

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

Markus Heim

**Demontage von Magneten aus permanent-  
magneterregten Synchronmaschinen**  
Ressourceneffizienz durch Werterhaltung

Band 309

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

Markus Heim

**Demontage von Magneten aus  
permanentmagneterregten Synchronmaschinen**  
Ressourceneffizienz durch Werterhaltung

Band 309



**Demontage von Magneten aus permanentmagneterregten  
Synchronmaschinen**  
Ressourceneffizienz durch Werterhaltung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

**Dissertation**

von

Markus Heim, M.Sc.

aus Radolfzell am Bodensee

Tag der mündlichen Prüfung: 24.04.2026

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Frank Döpfer

### **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., 2026

Copyright Shaker Verlag 2026

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	978-3-8191-0750-4
PDF-ISBN	978-3-8191-0688-0
ISSN	2944-6430
eISSN	2944-6449

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

## **Vorwort des Herausgebers**

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

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger



## **Vorwort des Verfassers**

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von 2020 bis 2025 am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entstanden.

Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Zuerst möchte ich mich besonders bei Prof. Fleischer für die Betreuung der Arbeit, zielgerichtete Fachdiskussionen und das mir entgegengebrachte große Vertrauen bedanken. Die spannenden und verantwortungsvollen Projekte am Institut haben mir sowohl fachliches als auch persönliches Wachstum ermöglicht. Zudem bedanke ich mich bei dem Korreferenten Prof. Frank Döpfer sowie bei Prof. Arne Rönnau für den Prüfungsvorsitz.

Ein großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut, insbesondere meinen Bürokollegen und den Fachkollegen im Bereich elektrischer Antriebe. Durch die kollegiale Zusammenarbeit, die gegenseitige Motivation sowie ein geteiltes Zielbild sind neben meiner Dissertation auch enge Freundschaften entstanden. Für die intensiven fachlichen Diskussionen im Rahmen meiner Dissertation möchte ich insbesondere Nicolaus Klein und Wilken Wößner danken.

Ich bedanke mich bei allen Studierenden, die mich in meiner Arbeit am Institut als wissenschaftliche Hilfskraft oder im Rahmen von Seminar-, Bachelor- und Masterarbeiten unterstützt haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Ich danke meinen beiden Schwestern und insbesondere meinen Eltern, die mich mein gesamtes Leben immer unterstützt haben und diese Dissertation erst ermöglicht haben.

Freiburg im Breisgau, im Mai, 2026

Markus Heim



## Zusammenfassung

Die Elektrifizierung des Mobilitätssektors ermöglicht eine Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen, erfordert allerdings wertvolle Ressourcen. Insbesondere Seltene Erden werden in Form von Hochleistungsmagneten in elektrischen Traktionsantrieben eingesetzt. Die Gewinnung dieser Ressourcen geht mit hohen Kosten, Umweltschäden sowie politischen Abhängigkeiten einher. Vor diesem Hintergrund bietet die Zirkulärwirtschaft ein enormes Potenzial durch die Demontage und Wiederaufbereitung von Altteilen, insbesondere zur Bereitstellung von neuem Magnetmaterial. Die effektive Umsetzung von hochwertigen Werterhaltungsstrategien erfordert hierfür den bestmöglichen Demontagezustand. Aufgrund der hohen Anforderungen an elektrische Traktionsmotoren kommen leistungsfähige, nicht lösbare, Fügeverbindungen zum Einsatz. Daher wird untersucht, wie der Prozess der Magnetdemontage erfolgreich umgesetzt werden kann, zur zerstörungsfreien und automatisierten Rückgewinnung der wertvollen Magnete.

Es werden zu untersuchende produkt- und prozesseitige Einflussparameter der Magnetdemontage von stoff- und kraftschlüssigen Magnetfixierungen identifiziert und klassifiziert. Anschließend werden analytische und numerische Modelle für den Demontageprozess zur Berechnung von Demontagekräften und Bauteilspannungen erarbeitet. Für die experimentelle Untersuchung des Demontageprozesses sowie als Prototyp für eine zukünftige Industrialisierung des Prozesses wird eine Demontagezelle systematisch entwickelt und implementiert. Es erfolgt eine Validierung des entwickelten Demontageprozesses anhand eines repräsentativen Serien-Elektromotors. Zuletzt werden Empfehlungen für einen erfolgreichen Demontageprozess bezüglich des Produktdesigns von Elektromotoren sowie der Gestaltung des Demontageprozesses erstellt. Es zeigt sich, dass die Demontage von kraftschlüssigen Magnetfixierungen in der Regel einfach zu realisieren ist. Obwohl stoffschlüssige Verbindungen eine größere Herausforderung darstellen, können diese mithilfe der entwickelten Modelle und empirischer Erkenntnisse durch geeignete Prozessparameter erfolgreich demontiert werden.



