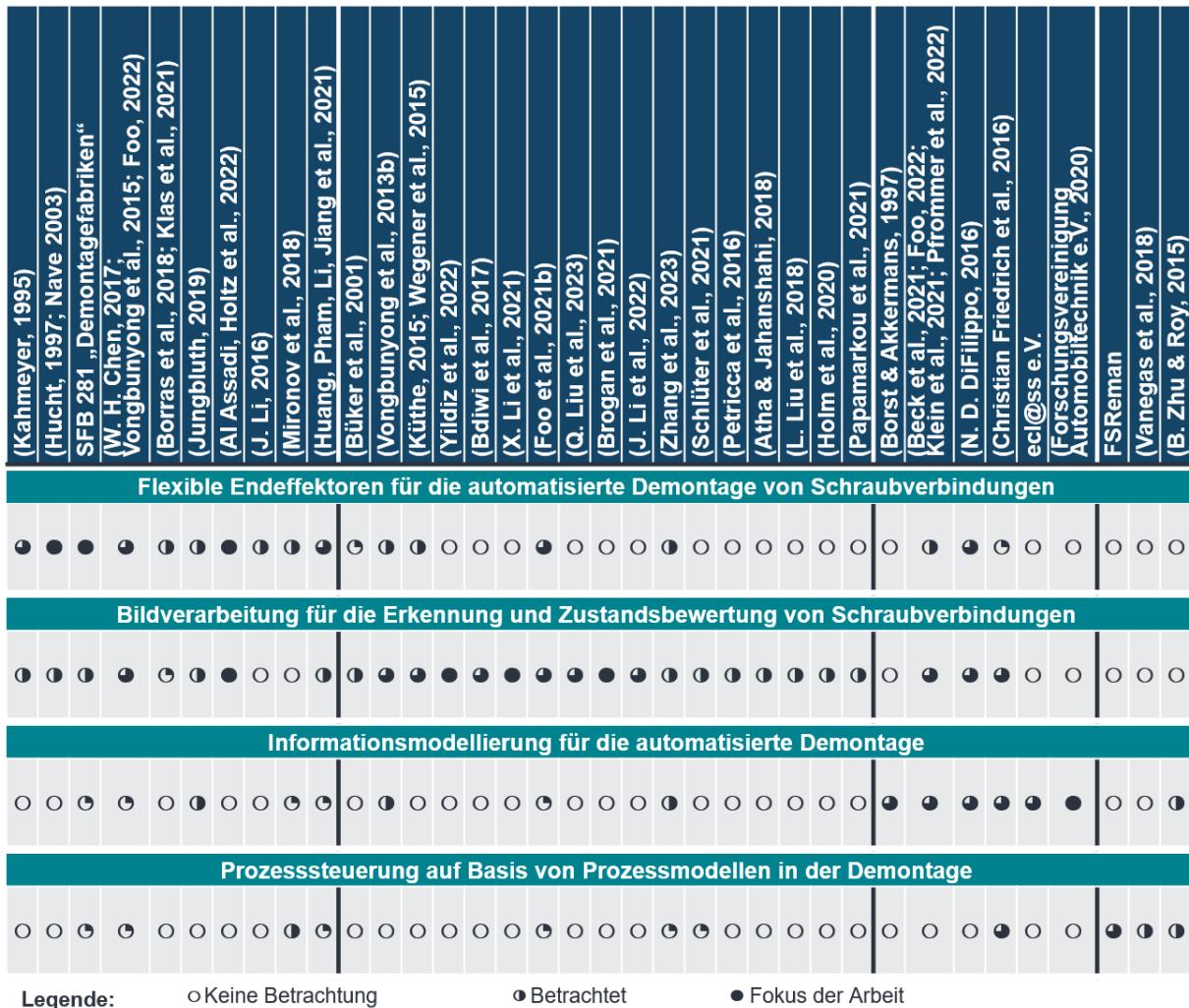


Abbildung 2-10: Zusammenfassung des Standes von Forschung und Technik

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.

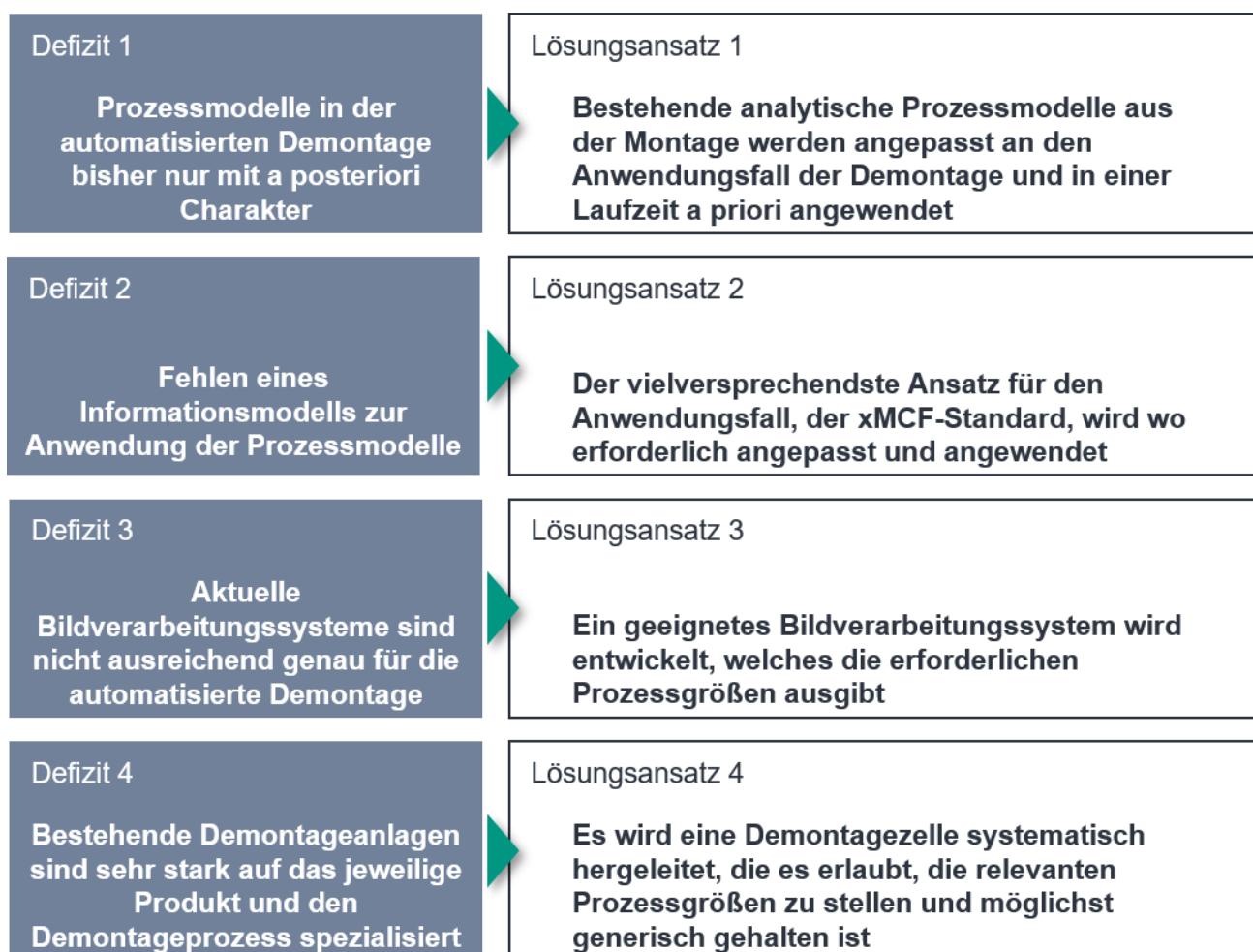


Abbildung 2-11: Aktuelle Defizite der automatisierten Demontage von Schraubverbindungen und Lösungsansätze

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 fortlaufender 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 imstande 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.

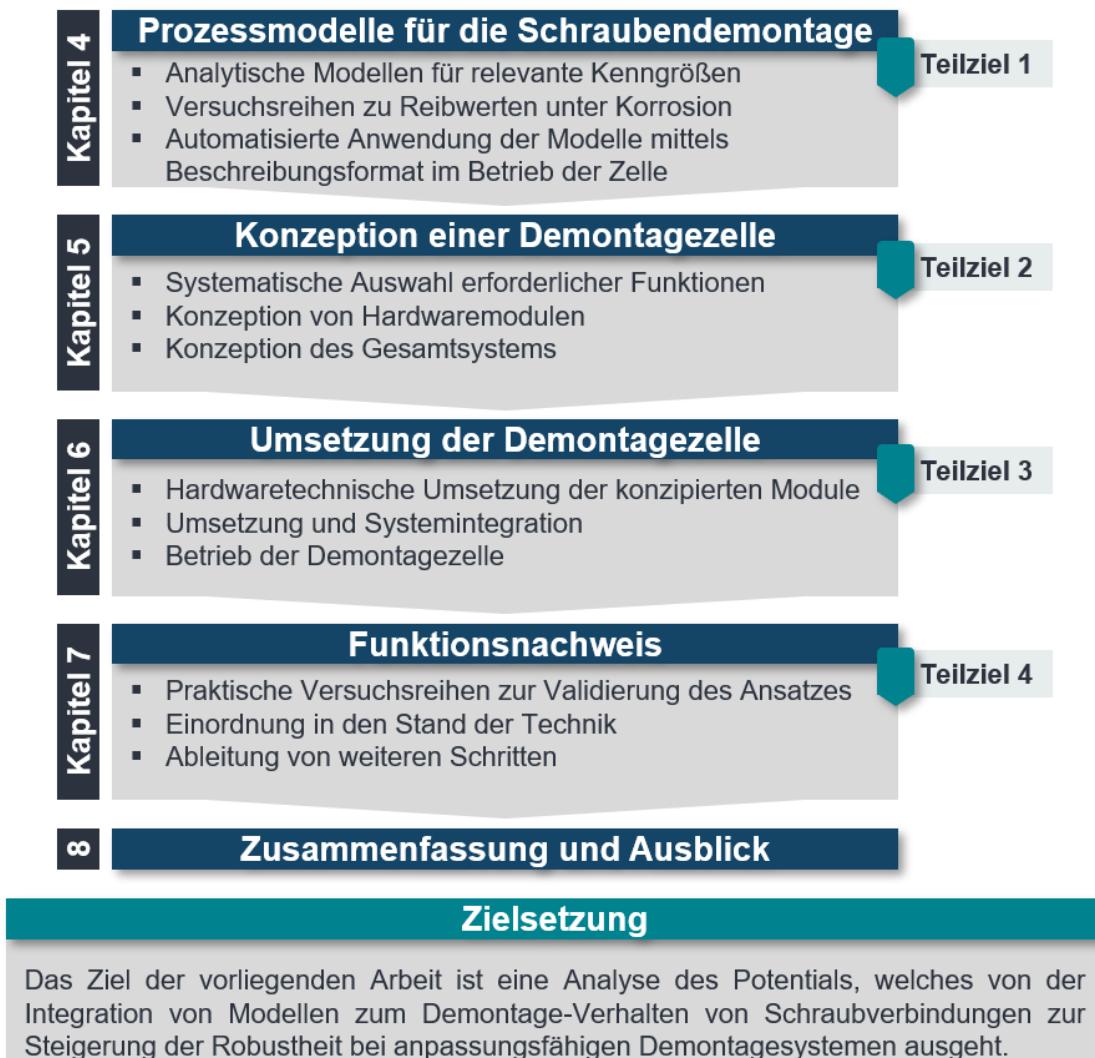


Abbildung 3-1: Ansatz zur Zielerreichung

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).

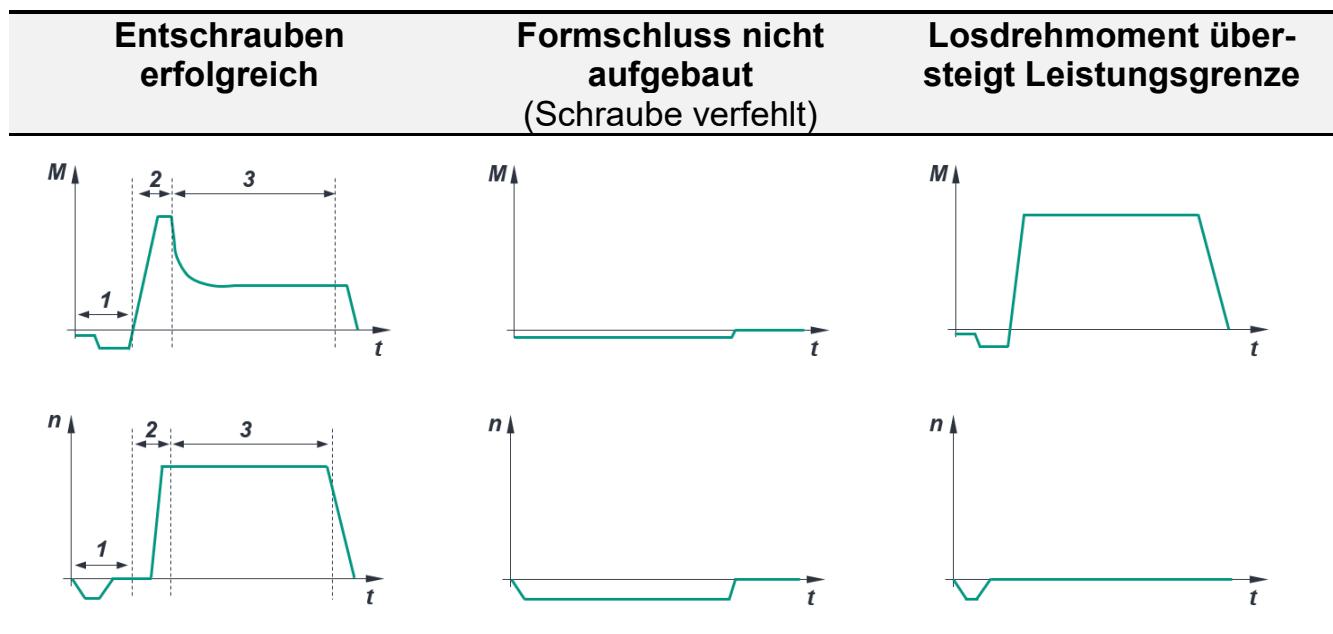


Abbildung 4-1: Drehmoment-Zeitverlauf und Spindeldrehzahl-Zeitverlauf bei der Schraubendemontage (eigene Darstellung in Anlehnung an (Apley et al., 1998))

Die Zeitverläufe der Prozessgrößen haben charakteristische Verläufe für verschiedene Fälle, zum Beispiel einer erfolgreichen Demontage oder einer fehlerhaften Formschlussserstellung. 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 drehzahlgeregelt 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 demontiert 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.

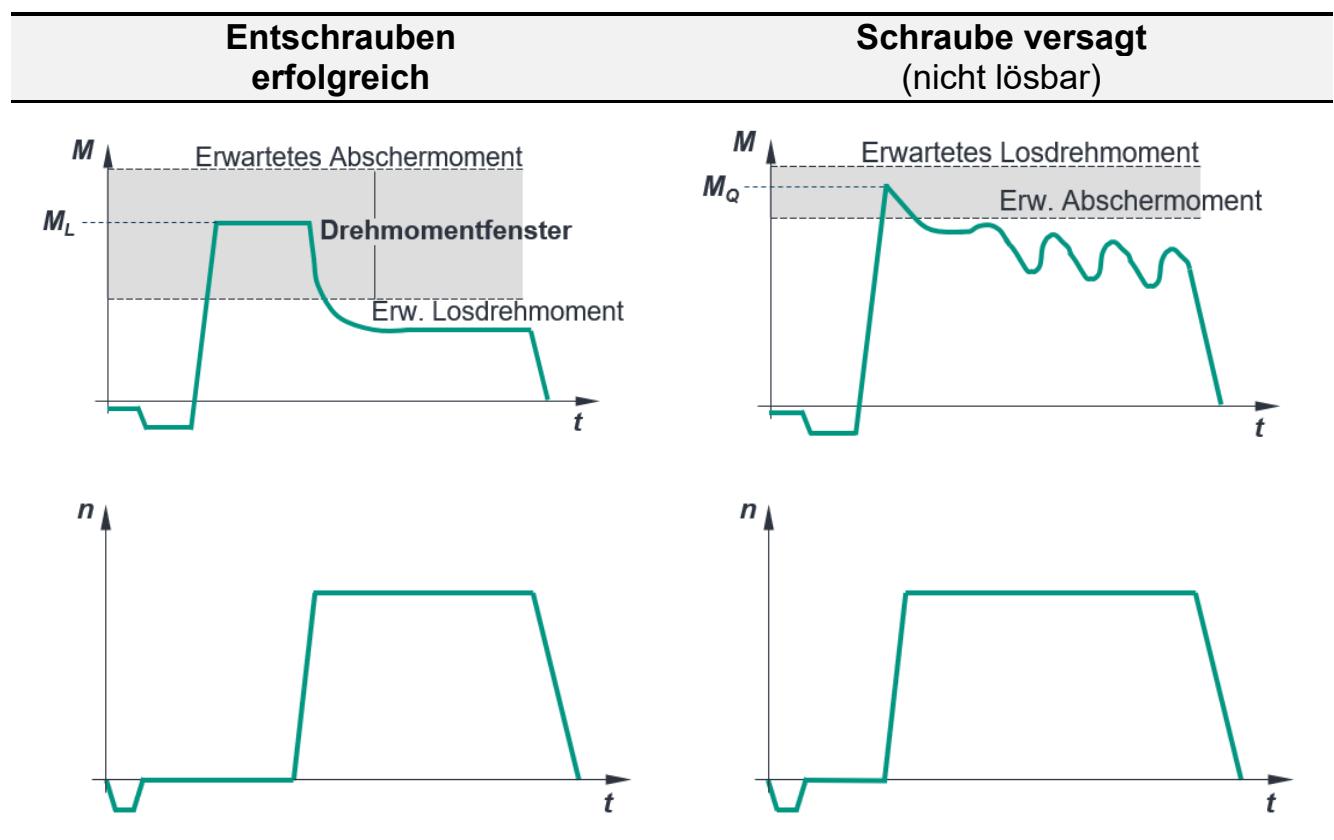


Abbildung 4-2: Drehmomentfenster der automatisierten Demontage

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.

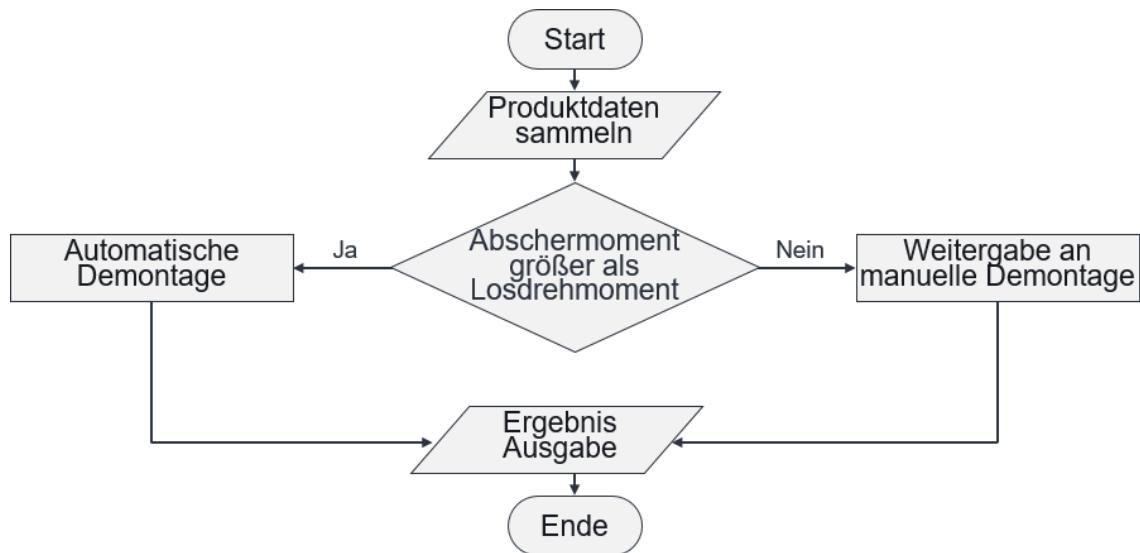


Abbildung 4-3: Ansatz zur Bewertung der Lösbarkeit von Schraubverbindungen

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 φ , 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 .

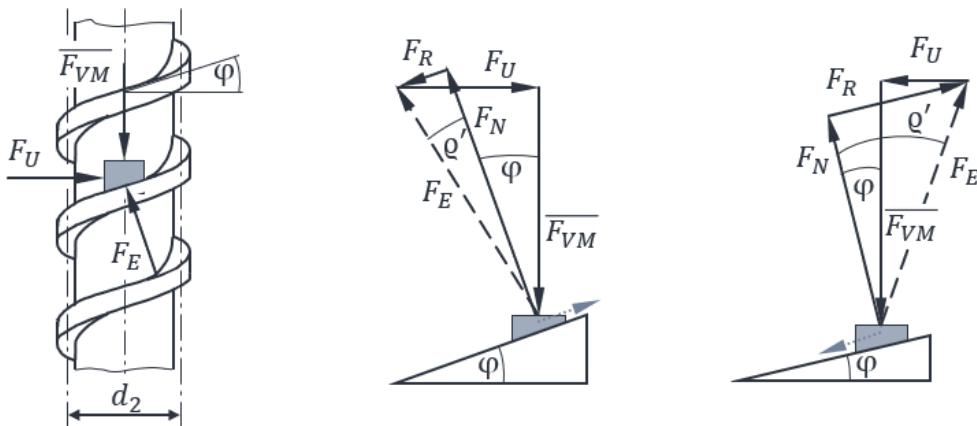


Abbildung 4-4: Kräfte am Flachgewinde nach (Wittel et al., 2019, S. 268)

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

$$F_U + F_E + \overline{F_{VM}} = F_U + F_R + F_N + \overline{F_{VM}} = 0 \quad \text{Formel 4-2}$$

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 ϱ' 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 Schraubenlösens (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:

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

Formel 4-3

mit $\overline{F_{VM}}$ = um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft d_2 = Flankendurchmesser des Gewindes φ = Steigungswinkel des Gewindes ϱ' = Reibungswinkel im Gewinde

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

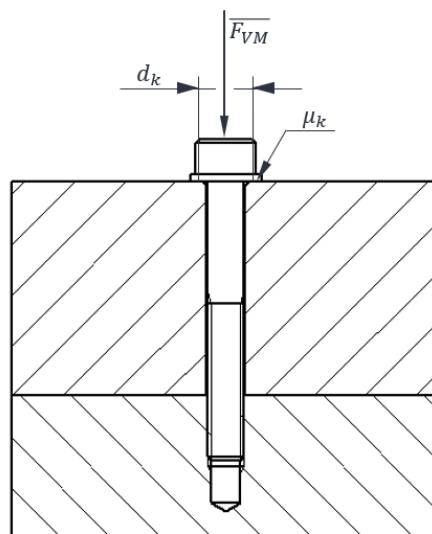


Abbildung 4-5 : Skizze der relevanten Größen für das Reibungsmoment an der Auflagefläche

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 μ_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

μ_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 μ_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.

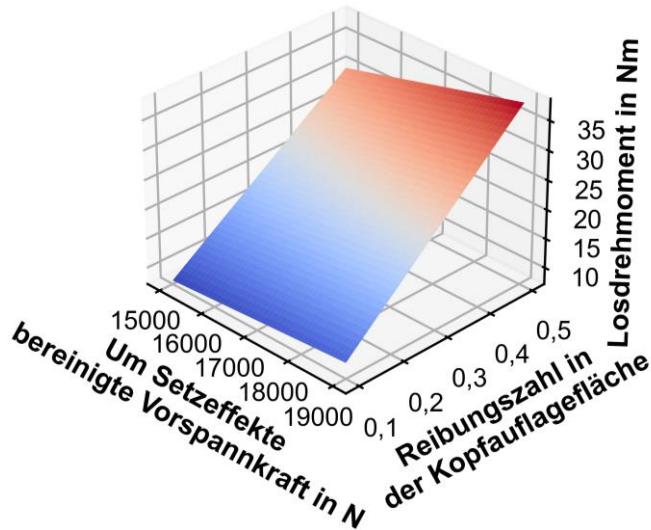


Abbildung 4-6: Losdrehmoment einer M6 10.9 Zylinderkopf-Einsteckschraube nach DIN EN ISO 4762 in Abhängigkeit der um Setzeffekte bereinigte Vorspannkraft und der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche

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 automatisierte 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-Serie⁸ angezogen. Nach der Vorbereitung der Probekörper werden die Schrauben manuell demontiert und dabei das Losdrehmoment gemessen. Für die Datenaufnahme wird ein Festool PDC 18/4⁹ Schrauber mit einem Kistler Drehmomentsensor Typ 4501A¹⁰ verwendet. Das Studiendesign basiert auf einem teilstudiellen Versuchsplan, dessen Faktorstufen in Tabelle 4-1 beschriebenen sind. Pro Versuch wird eine Schraube gemäß den Spezifikationen des Versuchsplans gelöst.

Tabelle 4-1: Faktorstufen des Versuchsplanes

| Variable | Untere Faktorstufe | Obere Faktorstufe | Untersuchung |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 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 |

⁸ Ingersoll Rand Präzisions EC Akku-Winkelschrauber Typenbezeichnung QXX2AT18PQ4

⁹ 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 [19.07.2025]

¹⁰ Kistler Instrumente AG (2022), Drehmomentsensormesswelle Typenbezeichnung 4501A020HA. www.kistler.com/DE/de/p/drehmomentsensormesswelle-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.

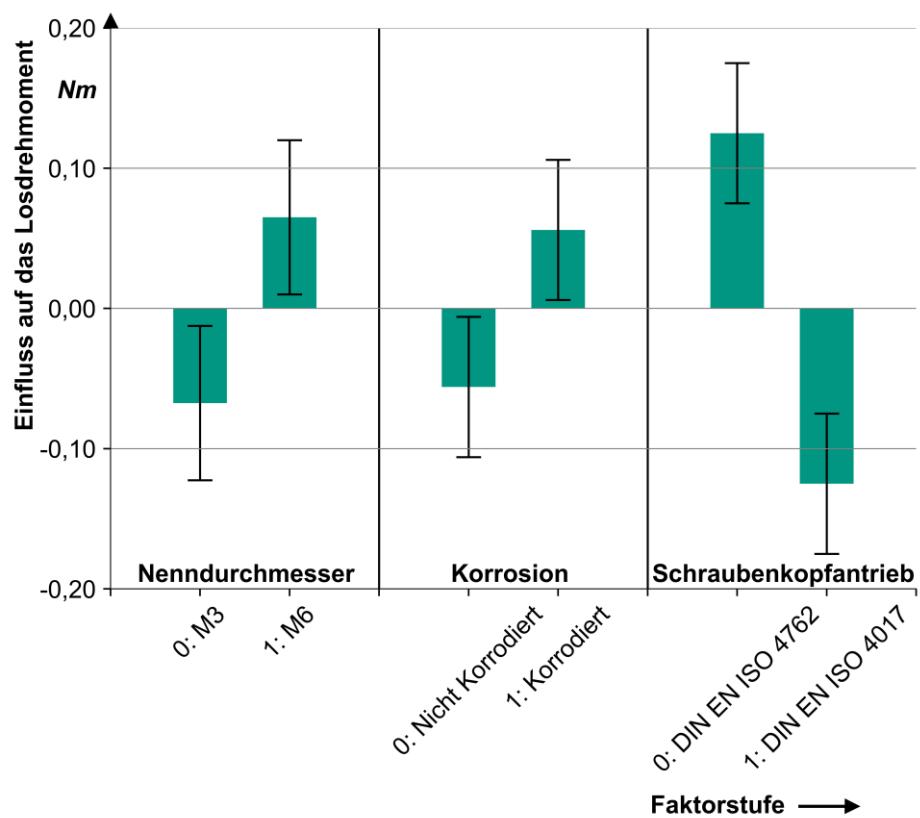


Abbildung 4-7: Effektdiagramm für die erste Untersuchung, bezogen auf ein 95 %-Konfidenzintervall

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.

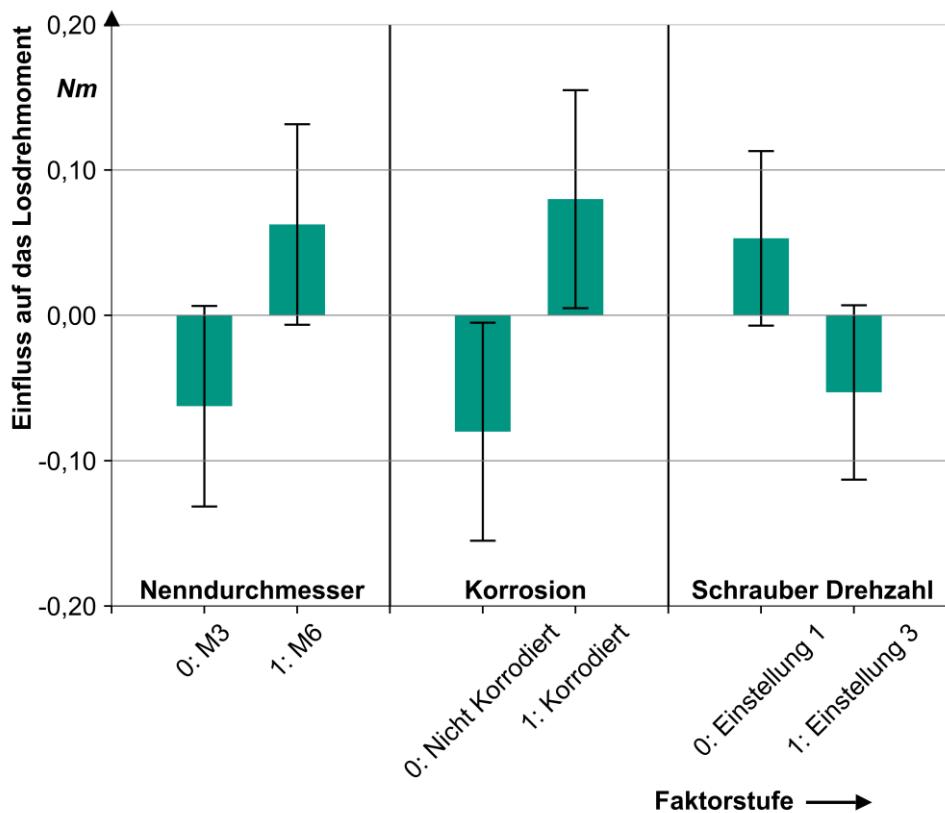


Abbildung 4-8: Effektdiagramm der zweiten Untersuchung

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.

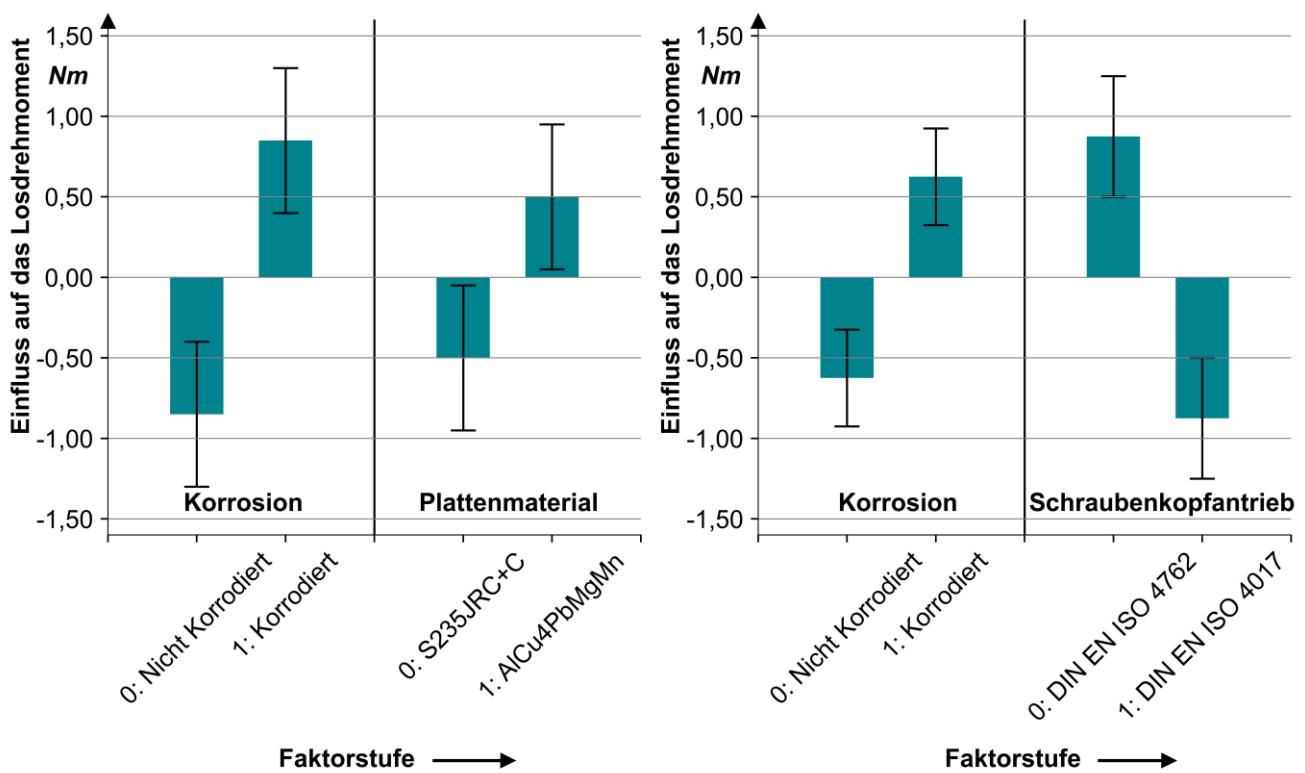


Abbildung 4-9: Effektdiagramm zu Untersuchung 3

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 sensorisch 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 rufen 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 brünierter 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-Sensor¹¹ 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 .

¹¹ ATI Industrial Automation (2019), F/T Sensor: Axia80-M20 Typenbezeichnung Axia80-M20. www.ati-ia.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.

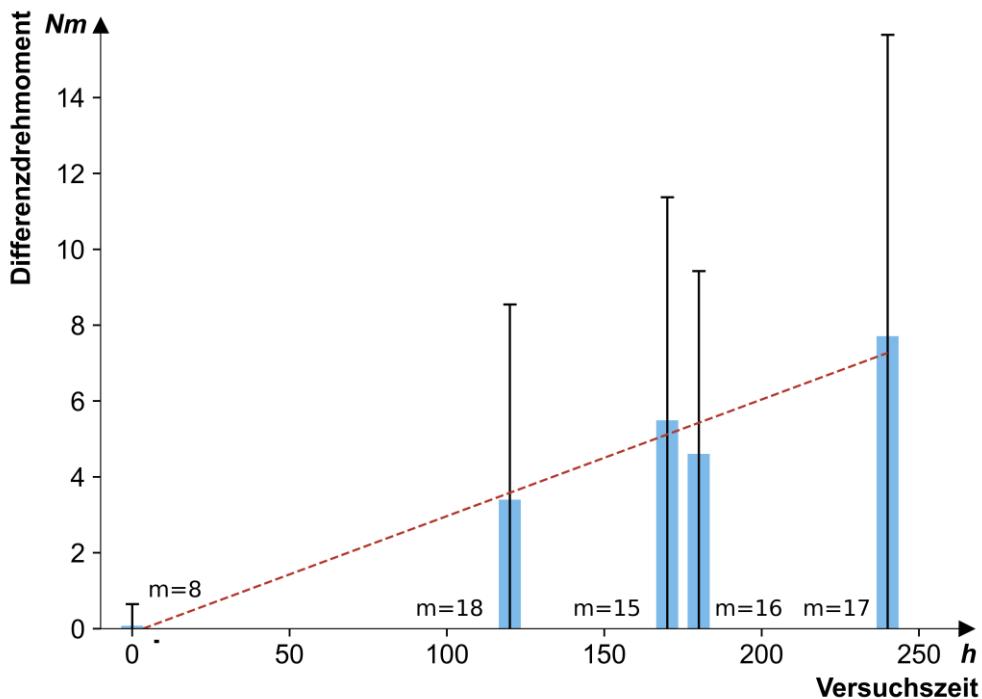


Abbildung 4-10: Differenzdrehmoment in Abhängigkeit der Versuchszeit in einer Wechseltauchprüfung

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 Berührungs punkten 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 Wechsel tauchprüfung nach dem oben genannten Setup von 120 h unterzogen wurden.



a)



b)

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 ver einzelte rötlich verfärbte Stellen ersichtlich. Des Weiteren sind kleine Kratzer in bogen förmiger Form zu sehen. Die Aufnahme legt nahe, dass 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.