## **Abstract**

The electrification of the mobility sector reduces global CO<sub>2</sub>-emissions, but requires valuable resources. Especially Rare Earth Materials are used in form of high-performance magnets in electric traction motors. The mining of these resources is associated with high material costs, environmental damage as well as political dependencies. Against this background, the circular economy offers great potential in form of the disassembly and recycling of end-of-life products to provide new magnet material. The effective implementation of high-grade recycling strategies requires the best possible disassembly conditions. High requirements of electric traction motors require high-performance, partially non-detachable, joints. Therefore, the process for a successful magnet disassembly is investigated to enable non-destructive and automated recovery of valuable magnets.

The product- and process-related magnet disassembly parameters for material-locking and force-fit magnet fixations are identified and classified. Subsequently, numerical and analytical models for the disassembly process are developed to calculate disassembly forces and component stress. A disassembly cell is developed and implemented for further experimental investigations of the disassembly process and as a prototype for the future industrialisation of the process. The developed disassembly process is validated using a representative series-production electric traction motor. Finally, recommendations for a successful disassembly process are made regarding the product design of electric motors as well as the parameterization of the disassembly process. The findings show that the disassembly of force-fitted magnet fixations is easier to achieve. Although material-locking magnet fixations are more challenging, they can be successfully disassembled using the developed models and empirical data for the parameterization of the disassembly process.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Formelverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschine	4
2.2 Aufbau von PSM Rotoren	4
2.3 Auslegung von PSM Rotoren	5
2.3.1 Drehzahl	6
2.3.2 Temperatur	6
2.3.3 Magnetischer Fluss	8
2.3.4 Neodym-Eisen-Bor Magnete	8
2.4 Verbindungselemente in PSM Rotoren	10
2.4.1 Blechpaket	10
2.4.2 Rotorwelle – Lager	11
2.4.3 Rotorwelle – Blechpaket – Wuchtscheibe	11
2.4.4 Magnetfixierung	12
2.5 Werterhaltungsstrategien von PSM	23
2.5.1 Demontage von Elektromotoren	24
2.5.2 Aufbereitung von Magneten	27
2.5.3 Ökologisches und ökonomisches Potenzial der Magnetaufbereitung	31
2.6 Forschungsbedarf	33
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>36</b>
3.1 Zielsetzung	36
3.2 Vorgehensweise	37
<b>4 Prozesskette zur Demontage von PSM Rotoren</b>	<b>40</b>

4.1	Entmagnetisieren	40
4.2	Lagerdemontage	42
4.3	Axiale Verbindung lösen	42
4.4	Demontage Rotorwelle	43
4.5	Blechkpaket spalten	44
4.6	Magnetdemontage	46
<b>5</b>	<b>Identifikation und Klassifizierung von relevanten Einflussparametern der Magnetdemontage</b>	<b>49</b>
5.1	Stoffschlüssige Magnetfixierungen	50
5.2	Mechanische Fixierung	51
	5.2.1    Federnase	51
	5.2.2    Federblech	52
5.3	Prozessparameter	53
<b>6</b>	<b>Analytische und simulative Untersuchung der Magnetdemontage</b>	<b>55</b>
6.1	Stoffschlüssige Fixierung	55
	6.1.1    Strukturelle Klebeverbindungen	55
	6.1.2    Modellaufbau	57
	6.1.3    Simulative Einflussanalyse mittels Screening	61
	6.1.4    Einzelfaktoranalyse	63
	6.1.5    Schädigungsmechanismen	67
6.2	Kraftschlüssige Fixierung	75
	6.2.1    Federnase	75
	6.2.2    Federblech	84
6.3	Berechnung kritischer Knickspannungen des Stempels	91
<b>7</b>	<b>Demontage von Magneten in einer automatisierten Demontagezelle</b>	<b>94</b>
7.1	Aufbau der Demontagezelle	94
	7.1.1    Anforderungen	94
	7.1.2    Konstruktion	96
7.2	Herstellung von Versuchsträgern	98