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

Somit liegt eine lineare Gleichung mit einer Unbekannten vor, die das Losdrehmoment M_L in Relation mit der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche μ_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 μ_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:

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

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 150×150 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 ε berechnet werden. Die daraus abgeleiteten Messergebnisse sind in Abbildung 4-12 grafisch dargestellt.

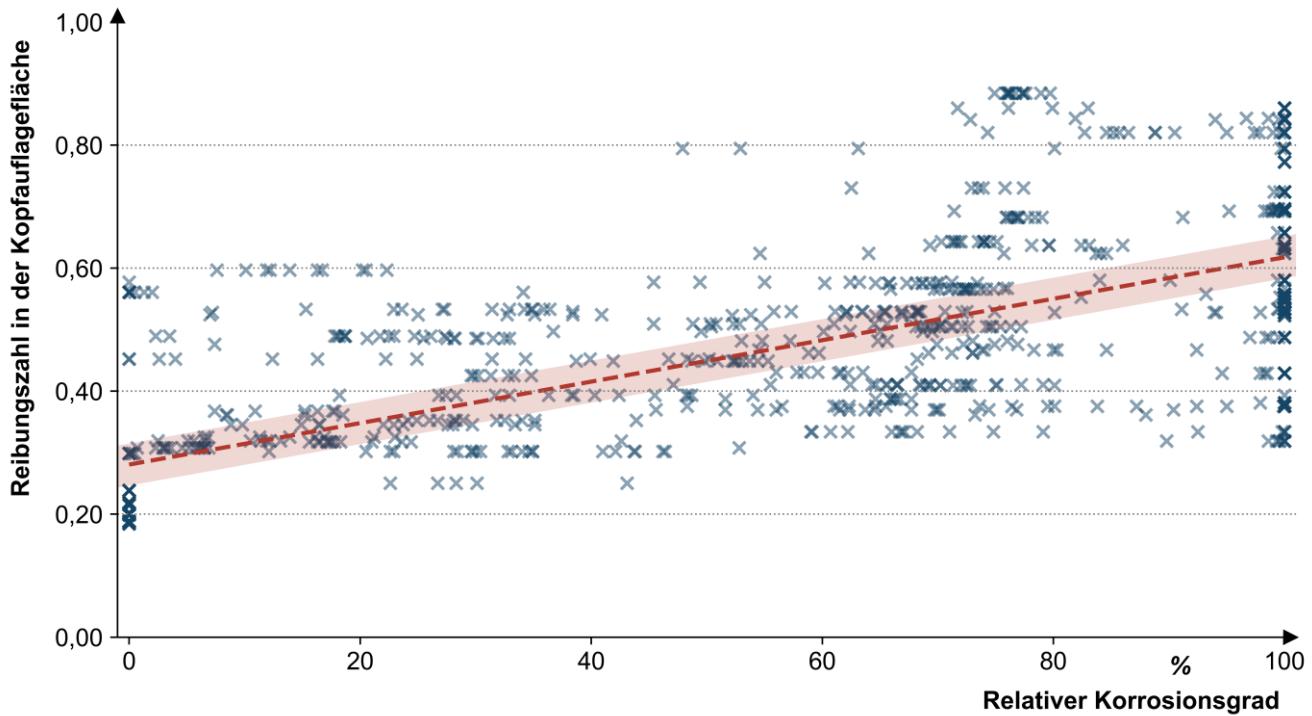


Abbildung 4-12: Zusammenhang zwischen dem relativen Korrosionsgrad und der Reibungszahl in der Kopfauflagefläche

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

$$\mu_K = 3,37004 \cdot 10^{-3} \cdot \varepsilon + 0,281 \quad \text{Formel 4-8}$$

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 durchgeföhrten 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 groÙe 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 Materialkenndaten 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 MaÙ 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 Gewindegelenks 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 τ_{max} im Bauteil. Dazu betrachtet man an dieser Stelle einen infinitesimal kleinen Torsionsstab (Dankert & Dankert, 2013, S. 361).

Hier nach 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 τ_{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

| Festigkeitsklasse | 4.8 | 8.8 | 10.9 | 12.9 | A2-70 | A4-50 | A4-70 | A4-80 |
|----------------------------|------------|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 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:

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

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

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

α = Öffnungswinkel Kraftangriffsmerkmal, siehe Abbildung 0-2 (im Anhang)

k_{ph} = Korrekturfaktor Abscherfläche, mit

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

β = 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 Versagensmoment 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 Versagensmoment 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 Gestaltinformationen 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-Standard¹² 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 Kopfauflage μ_K , die statische Reibungszahl im Gewinde μ_G , die dynamische Reibungszahl in der Kopfauflage, 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

| Attributes (Attribute) | Type (Typ) | Value Space (Parameterraum) | Status (Status) | Constraint (Einschränkung) |
|----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| timestamp | Alphanumeric | Alphanumeric | Optional | - |
| plate_material | Alphanumeric | 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 | - |

¹² 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- \[19.07.2025\]](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 Kopfaulagefläche 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 Abnutzungsscheinungen 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 Kopfaulagefläche 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 Abnutzungsscheinungen. 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 Abnutzungsscheinungen 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.

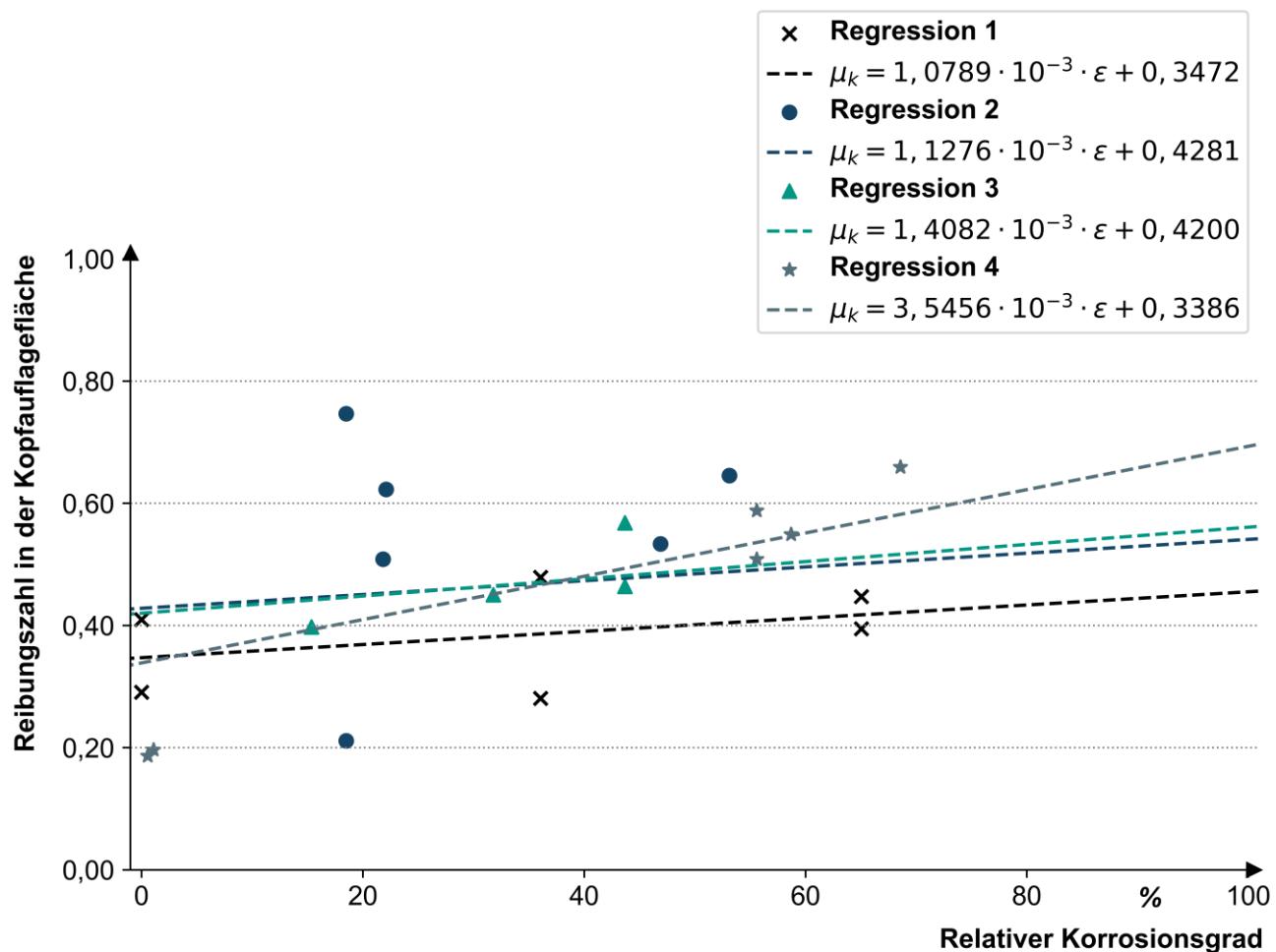


Abbildung 4-15: Verbesserung der Regression mit zunehmender Anzahl an Demontagenvorgängen

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 Demontagenvorgängen 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.

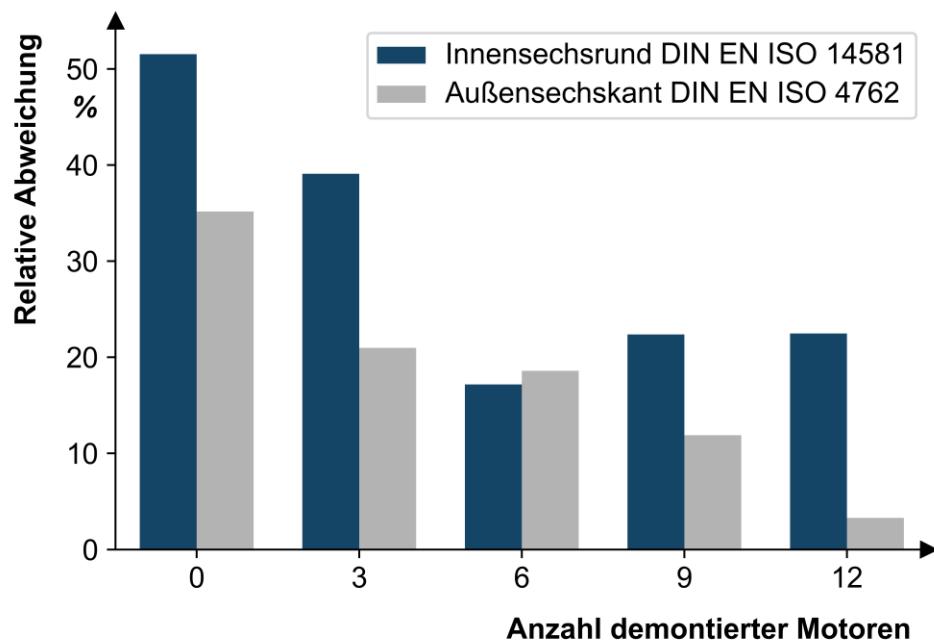


Abbildung 4-16: Validierung Modell Losdrehmoment

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, gekontrahiert verschraubt und in einen Schraubstock eingespannt. Mit einem digitalen Drehmomentadapter des Herstellers KS Tools Werkzeuge und Maschinen GmbH¹³ 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 ATI¹⁴ 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

| Schraubenklasse | Anzahl |
|-----------------|--------|
| M3 8.8 | 5 |
| M4 8.8 | 5 |
| M6 8.8 | 5 |
| M6 A2-70 | 5 |
| M6 12.9 | 5 |
| M8 8.8 | 5 |

¹³ 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-zylinderkopf-motorblock/werkzeuge-fuer-zylinderblock-verschraubungen/digitaler-drehmomentadapter-mit-winkelmesser?number=516.1194> [19.07.2025]

¹⁴ ATI Industrial Automation (2019), F/T Sensor: Axia80-M20 Typenbezeichnung Axia80-M20. www.ati-ia.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.

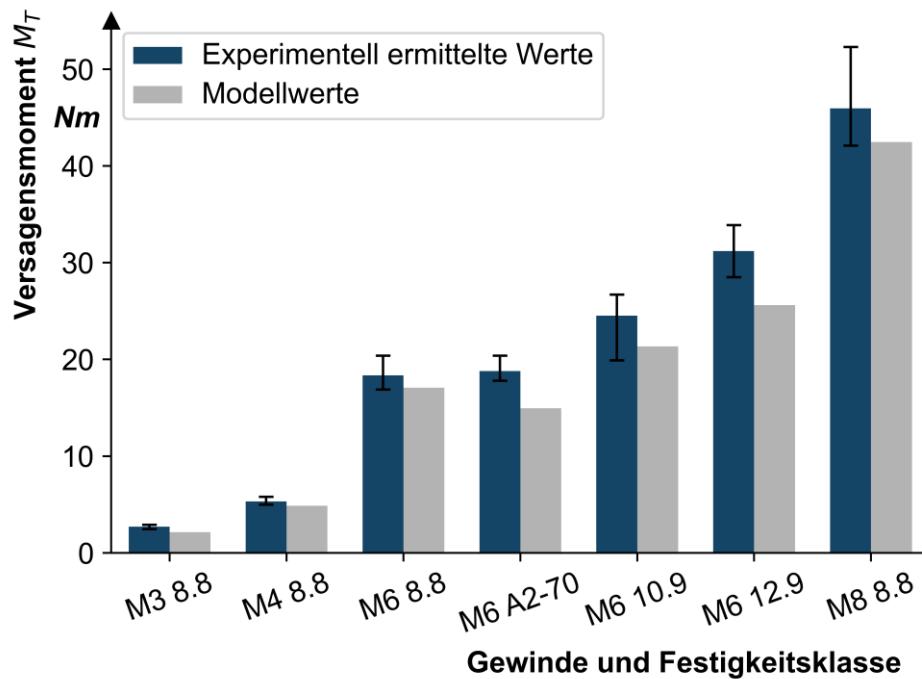


Abbildung 4-17: Ergebnisse zum Bruch infolge einer Torsionsbeanspruchung

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, dass 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

| Schraubenkopfantrieb | Gewindegröße | Festigkeitskl. | Anzahl |
|-------------------------------|--------------|----------------|--------|
| 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.

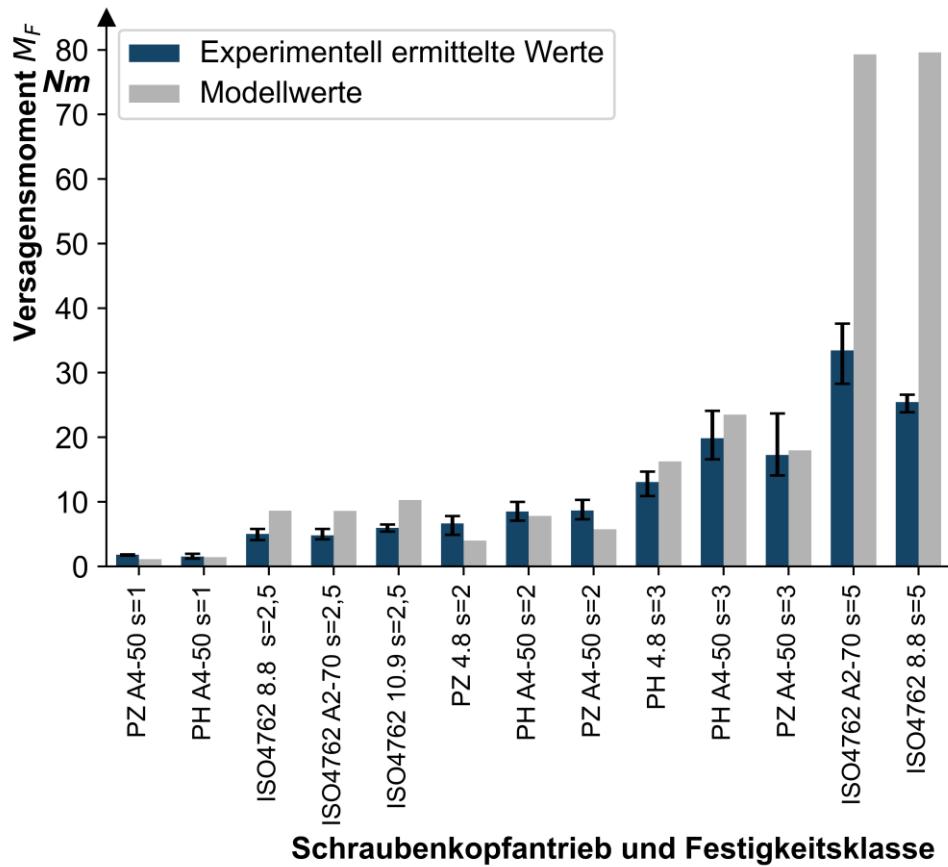


Abbildung 4-18: Drehmomentwerte für das Versagensmodell Flankscheren mit $k_{bit} = 1$ und $k_{ph} = 1$

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 Momenteneinbringung 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.

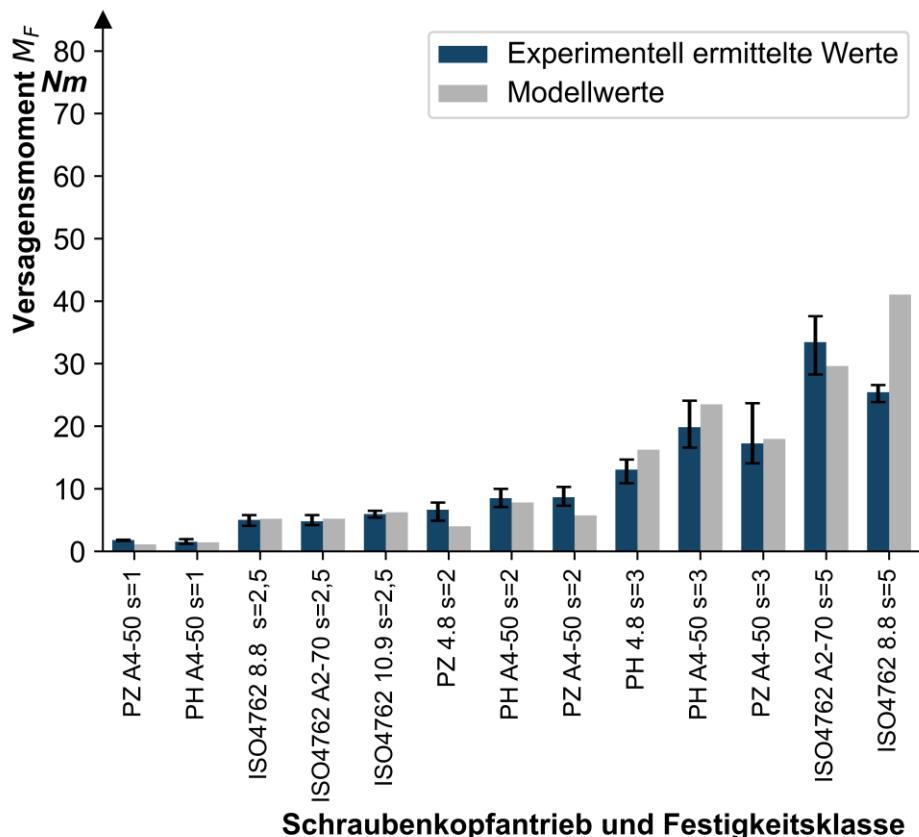


Abbildung 4-19: Drehmomente für das Flankenscheren unter Berücksichtigung der Spaltmaße mit $k_{bit} \neq 1$ und $k_{ph} = 1$

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.

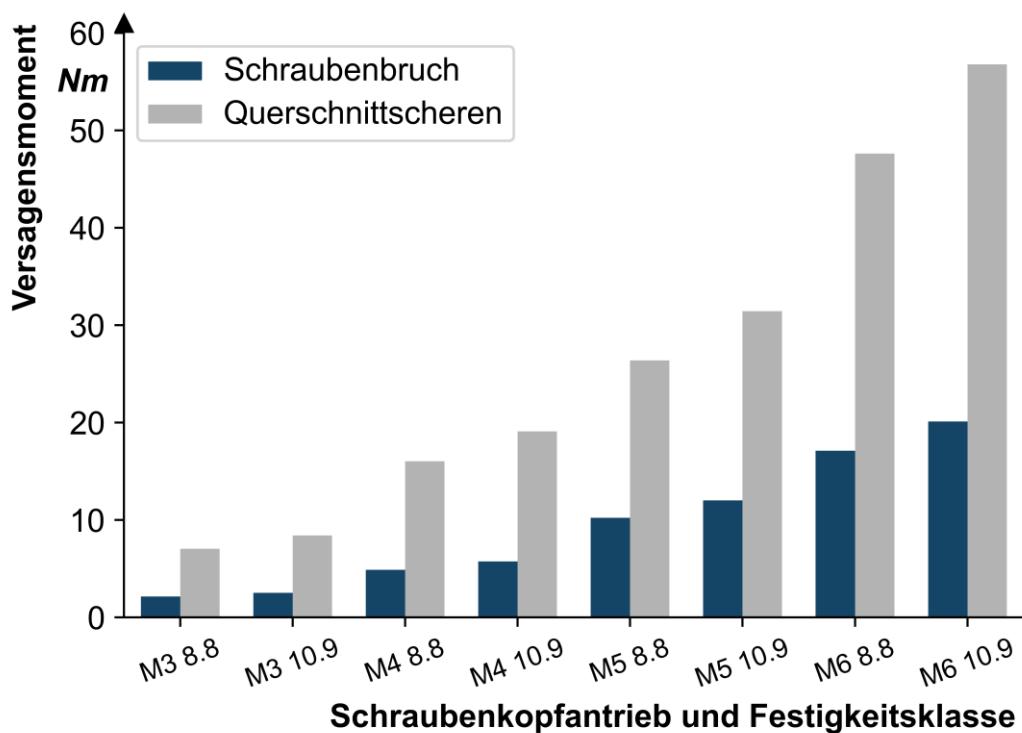


Abbildung 4-20: Vergleich Querschnittsscheren und Schraubenbruch

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 Bauenteile 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 Punktewolken. 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 Abnutzungerscheinungen 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.

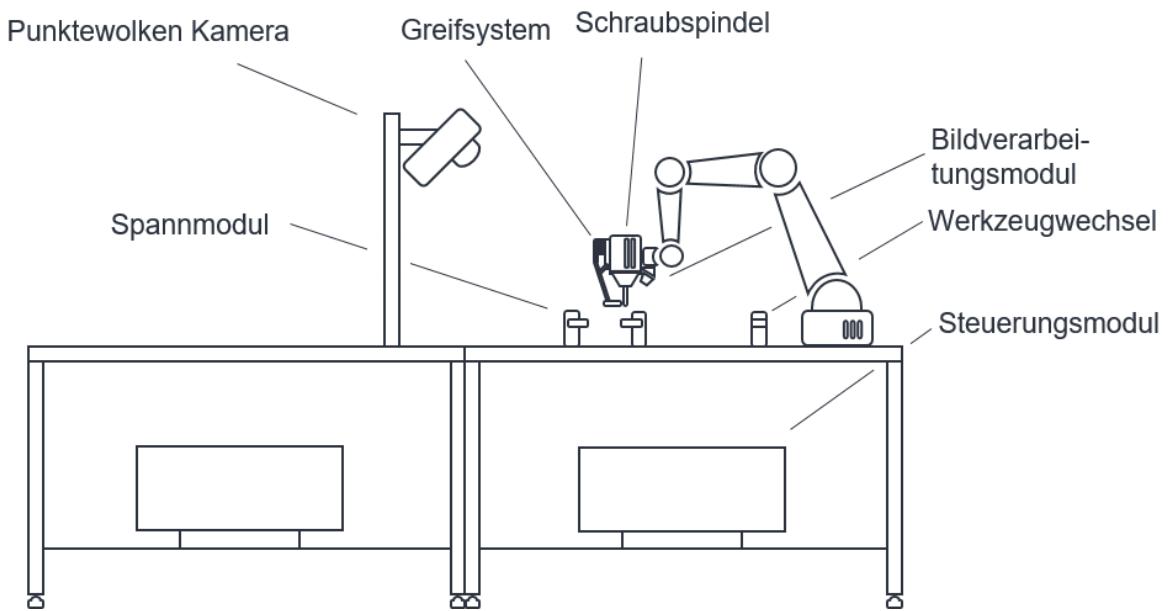


Abbildung 5-2: Systemkonzeption in Teilmodulen

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).

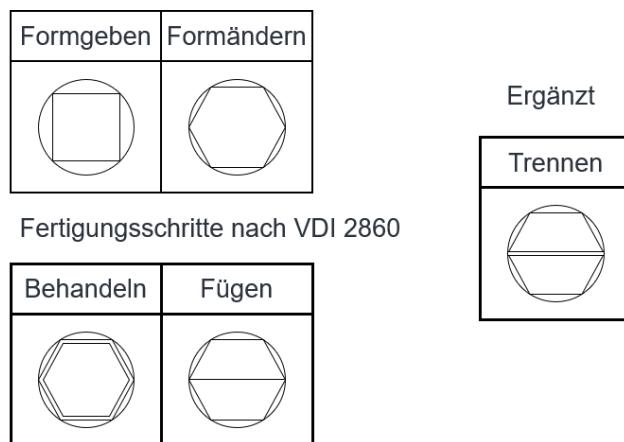


Abbildung 5-3: Symbolische Darstellung von Fertigungsschritten (eigene Darstellung in Anlehnung an (Härtwig, 2005, S. 99))

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.

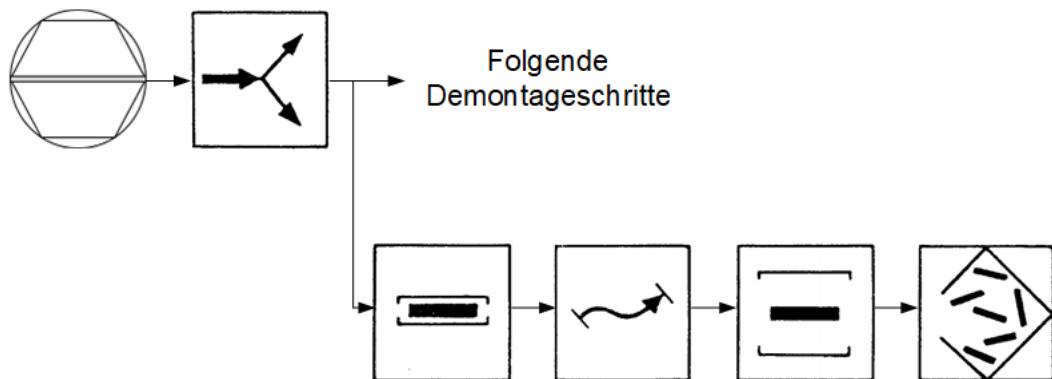


Abbildung 5-4: Funktionsumfang von Modul 1

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 Formschlussherstellung zwischen Schraubenkopfantrieb und Schrauberklinge 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 Schrauberklinge hergestellt ist. In der vorliegenden Arbeit soll die Formschlusserstellung zwischen Schraubenkopfantrieb und Schrauberklinge 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 Lateralenkraft 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.

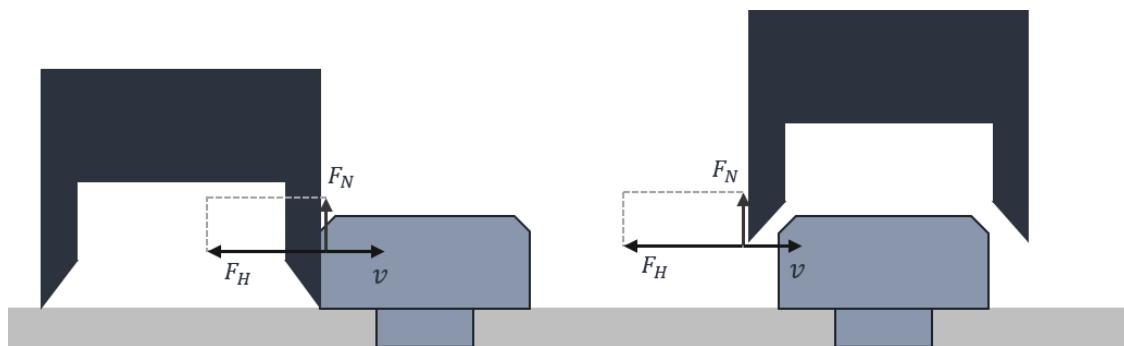
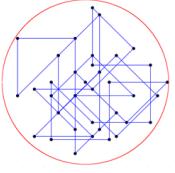
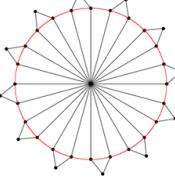
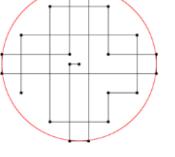
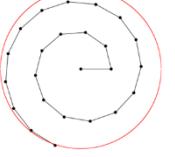
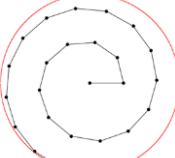
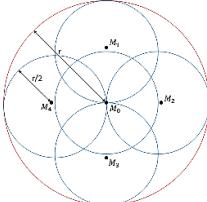
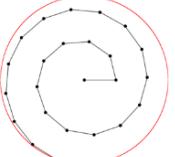


Abbildung 5-5: Kräfteverhältnis am TCP bei Bewegung entlang des Schraubenkopfes, nach (A_Felk, 2022)

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 Erfolgs- chance |
|--|---|--|---|-------------------------------------|
| Sukzessive Approximation ohne Anheben (Nave, 2003, S. 74) |  | Zufällig gesampelte Werte im Suchradius | T20: 26,58 s T25: 115,81 s SK7: 69,55 s | T20: 20 % T25: 40 % SK7: 30 % |
| Linearschwingung um den Mittelpunkt (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 % |
| Lissajous Figur (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 % |
| Spiralsuche (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 % |
| Spiralsuche mit Normalkraft (Gerbers et al., 2016; R. Li et al., 2020) |  | Archimedische Spirale mit Normalkraftregelung | Nicht Betrachtet, (Linsenkopf der Schrauben) | - |
| Quadranten-Spiralsuche (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 % |
| Spiralsuche mit lateraler Kraft (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 Gewindegängen mechanisch geführt werden. Um die Störkontur des Aufbaus zu minimieren, soll das Teilsystem die Möglichkeit besitzen, bei Nichtgebrauch aktuiert in eine Warteposition 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

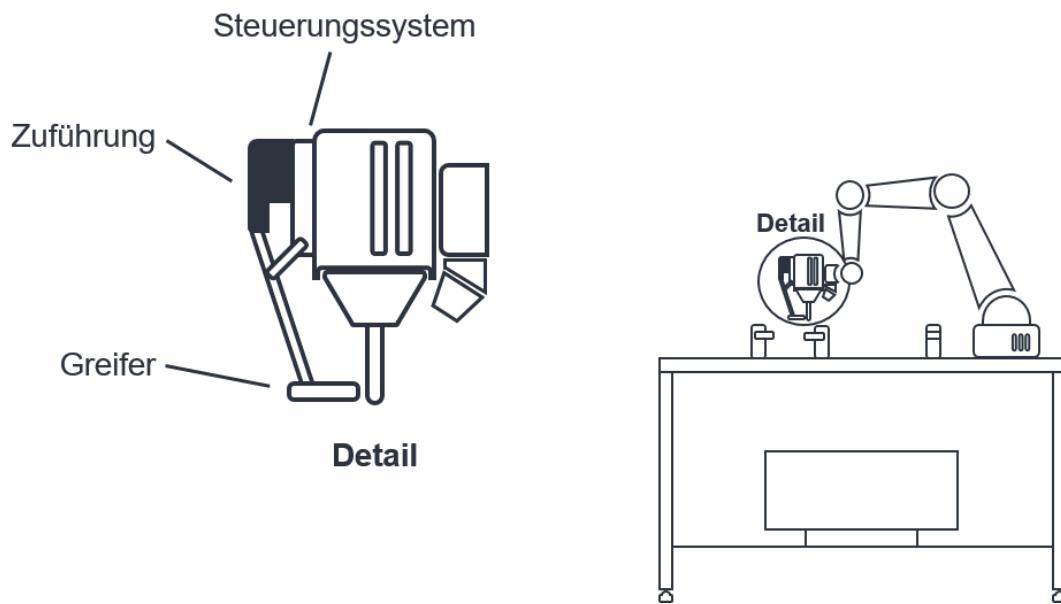


Abbildung 5-6: Konzept des Greifers

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.

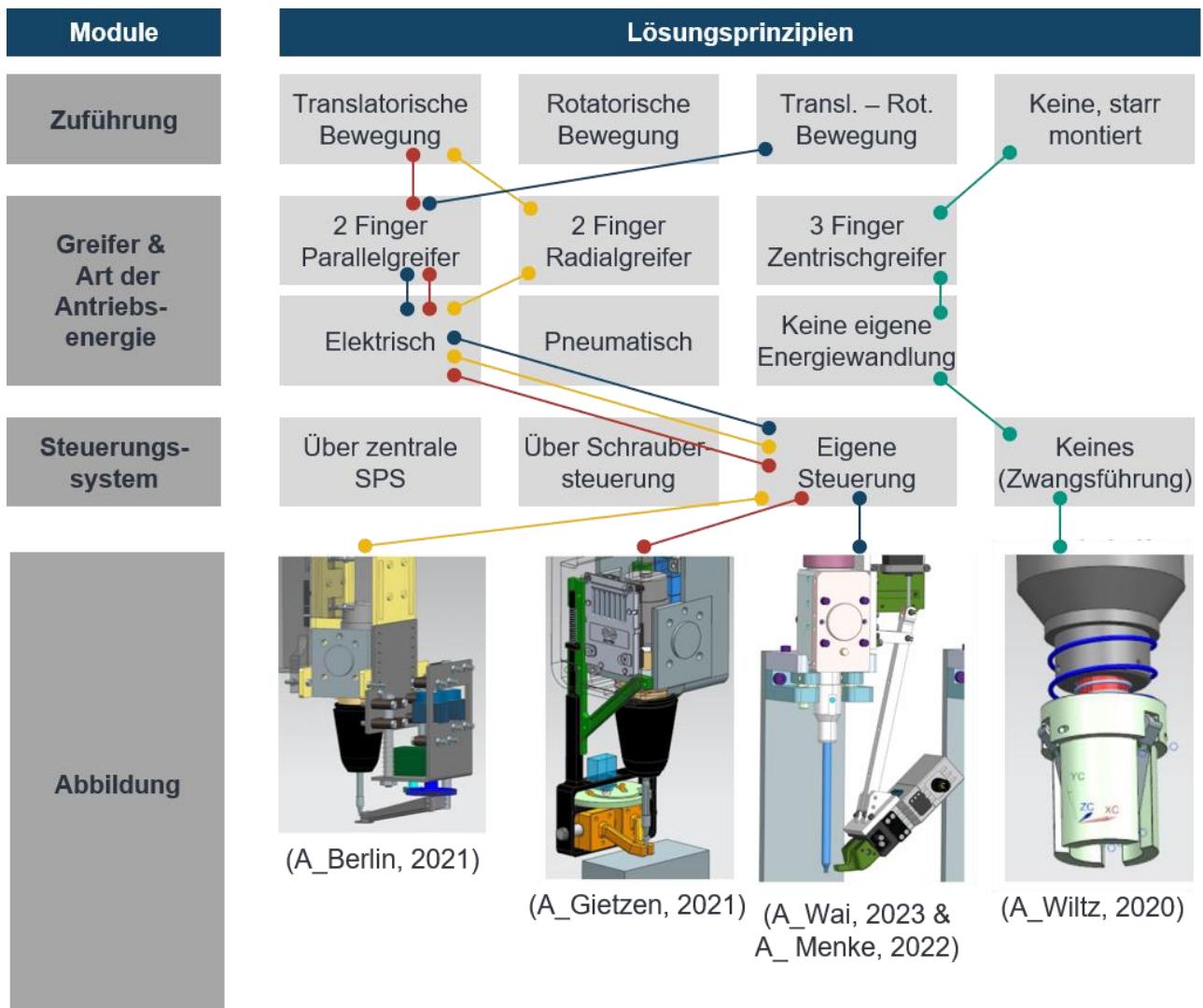


Abbildung 5-7: Lösungsalternativen für das Greifsystem

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.

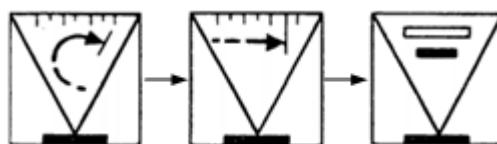


Abbildung 5-8: Funktionsumfang von Modul 2

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 15×15 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 1280×720 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:

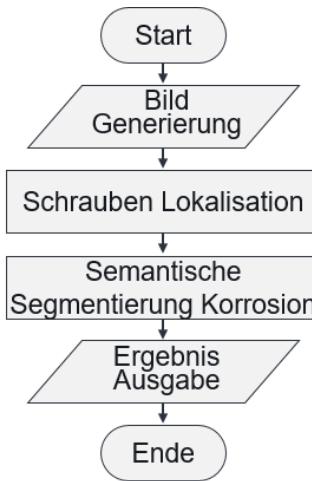


Abbildung 5-9: Ablauf der Bildverarbeitung

Im Rahmen von experimentellen Vorversuchen wurden für den Algorithmus zur Lokalisierung 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 640×640 Pixel herunterskaliert. Bei dieser Bildgröße haben die Features typischerweise Größen von 25×25 Pixeln. Anschließend werden zufällig ausgewählte Bilder gespiegelt und gedreht. Der Farnton wird um –20 % bis 20 % verändert, die Sättigung um –20 % bis 20 % und die Helligkeit um –15 % bis 15 % angepasst. Der Begriff *Farnton* 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

| YOLOv5s mit SGD-Optimierungsalgorithmus | | | | |
|--|------------------|---------------|----------------|---------------------|
| Klasse | Precision | Recall | mAP@0.5 | mAP@0.5:0.95 |
| 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 |
| Gesamt | 0,988 | 0,921 | 0,978 | 0,727 |

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 150×150 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 256×256 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.

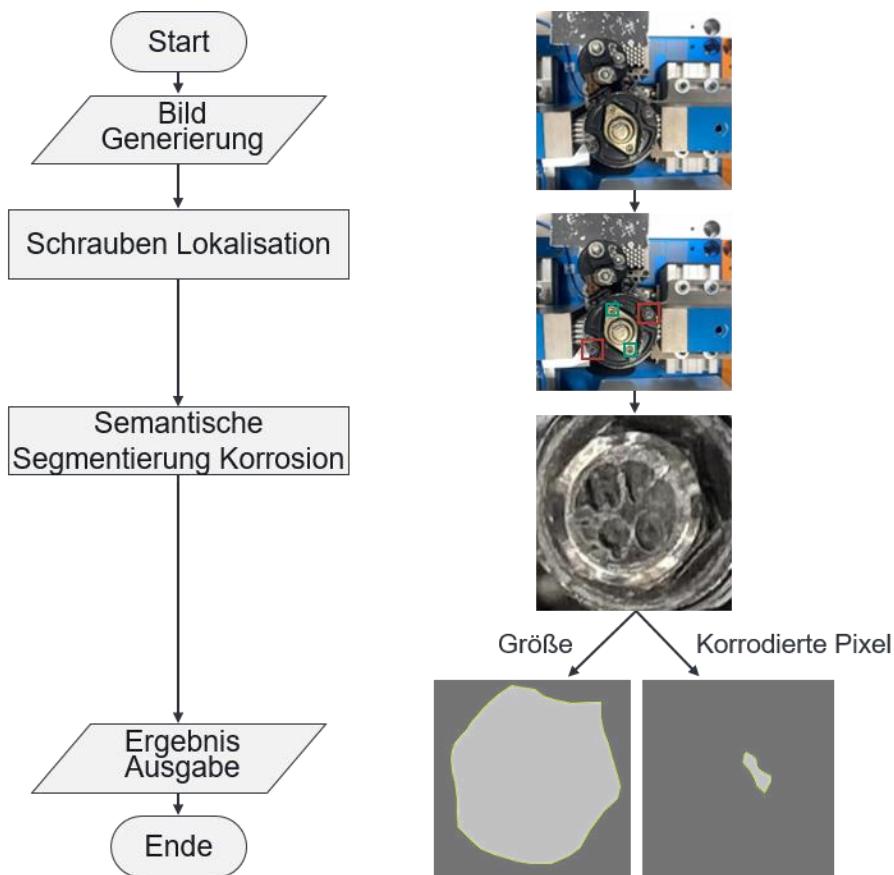


Abbildung 5-10: Ablauf der Bildverarbeitung mit Beispielen

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

allem 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: Kennwerte der verglichenen Architekturen

| Architektur | Aufgabe | mIoU | mPA | Accuracy | Laufzeit |
|------------------------|-------------|-------|-------|----------|----------|
| 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

| Softwaremodul | Funktionsumfang / Beschreibung |
|---|---|
| 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 Punktewolken-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 Punktewolken-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.

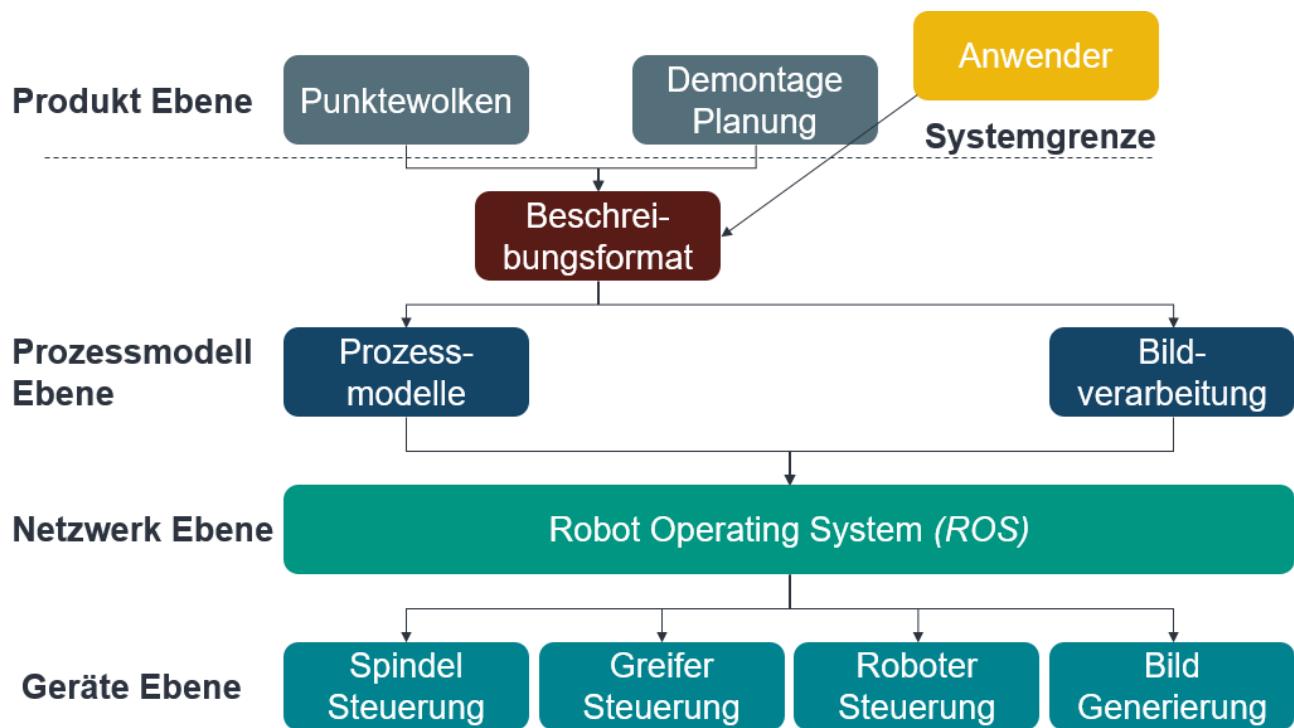


Abbildung 5-11: Aufteilung und Interaktion der Teilsysteme

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.

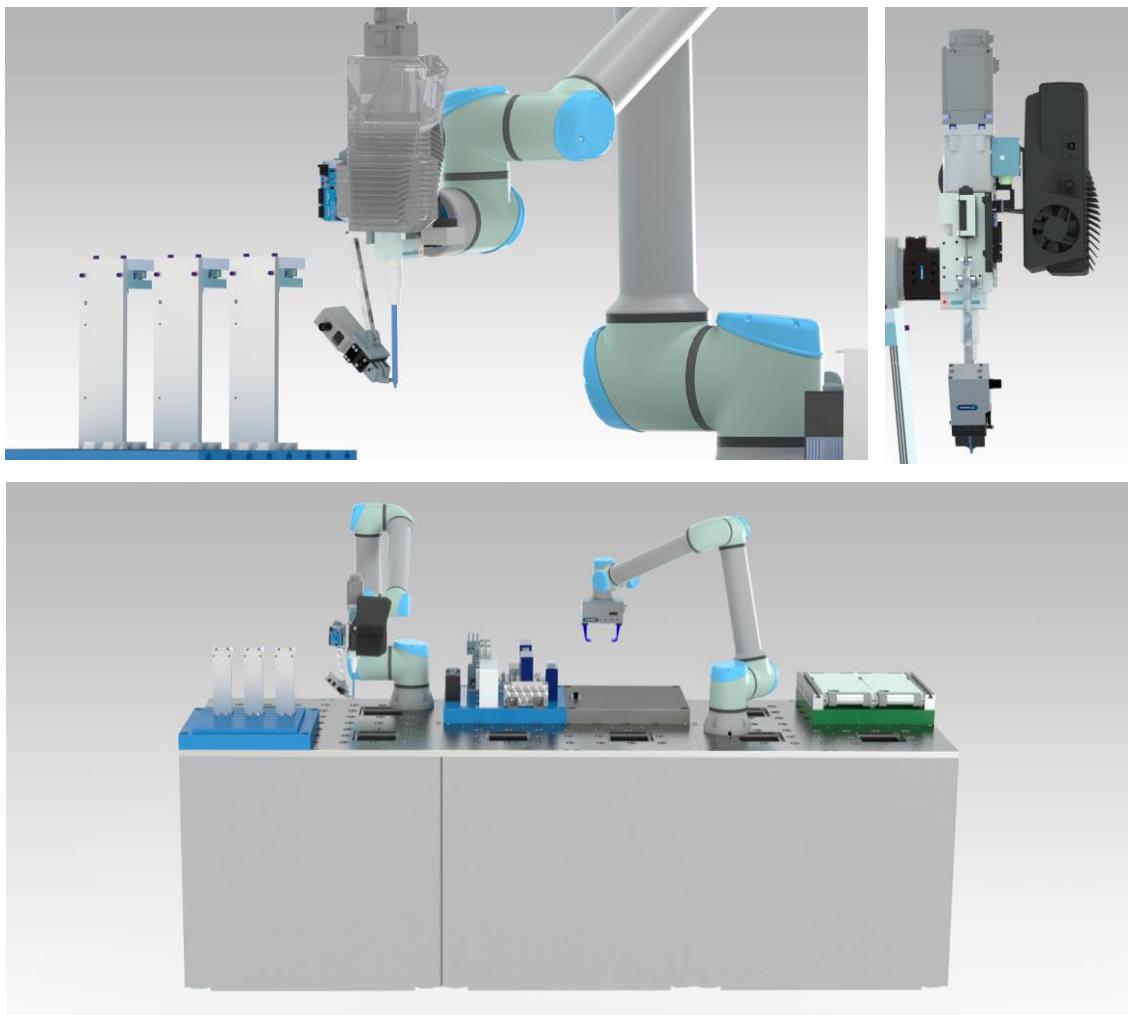


Abbildung 6-1: CAD-Modell der Demontagezelle

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 Schrauberklinge an die Geometrie der Schraubenkopfantriebe angepasst (Bild (c) bis Bild (e)). Mit der endeffektorgeführten Kamera und dem Bildverarbeitungsmodul wird dann die Schrauberklinge 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)).

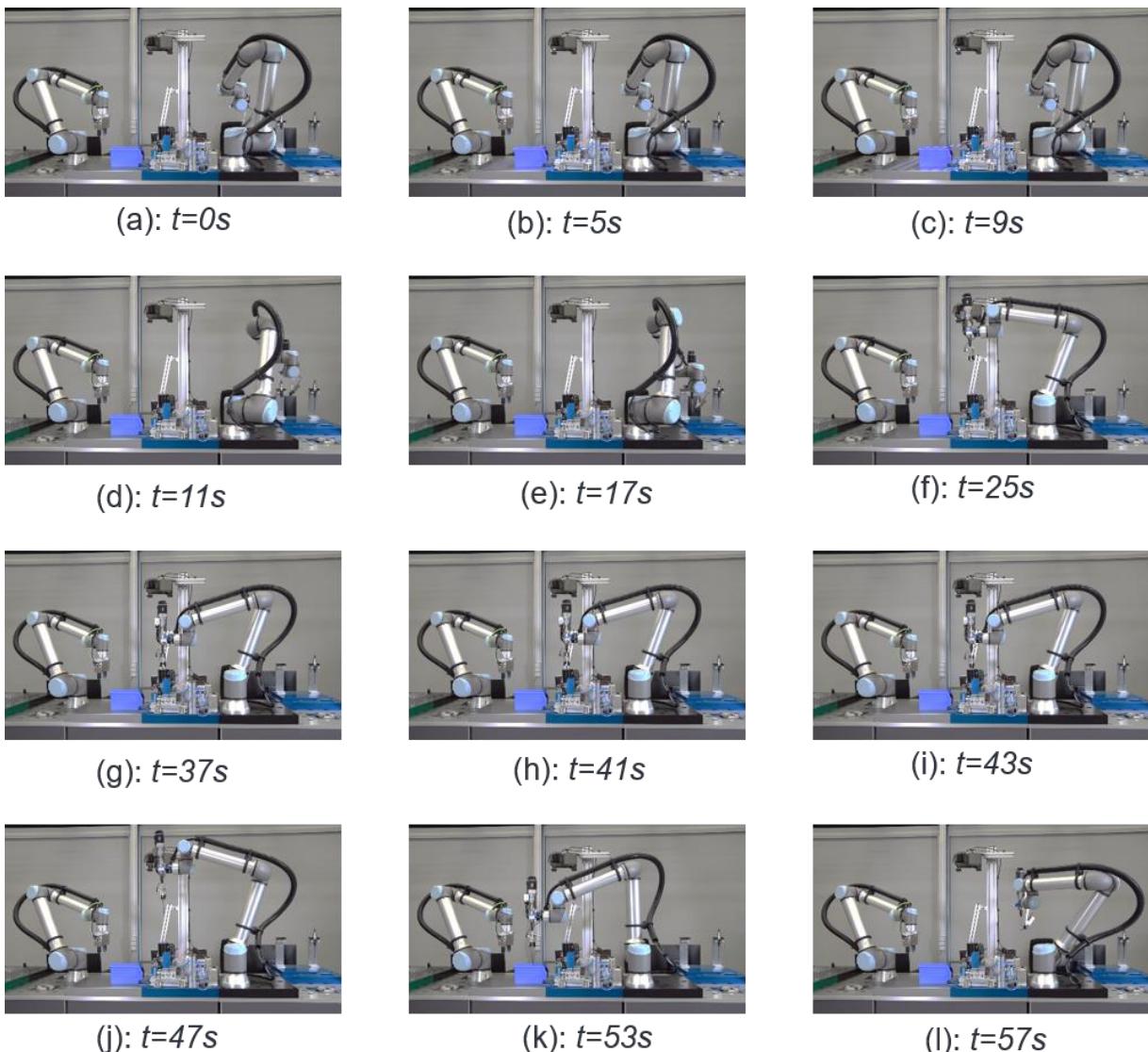


Abbildung 6-2: Ausführung der Demontageaufgabe mitsamt Werkzeugwechsel

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 Schraubautomaten¹⁵. 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 Schrauberklingen 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 unteraktivierte 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 MightyZap¹⁶ 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 SCHUNK¹⁷ lassen sich Griffweiten von 1 mm bis 8 mm realisieren.

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

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

¹⁷ 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 [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.

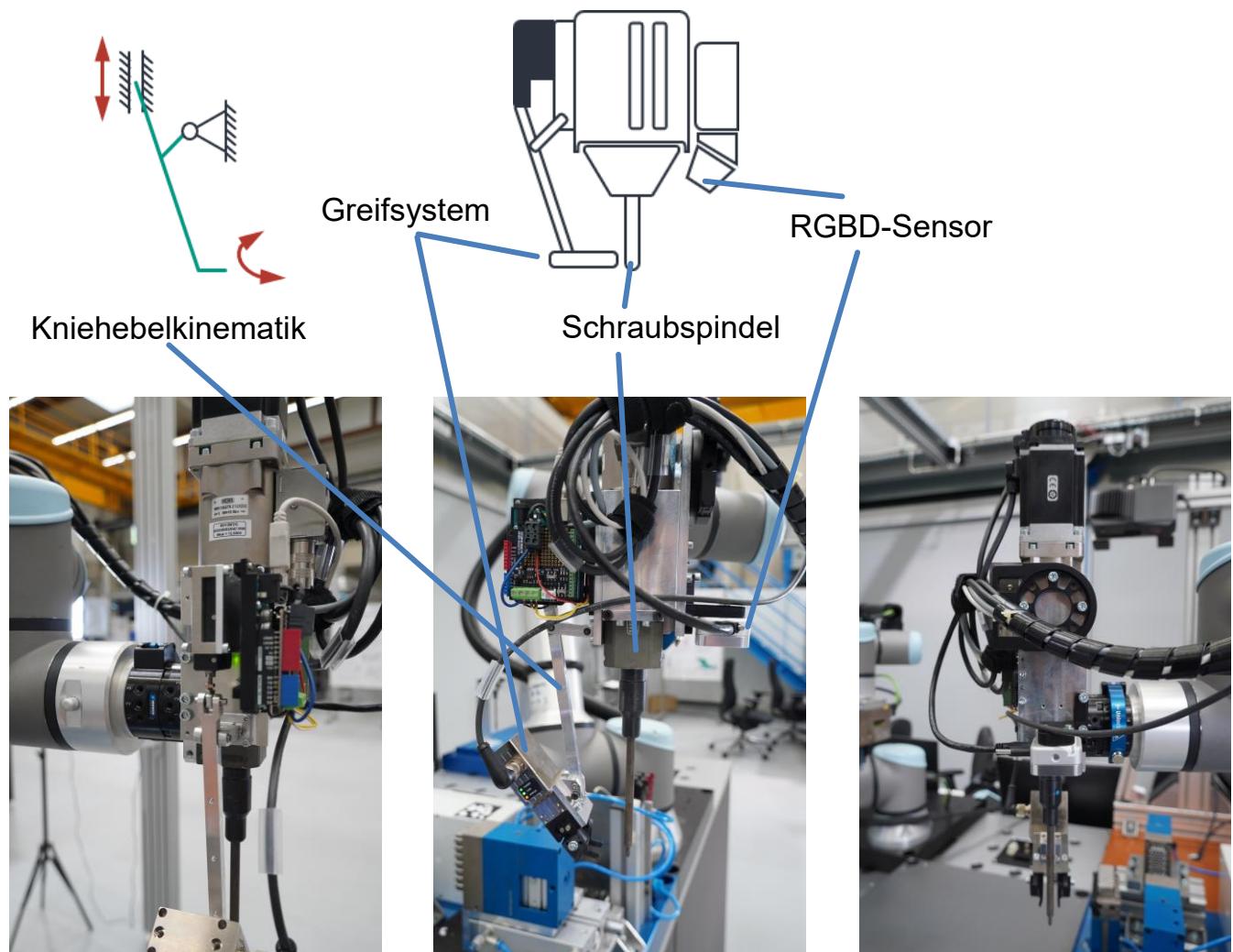


Abbildung 6-3: Realisiertes Endeffektormodul

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 1280×720 Pixeln für die Bildinformationen und 1280×720 Pixeln für die Tiefeninformationen verwendet¹⁸. Das Kamerasystem ist mit Autofokus-Funktionalität ausgestattet. Die beiden Bildverarbeitungsalgorithmen (Lokalisierung 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

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

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

Tabelle 6-1: Detektionsgenauigkeit in einer Feldstudie

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

Bei der Visual-Servoing-Aufgabe dient der RGBD-Sensor als visueller Input für die Aus-richtung 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-Daten-strom wird an das YOLO-Netzwerk gesendet, um die Schraubenerkennung durchzu-führen. Der Tiefendatenstrom wird mit den Erkennungsergebnissen des YOLO-Netz-werks fusioniert, sodass die Ausrichtung des Endeffektors berechnet werden kann. Auf-grund 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 Schrauber-klinge 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 De-montageaufgabe 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.

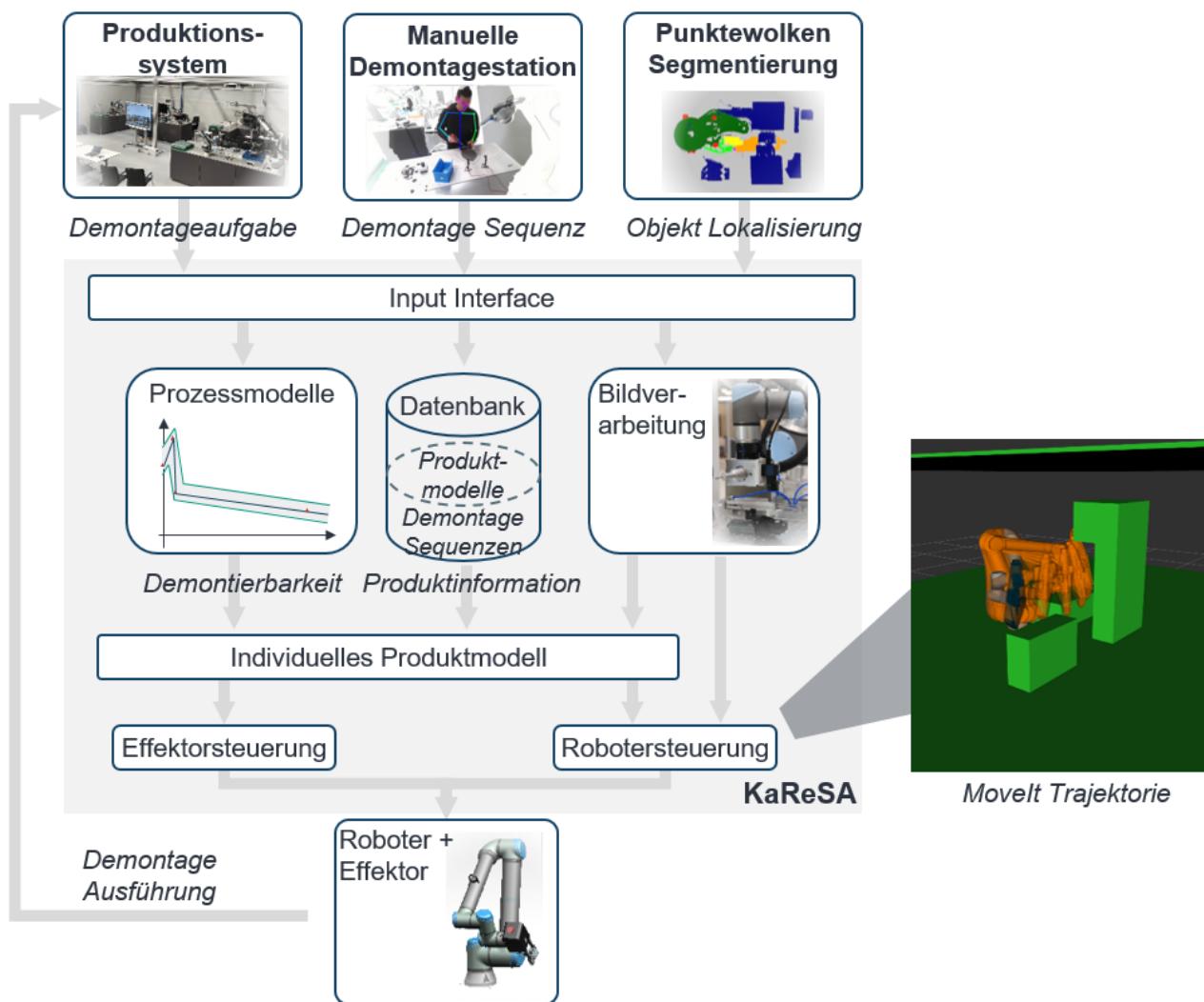


Abbildung 6-4: Systemarchitektur der Demontagezelle, nach (Mangold, Mata et al., 2023)

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 MoveIt¹⁹ verwendet und die Interaktion mit der Roboterhardware nutzt das *Real-Time Data Exchange* (RTDE) Protokoll²⁰ 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.

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

²⁰ 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]

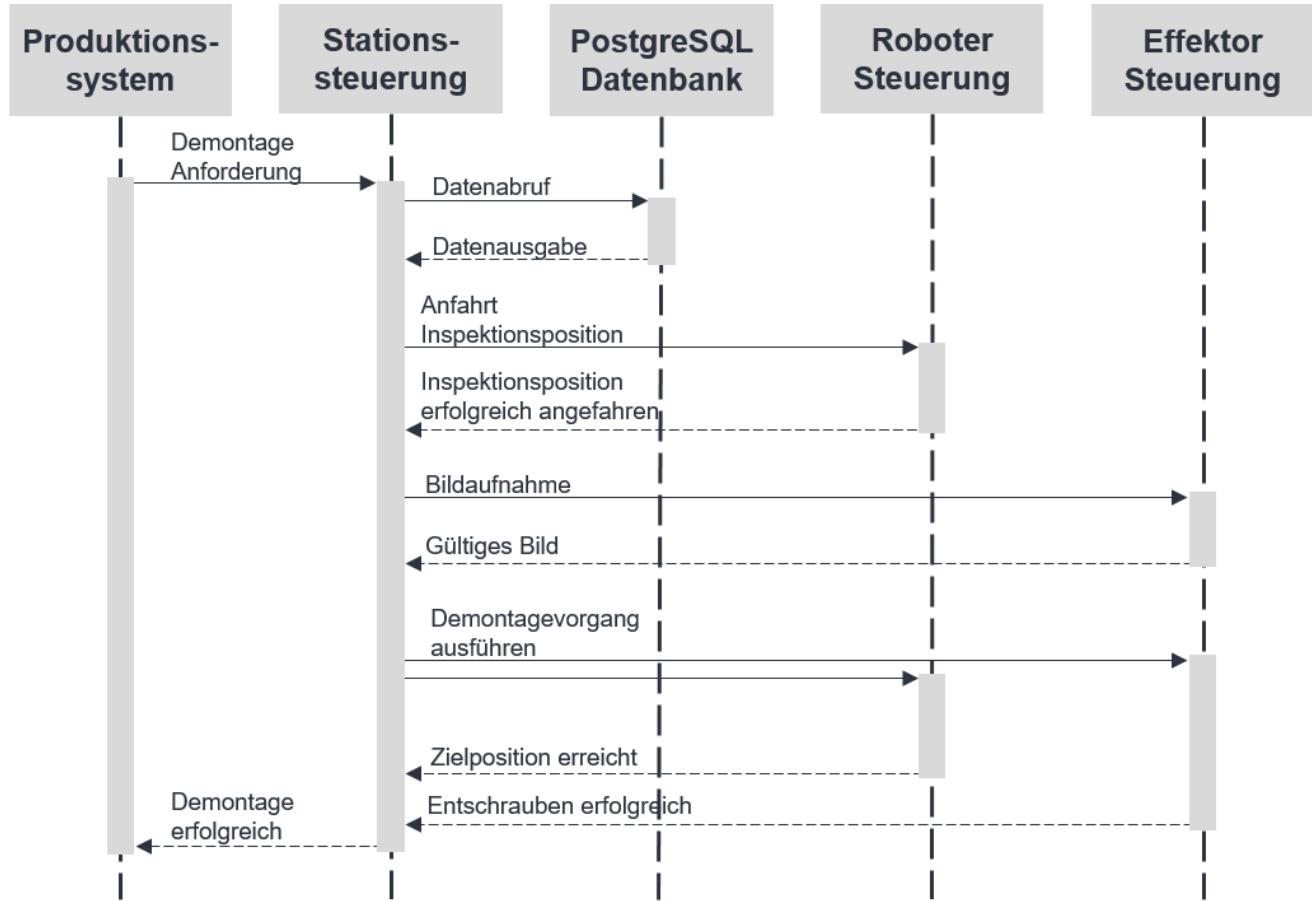


Abbildung 6-5: Demontage-Informationsfluss

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 Demontagezelles 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 Formschlusslerstellung 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.

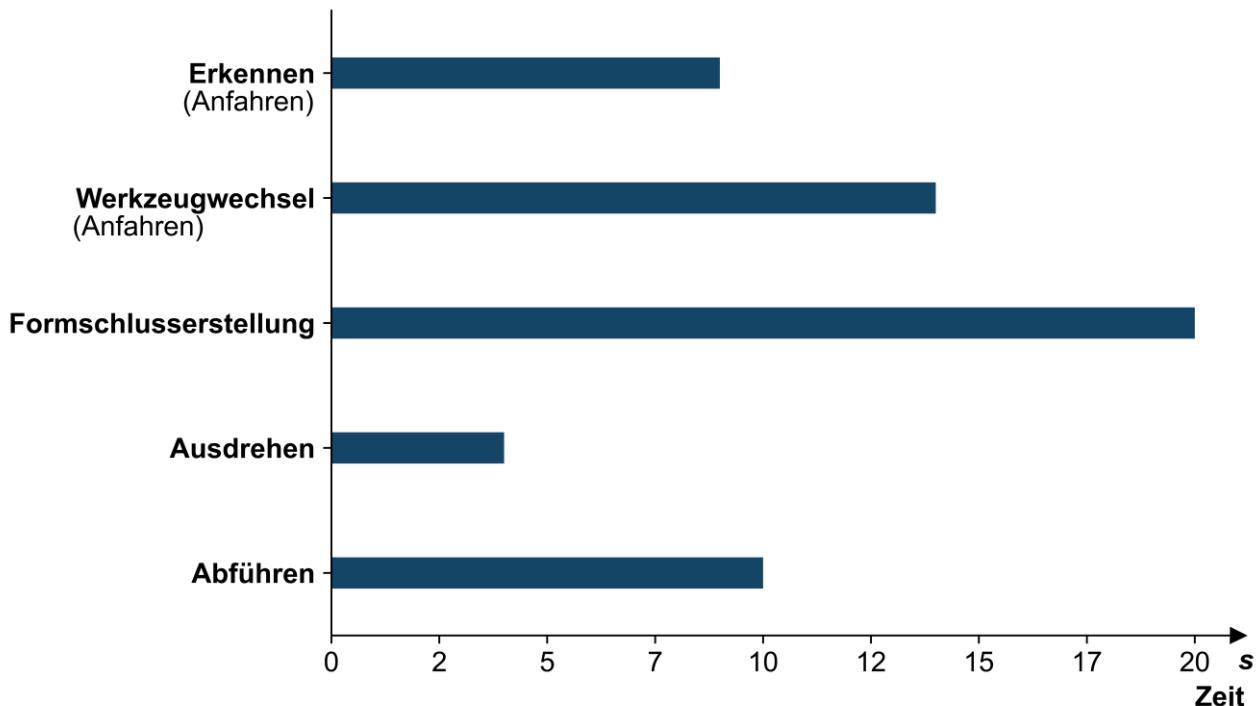


Abbildung 7-1: Prozesszeiten eines automatisierten Entschraubvorgangs, aufgeteilt nach dem Trennprozessmodell Zerlegen von Schraubverbindungen

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.

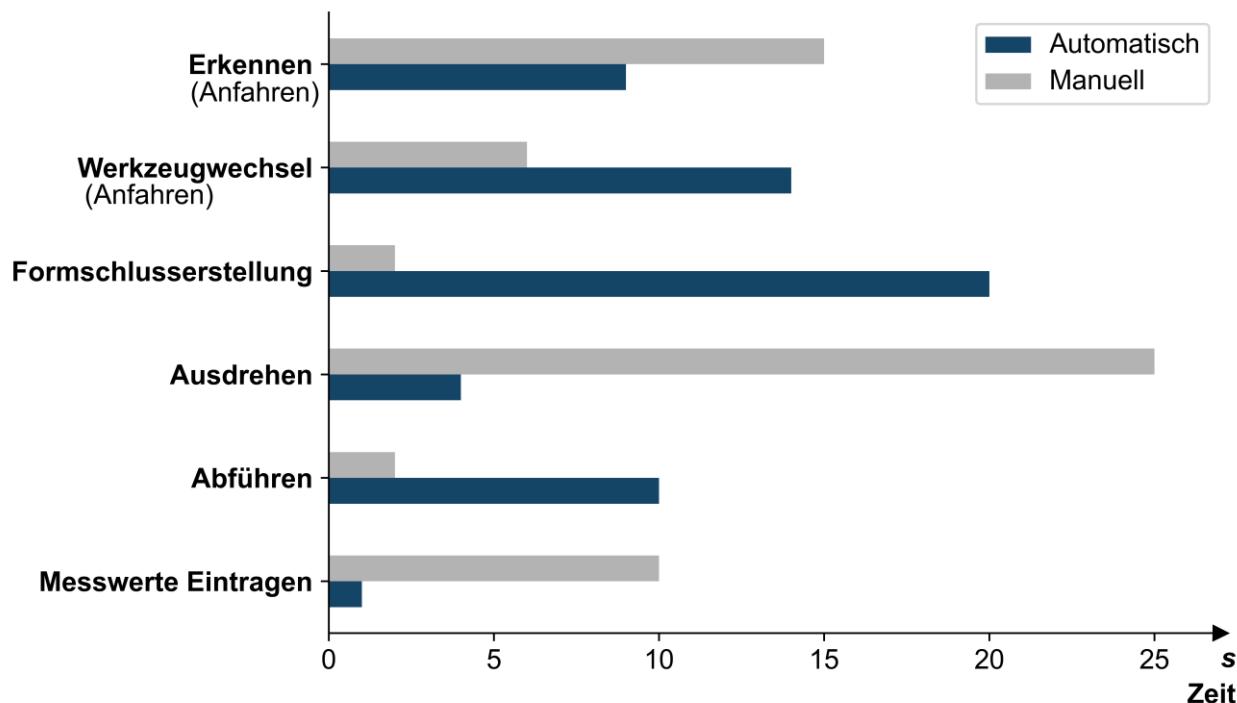


Abbildung 7-2: Prozesszeiten eines automatisierten Entschraubvorgangs im Vergleich zu einer manuellen Prozessdurchführung

Der direkte Vergleich zeigt wesentliche Unterschiede bei der Formschlusserestellung und dem Ausdrehen. Während der menschliche Werker das Werkzeug sehr schnell im Vergleich zur automatisierten Demontagestation in Form schluss 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 fortlaufender 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.

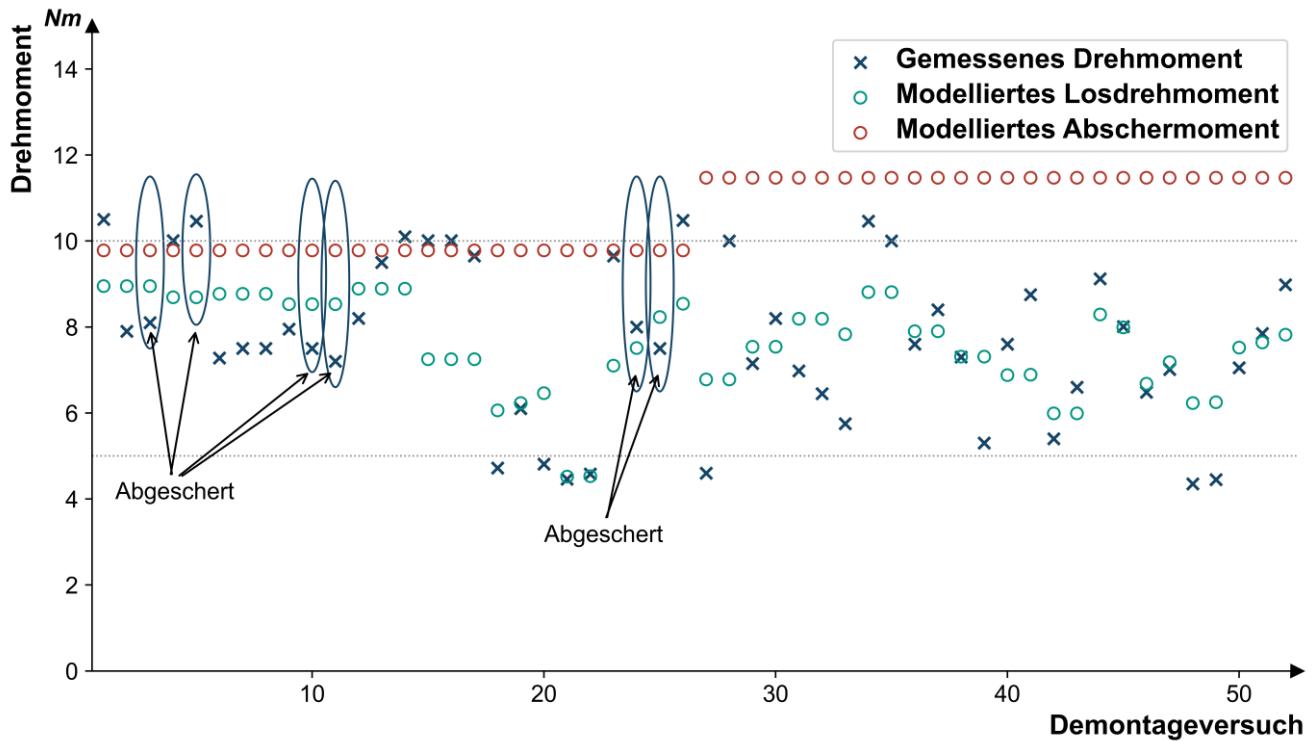


Abbildung 7-3: Bewertung der Performanz der Demontierbarkeitsanalyse

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 sensoriell 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 Kopfaulagefläche 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 Schraubenausleitung 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 Produktions-technik.

(A_Felk, 2022)

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

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktions-technik.

(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 Produktions-technik.

(A_Gietzen, 2021)

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

Bachelor Thesis. Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktions-technik.

(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 Formschlusslerstellung 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 Produktions-technik.

(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 Produktions-technik.

(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 Produktions-technik.

(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 Produktions-technik.

(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 Unscrewing 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.

(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*

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/IREE.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.boschaf-termarket.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/Pools/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.
- (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 Zerteilten: Einordnung, Unterteilung, Begriffe* (DIN 8588). Berlin. Beuth Verlag GmbH.

(DIN 267-27)

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (01.10.2023). *Mechanische Verbindungs-elemente: 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 Spangen: 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: Wechseltauchprüfung 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

(ECLASS e.V., 2023)

ECLASS e.V. (2023). *Enable your global business and digitization.* www.eclasseu
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#document_2.

(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-Schlagbohrschauber 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). *Robotomanipulationsfähigkeiten 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/AM.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

(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.

(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

(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, robotergestützen 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/ 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 Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Jungbluth, 2019)

Jungbluth, J. (2019). *Entwicklung eines intelligenten, robotergestützten Assistenzsystems für die Demontage industrieller Produkte* [Dissertation]
Université 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.

(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 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 Zuletzt geprüft am 19.07.2025.

(Kopacek & Kopacek, 2003)

Kopacek, B. & Kopacek, P. (2003). Semi-automatisierte Demontage für Elektronikschrottrecycling. *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-winkelmesse?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 - Automatisierungs-technik*, 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.

(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

(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

(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.

(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., Ciroth, 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.

(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

(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>

(Schmult, 1992)

Schmult, 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, wälzgeföhrter Grundbackenführung EGP 40-N-N-IOL: Ident.-Nr. 1372735*. www.schunk.com/de/de/greiftechnik/parallelgreifer/egp/egp-40-n-n-iol/p/000000000001372735 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-Kozmiensky, 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.
- (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
- (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.
- (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.

(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

(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 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>

(Yıldız & Brinker et al., 2020)

Yıldız, E., Brinker, T., Renaudo, E., Hollenstein, J., Haller-Sieber, 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>

(Yıldız & Renaudo et al., 2022)

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

| | | | |
|----------------|--|--------------------------------|--|
| 1998 | Reinhard Rupprecht Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart (Rupprecht, 1998) | Fahrzeugdächer | Flexibilisierung der zerstörenden Demontage durch Sensordaten |
| 1999 | Yukio Uchiyama et al. Global Ecoindustry Center, Tokyo, Japan (Uchiyama et al., 1999) | Wärmetauscher & Waschmaschinen | Betrachtung der gesamten Demontage-Prozesskette |
| 1999 | Bernd Scholz-Reiter Lehrstuhl Industrielle Informatik, Cottbus (Scholz-Reiter et al., 1999) | TV-Geräte | Bildverarbeitung zur Produkt-Identifikation; zwei Roboter im Einsatz: Handhabung und Demontage |
| 2000 | Eyal Zussman et al. Lehrstuhl Materials Engineering, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa (Zussman & Zhou, 2000) | Funksprechgerät | Demontage-Modellierung und Planung in Abhängigkeit des Core-Zustands |
| 2000 | Karlheinz Hohm et al. Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik, Darmstadt (Hohm et al., 2000) | Computer-Komponenten | Bildverarbeitung und Demontageplanung |
| 2000 | Björn Karlsson et al. Department of Physics and Measurement Technology, Linköping (Karlsson & Järrhed, 2000) | Waschmaschinen-Motor | Bildverarbeitung |
| 2001 | Ulrich Büker et al. Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik, Paderborn (Büker et al., 2001) | Kraftfahrzeuge (Autoreifen) | Bildverarbeitung zur Detektion von Verbindungselementen |
| 2003 | Bernd Kopacek et al. COTRONICS GmbH, Wien (P. Kopacek & Kopacek, 2003; B. Kopacek & Kopacek, 2003) | Telefone, LCD-Displays | Transfer zu industrienahen Systemen |
| 2004 (2009) | Fernando Torres et al. 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 | Michael Bailey-Van Kuren Department of Manufacturing Engineering, Miami (Bailey-Van Kuren, 2006) | Mobiltelefone | Pfadplanung für Automatisiertes Aufschneiden auf Grundlage von Bildverarbeitung |
| 2007 | Pablo Gil et al. Physics, Systems Engineering and Signal Theory Department, Alicante (Gil et al., 2007) | Computer | Positioniersysteme auf Grundlage von Bildverarbeitung; Visuell-kraftgeregeltes System |

| | | | |
|-------------|---|--|---|
| 2009 | Sebastian Kernbaum et al. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Berlin (Kernbaum et al., 2009) | TV-Geräte | Virtuelle Inbetriebnahme und Simulation der Demontage |
| 2012 | Ahmed ElSayed et al. Department of Computer Science and Engineering, Bridgeport (ElSayed et al., 2012) | Computer | Detektion von Komponenten und automatische Sequenzplanung |
| 2015 | Supachai Vongbunyong et al. School of Mechanical and Manufacturing Engineering, New South Wales (Vongbunyong & Chen, 2015) | Platinen | Automatische Parameter-Anpassung und Sequenzplanung aufgrund von Bildverarbeitung |
| 2015, 2016 | Kathrin Wegener; Gerbers et al. Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Braunschweig (Gerbers et al., 2016; Wegener, 2015) | Elektro-Kraftfahrzeuge-Traktionsbatterie | Anwendung von Mensch-Roboter-Kooperation in der Demontage |
| 2016 | Mohamad Bdiwi et al. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Chemnitz (Bdiwi et al., 2016) | Elektro-Kraftfahrzeuge-Traktionsmotoren | Detektion von Verbindungselementen |
| 2016 | Nicholas DiFilippo et al. Mechanical Engineering Department, Rhode Island (N. D. DiFilippo, 2016) | Taschenrechner | Anwendung der SOAR-Architektur für die Demontage |
| 2016 | Jie Li et al. Centre for Sustainable Manufacturing and Recycling Technology, Loughborough (J. Li, 2016) | Motorsteuergerät | Trennprozess-Untersuchungen |
| 2016 | Charissa Rujanavech et al. Apple Inc., Cupertino (Apple Inc., 2016) | Mobiltelefone | Industrielle Robustheit bei verschiedenen Core-Varianten |
| 2017 (2021) | Hua Wei Chen Gwendolyn Foo School of Mechanical and Manufacturing Engineering, New South Wales (W. H. Chen, 2017; W. H. Chen et al., 2021) | Laptops | Multi-Kopf-Endeffektor-Entwicklung und -Betrieb |
| 2017 | Sujuan Wang Zimei Wu Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai (S. Wang, 2017) | LCD-Displays | Robuste Bildverarbeitung, Simulation der Demontage, Schraub-Endeffektor |
| 2018 | Cornelius Klas et al. Institut für Anthropomatik und Robotik, Karlsruhe (Klas et al., 2021) | PC-Festplatten | Flexible Roboterkinematik |

| | | | |
|------|--|---|---|
| 2019 | Christian Friedrich Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW), Universität Stuttgart (Christian Friedrich, 2019) | Pneumatik Ventil | Verbesserte Pfadplanung, Verwendung von Aktionsprimitiven |
| 2020 | Jun Huang et al. Department of Mechanical Engineering, Birmingham (Huang et al., 2020) | Kraftfahrzeuge-Turbolader | Umfassende Demontageuntersuchungen beim automatisierten Entschraubprozess |
| 2021 | Hendrik Poschmann et al. Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Clausthal (Poschmann, 2021) | Elektro-Kraftfahrzeuge-Batterien | Umfassende, lernende Systemarchitektur |
| 2022 | Chuangchuang Zhou et al. Centre for Industrial Management / Traffic and Infrastructure, KU Leuven (Zhou et al., 2022) | Computer, Tablets | Bildverarbeitung, Werkzeugentwicklung |
| 2022 | Anwar Al Assadi et al. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Al Assadi, Holtz et al., 2022) | Elektro-Kraftfahrzeug-Batterien | Schraubendreher-Status erlernt |
| 2022 | Ioan Doroftei et al. „Gheorghe Asachi“ Technical University of Iasi, Romania (Doroftei et al., 2023) | PC-Leiterplatten | Spezieller Demontage Endeffektor, Bildverarbeitung für Objektdetektion |
| 2022 | Merle Zorn et al. FH Münster IWARU Institut für Infrastruktur Wasser Ressourcen Umwelt (Zorn et al., 2022) | Elektro-Kraftfahrzeuge-Batterien | Sensorbasierte Demontage in Abhängigkeit des Zustandes |
| 2022 | Ian Kay et al. Department of Mechanical Engineering, The University of Akron (Kay et al., 2022) | Lithium-Ionen-Kfz-Batterien | Entwicklung eines Trennschneidesystems |
| 2023 | James Phillip Brazier et al. Middlesex University, Dubai, United Arab Emirates (Brazier & Prasetyo, 2023) | Elektroschrott aus Haushaltsanwendungen | Machbarkeitsuntersuchungen für Elektroschrott |
| 2023 | Hengwei Zhang et al. School of Mechanical Engineering, 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 | Methode | Performanz (Metrik & Bewertung) |
|---|---|--|---|
| M. Kahmeyer Universität Stuttgart (Kahmeyer, 1995) | Schlitz-Schraubenkopfantriebe mit- sammt Oberflächen- zuständen (Kratz- er; Korrosions- klasse) | Filterbasiert | k. A. (keine Angabe) |
| S.G. Tzafestas et al. National University of Athens (Tzafestas et al., 1997) | k. A | Filterbasierte Kan- tendetektion | k. A. |
| B. Karlsson et al. Linköping University (Karlsson & Järrhed, 2000) | k. A. | Template Basiertes Fuzzy Matching | k. A. |
| U. Büker et al. Universität Paderborn (Büker et al., 2001) | Außensechskant- Schrauben in Kfz- Rädern | Filterbasiert mit umfangreicher Vor- verarbeitung in Ste- reo-Vision-Grau- stufenbildern | 98 % der Versuchso- bjekte erzielen eine ausrei- chende Lokalisations- genauigkeit; 15 s Laufzeit für vier Schraubenköpfe |
| M. Bailey-van Kuren Miami University (Bailey-Van Kuren, 2002) | Laptop-Gehäuse, keine Angabe zu Schraubentypen | Stereo-Vision- Graustufenbilder | k. A. |
| M. Nave TU Dortmund (Nave, 2003) | M3, M4 und M5 Schrauben mit Phillips-, Sechs- kant- und Schlitz- Kopfantrieben in TV-Geräten | k. A. | k. A. |
| P. Gil et al. University of Alicante (Gil et al., 2007) | Computergeräte, keine Angabe zu Schraubentypen | Filterbasiert mit verschiedenen Kanten-Detektio- nen | k. A. |
| S.R. Cruz-Ramirez et al. Osaka University (Cruz-Ramirez et al., 2008) | Phillips-Schrauben in Metallstrukturen | Template Matching in Stereo-Bildern | k. A. |
| S. Vongbunyong et al. 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 % |
| K. Wegener et al. TU Braunschweig (Küthe, 2015; Wegener, 2015) | M5-Schrauben mit versch. Schrauben- kopfantrieben | Haar Cascade | 50 % Detektionsgenauig- keit |
| M. Bdiwi et al. 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 |

| | | | |
|--|--|---|---|
| N. DiFilippo N. DiFilippo et al. University of Rhode Island (N. D. DiFilippo, 2016, S. 65; N. M. DiFilippo & Jouaneh, 2018, 2019) | Phillips-Schrauben in Laptop-Gehäu- sen | Mehrstufiger An- satz auf Basis einer Kantendetektion und mehreren Fil- tern | 86,7 % Detektionsgenau- igkeit mit den besten Pa- rametern |
| Z. Tu et al. Shanghai Polytechnic Uni- versity (Tu et al., 2017) | Phillips-Schrauben in Display-Gehäu- sen | k. A. | k. A. |
| T. Gibbons et al. University of Sheffield, (Gibbons et al., 2018) | k. A. | Erlerntes Gaussian Mixture Model im Lab Farbraum | k. A. |
| C. Friedrich C. Friedrich et al. Universität Stuttgart (Christian Friedrich et al., 2017; Christian Friedrich, 2019) | Schrauben in typi- schen industriellen Komponenten wie Ventilen und Zylin- dern | Viola-Jones- Detektor basierend auf History of ori- ented Gradients (HOG) Features | 96 % True Positive Rate |
| J. Krüger et al. Fraunhofer-Institut für Pro- duktionsanlagen und Kon- struktionstechnik (Krüger et al., 2019) | k. A. | ResNet-152 Netz- werkarchitektur | k. A. |
| E. Bigorra & Bilal et al. University of Adger (Bigorra, 2020; Bilal et al., 2022) | Schrauben mit In- nensechsrund- Kopfantrieb in Kfz- Batterien | Offline-Erkennung in Bildern aus meh- reren Perspektiven, k. A. zum Klassifi- kationsalgorithmus | k. A. zur Schrauben- kopferkennung |
| E. Yıldız et al. Georg-August University of Göttingen (Yıldız et al., 2020; Yıldız et al., 2022; Yıldız & Wör- götter, 2019, 2020) | Innensechsrund, Innensechskant, Phillips- und Schlitz-Kopfantrieb in Computer-Fest- platten | Zweistufiges Ver- fahren mit Hough Circle Transfor- mation und eigener DCNN-Architektur | 80,23 % Detektions- genauigkeit |
| D. Brogan et al. University of Rhode Island (Brogan et al., 2021) | Phillips-Schrauben in Elektrokleingerä- ten | Tiny-YOLO v2 | Average Precision von 92,6 %, 99,20 % und 98,39 % in verschie- denen Datensätzen |
| M. Choux et al. University of Agder (Choux et al., 2021) | Schrauben mit In- nensechsrund- Kopfantrieb in Kfz- Batterien | Offline-Erkennung in Bildern aus meh- reren Perspektiven, YOLOv3-Ansatz | k. A. zur Schrauben- kopferkennung |
| G. Foo et al. University of New South Wales (Foo et al., 2021b) | Phillips-Schrauben in LCD-Monitoren | Kombinierter An- satz aus Schrau- benerkennung, um- fangreicher Bildvor- verarbeitung und Visual Reasoning | Average Precision von 91,8 % im besten Setup |
| C. Klas et al. Karlsruher Institut für Technologie (Klas et al., 2021) | Innensechsrund- schrauben in Com- puter-Festplatten | Zweistufiges Ver- fahren mit Circle Hough Transform und einem binären convolutional neu- ral network | 93,6 % Klassifikations- genauigkeit |

| | | | |
|---|---|---|--|
| X. Li et al. Taiyuan University of Technology (X. Li et al., 2021) | Schrauben in Mobiltelefonen mit Phillips- und Innen-sechsrand-Kopfantrieb | Mehrstufiges Verfahren basierend auf Faster R-CNN und Rotation Edge Similarity Ansatz | Gemittelte Average Precision von 98,4 % über alle Schraubenklassen |
| H. Poschmann TU Clausthal (Poschmann et al., 2020b; Poschmann, 2021) | M 6 × 12-Schrauben mit Innen-sechsrand-Schraubkopfantrieben 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 |
| Z. Deng et al. Shanghai Jiao Tong University (Deng et al., 2022) | Phillips-Schrauben in Mobiltelefon-Platten | SqueezeNet Netzwerk | Average Precision von 99,4 % auf der Klassifikationsaufgabe |
| G. Kalitsios et al. Centre for Research & Technology Hellas (Kalitsios et al., 2022) | Schrauben in verschiedenen Elektrokleingeräten | Mask R-CNN | 0,647 mAP@.5:.95 |
| J. Li et al. Donghua University (J. Li et al., 2022) | Schrauben in Mobiltelefonen | YOLOv5m6 | 51% mAP@.5:.95 |
| H. Yin et al. Wuhan University of Technology (Yin et al., 2022) | Schrauben in Kfz-Batterien | YOLOv7 | k. A. |
| M. Zorn et al. FH Münster (Zorn et al., 2022) | Schrauben in Kfz-Batterien | Mask R-CNN mit Swin transformer backbone | k. A. |
| J. Brazier et al. Middlesex University (Brazier & Prasetxo, 2023) | Schrauben in Leiterplatten | Klassische Bildverarbeitung (Circle Hough Transformation) | k. A. |
| J. Chen et al. Beijing University of Technology, (J. Chen et al., 2023) | Außensechskantschrauben | Eigene Netzwerkarchitektur basierend auf radial basis function Netzwerken | k. A. |
| Q. Liu et al. 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 |
| H. Zhang et al. 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% |
| L. Petricca et al. Broentech Solutions A.S., Norwegen (Petricca et al., 2016) | Bilder mit korrodierten Flächen auf Bauwerken | Vergleich mehrerer Methoden | k. A. |
| M. Schlüter et al. Fraunhofer IPK Berlin (Schlüter et al., 2021) | Oberflächeninspektion bei Kfz Startermotoren | k. A. | k. A. |

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

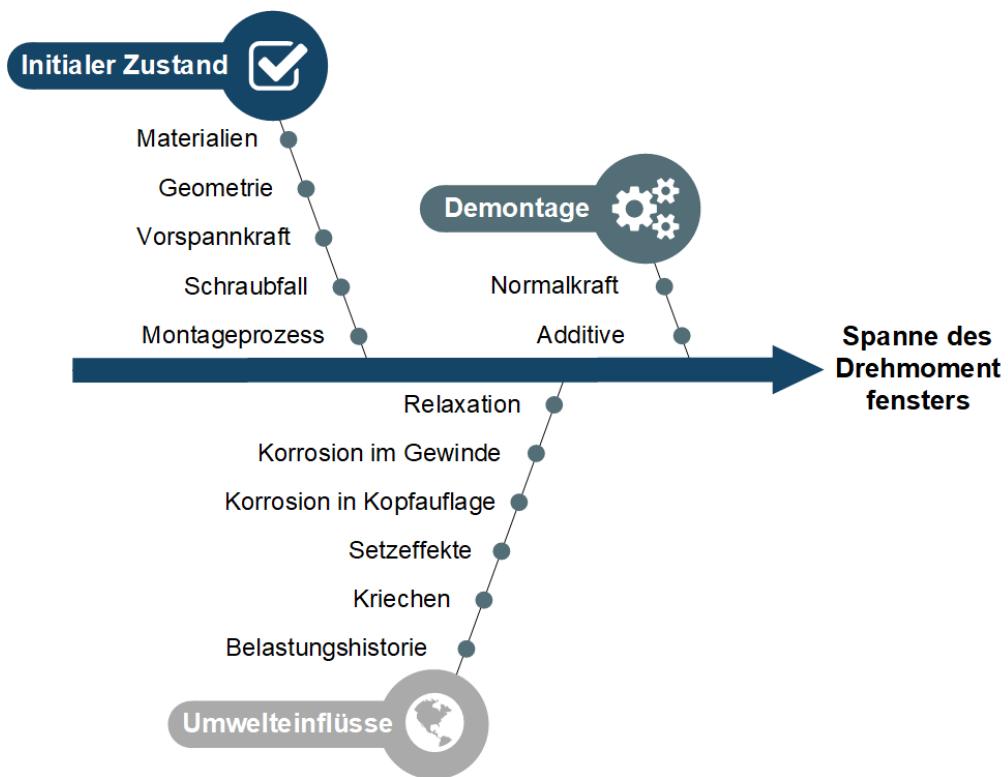


Abbildung 0-1: Einflussgrößen auf die Spanne des Drehmomentfensters einer Schraubverbindung

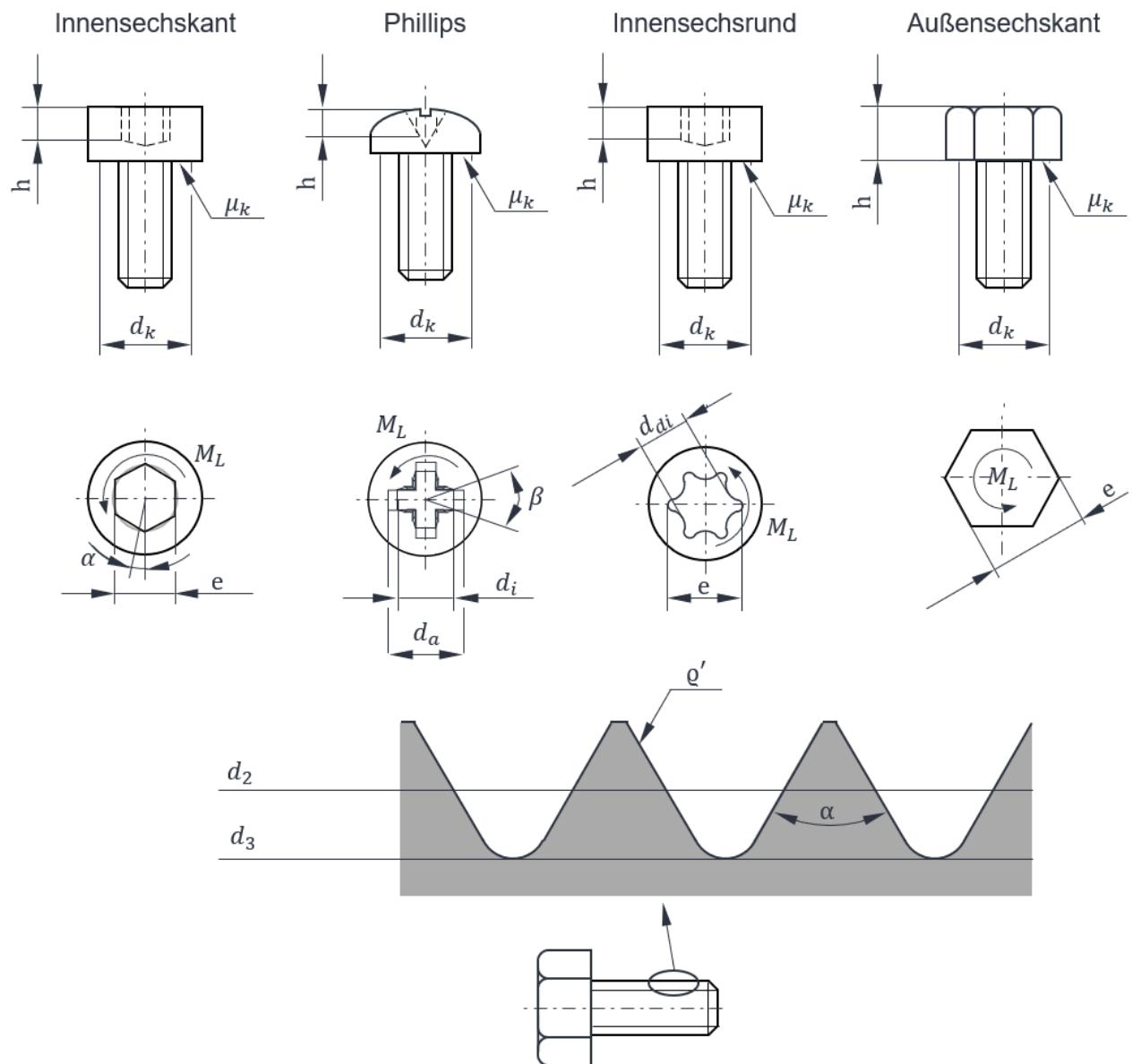


Abbildung 0-2: Maßskizze für verschiedene Schraubenköpfe

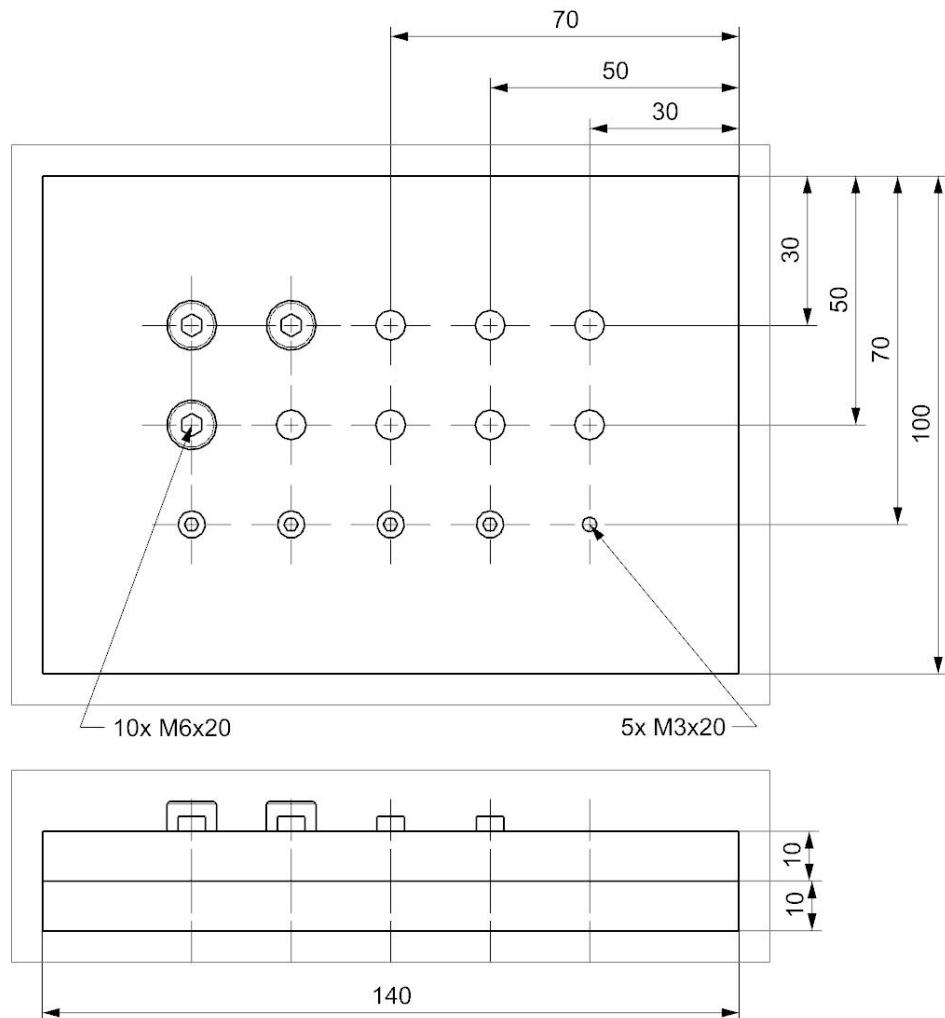


Abbildung 0-3: Probekörper für experimentelle Versuchsreihe 1

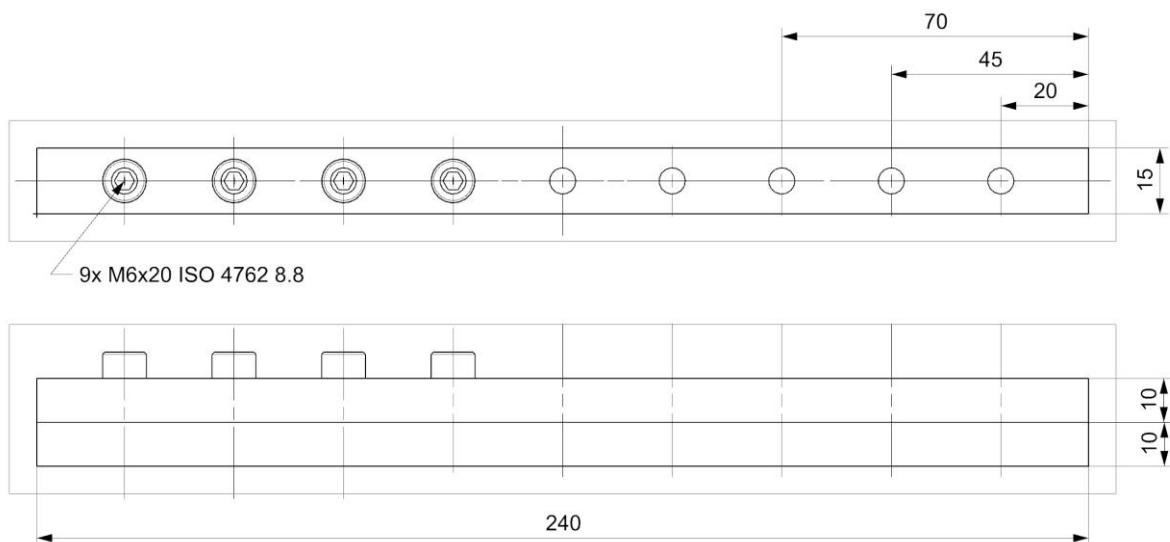


Abbildung 0-4: Probekörper für experimentelle Versuchsreihe 2

Tabelle 0-3: Auszug aus dem Datensatz

| Probe | Bild | Differenz-drehmoment [Nm] | Relativer Kor-rosionsgrad ε [%] | Reibungszahl in der Kopf-aulagefläche μ_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 ϱ' und der Reibungszahl im Gewinde μ_G für Gewinde mit dem Flankenwinkel α formulieren (Thomala & Kloos, 2007, S. 299–303).

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

mit

α = 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 μ_K liefert

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

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

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

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

| YOLOv5s mit Adam-Optimierungsalgorithmus | | | | |
|---|------------------|---------------|----------------|---------------------|
| Klasse | Precision | Recall | mAP@0.5 | mAP@0.5:0.95 |
| Schlitz | 0,950 | 0,912 | 0,957 | 0,665 |
| Sechskant | 0,979 | 0,912 | 0,968 | 0,729 |
| mit Flansch | | | | |
| 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-Sechsrand (Torx) | 0,993 | 0,959 | 0,992 | 0,771 |
| Gesamt | 0,973 | 0,921 | 0,974 | 0,731 |

| YOLOv5s mit Erkennungsschicht für kleine Objekte und SGD-Optimierungsalgorithmus | | | | |
|---|------------------|---------------|----------------|---------------------|
| Klasse | Precision | Recall | mAP@0.5 | mAP@0.5:0.95 |
| Schlitz | 0,994 | 1 | 0,995 | 0,832 |
| Sechskant | 0,988 | 0,949 | 0,984 | 0,728 |
| mit Flansch | | | | |
| 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-Sechsrand (Torx) | 0,992 | 0,903 | 0,969 | 0,735 |
| Gesamt | 0,990 | 0,925 | 0,978 | 0,742 |

| YOLOv5s mit Erkennungsschicht für kleine Objekte und Adam-Optimierungsalgorithmus | | | | |
|--|------------------|---------------|----------------|---------------------|
| Klasse | Precision | Recall | mAP@0.5 | mAP@0.5:0.95 |
| Schlitz | 0,989 | 1 | 0,995 | 0,807 |
| Sechskant | 0,979 | 0,976 | 0,985 | 0,735 |
| mit Flansch | | | | |
| 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-Sechsrand (Torx) | 0,964 | 0,917 | 0,969 | 0,743 |
| Gesamt | 0,975 | 0,940 | 0,978 | 0,744 |

| YOLOv7 mit SGD-Optimierungsalgorithmus | | | | |
|---|------------------|---------------|----------------|---------------------|
| Klasse | Precision | Recall | mAP@0.5 | mAP@0.5:0.95 |
| Schlitz | 0,978 | 0,875 | 0,929 | 0,698 |
| Sechskant | 0,983 | 0,931 | 0,972 | 0,694 |
| mit Flansch | | | | |
| 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-Sechsrand (Torx) | 0,980 | 0,892 | 0,947 | 0,702 |
| Gesamt | 0,978 | 0,894 | 0,955 | 0,703 |

| SSD | |
|------------------------|-----------------------------|
| Klasse | Durchschn. Precision |
| Schlitz | 0,903 |
| Sechskant mit Flansch | 0,751 |
| Sechskant | 0,748 |
| Phillips | 0,657 |
| Pozidriv | 0,778 |
| Innen-Sechsrand (Torx) | 0,594 |
| Gesamt | 0,738 |

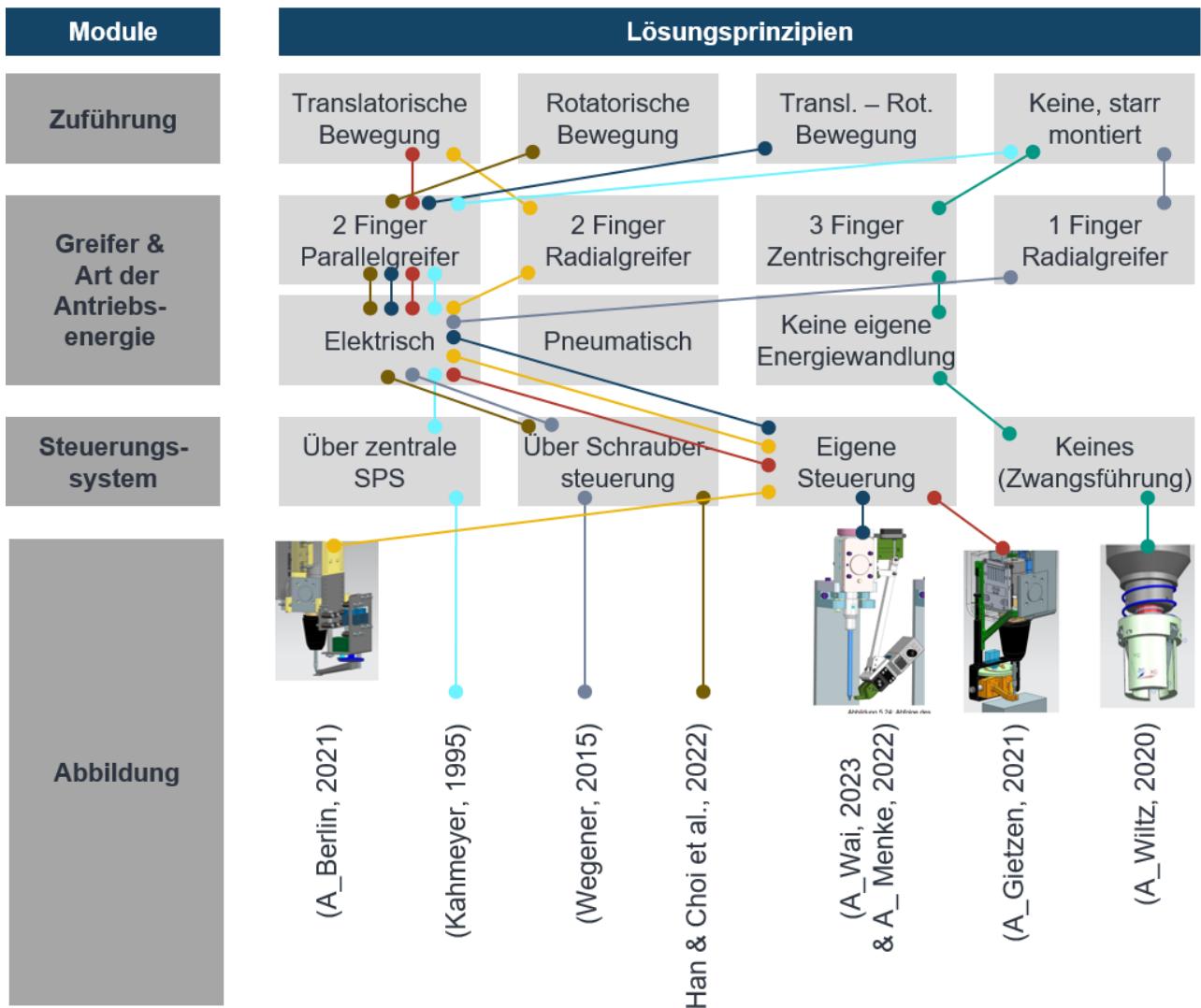


Abbildung 0-5: Stand der Technik zu Schraubengreifsystemen

Tabelle 0-6: Torx

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

Tabelle 0-7: Außensechskant

| Index Motor & Schraube | Rel. Korro- sions- grad ϵ [%] | Losdreh- moment [Nm] | Modell. Reg. 0 | Modell. Reg. 3 | Modell. Reg. 6 | Modell. Reg. 9 | Modell. Reg. 10 | 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

| Nummer Demonta- geversuch | Erwartetes Abschermoment [Nm] | Erwartetes Losdrehmoment [Nm] | Gemessenes Moment [Nm] | Bemerkung |
|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------|
| 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 selbstdiagnosztische 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 elektromechanischem 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 fünfachsigen 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 Produktions-
systeme 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 bearbeitungs-
elementorientiertes, 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 Mauerwerkabaus 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 Stiebold

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 Osmers

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 Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätmethodenintegration

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünfachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte 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 Schmälzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein
Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-
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 Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hüksam

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 Gönnheimer

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 Dienstleistungsorganisationen: 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 Fräsprözesse 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 thermisch 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

Prozesskraftrichtungsangepasste Frästrategien 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 Führungswerzeuge

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 Krauße

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 automobile 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-
kenngroßen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicher-
heit 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

Schädigungsreie 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

Kugelgewindetriebsspindeln

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 Gönnheimer

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