---

7.2.1	Stoffschlüssige Magnetfixierungen	98
7.2.2	Federnase	99
7.2.3	Federblech	99
7.3	Experimentelle Versuchsreihen	100
7.3.1	Stoffschlüssige Magnetfixierungen	100
7.3.2	Federnase	129
7.3.3	Federblech	135
<b>8</b>	<b>Validierung</b>	<b>141</b>
8.1	Demontagekräfte von stoffschlüssigen Fixierungen	141
8.2	Magnetdemontage	143
8.2.1	Berechnung von kritischen Belastungen	143
8.2.2	Magnetdemontage	145
<b>9</b>	<b>Gestaltungsempfehlungen für die Magnetdemontage</b>	<b>148</b>
9.1	Produktgestaltung	148
9.2	Prozessgestaltung	150
9.2.1	Vorgehensweise zur Prozessparametrierung	152
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
10.1	Zusammenfassung	155
10.2	Ausblick	156
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>
	<b>Publikationsliste des Verfassers</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>

# Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
$A_{BP}$	Bruchdehnung Blechpaket	%
$A_{Fb}$	Bruchdehnung Federblech	%
$a_{Fb}$	Amplitude Federblech	mm
$A_K$	Klebstofffläche	mm <sup>2</sup>
$A_S$	Querschnittsfläche Stempel	mm <sup>2</sup>
$b_{BP}$	Breite Blechpaket	mm
$b_{Fb}$	Breite Federblech	mm
$b_{Mag}$	Breite Magnet	mm
$b_N$	Breite Federnase	mm
$b_S$	Breite Stempel	mm
$C$	Integrationskonstante	-
$D_{Fb}$	Blechstärke Federblech	mm
$D_K$	Dicke Klebstoff	mm
$E_{BP}$	Elastizitätsmodul Blechpaket	GPa
$E_{BP,1}$	Elastizitätsmodul Blechpaket (radial)	GPa
$E_{BP,2}$	Elastizitätsmodul Blechpaket (tangential)	GPa
$E_{BP,3}$	Elastizitätsmodul Blechpaket (axial)	GPa
$E_{Fb}$	Elastizitätsmodul Federblech	GPa
$E_{Mag}$	Elastizitätsmodul Magnet	GPa
$E_N$	Elastizitätsmodul Federnase	GPa
$E_K$	Elastizitätsmodul Klebstoff	MPa
$E_S$	Elastizitätsmodul Stempel	GPa
$E_{St}$	Elastizitätsmodul Stahl	GPa
$F$	Kraft	N

Formelzeichen	Größe	Einheit
$F_{De}$	Demontagekraft	N
$F_{Fb,ges}$	Gesamthaltekraft Federblech	N
$F_{Fb,nor}$	Normierte Haltekraft Federblech	N
$F_{H,N}$	Haltekraft Federnase	N
$F_K$	Übertragbare Klebelast	N
$F_N$	Montagekraft der Federnase	N
$f_N$	Durchbiegung Federnase	mm
$F_{N,ges}$	Gesamthaltekraft Federnase	N
$F_\lambda$	Haltekraft einer Wellenlänge	N
$G$	Schubmodul	GPa
$G_{BP}$	Schubmodul Blechpaket	GPa
$G_{BP, 12}$	Schubmodul Blechpaket	GPa
$G_{BP, 13}$	Schubmodul Blechpaket	GPa
$G_K$	Schubmodul Klebstoff	MPa
$G_{St}$	Schubmodul Stahl	GPa
$h_{Mag}$	Höhe Magnet	mm
$h_N$	Höhe Federnase	mm
$h_S$	Höhe Stempel	mm
$I_{Mag}$	Flächenträgheitsmoment Magnet	mm <sup>4</sup>
$I_N$	Flächenträgheitsmoment Federnase	mm <sup>4</sup>
$I_S$	Flächenträgheitsmoment Stempel	mm <sup>4</sup>
$K$	Spannungsüberhöhungsfaktor	-
$l_f$	Freie Länge Federnase	mm
$l_H$	Biegelänge	mm
$l_k$	Knicklänge	mm

Formelzeichen	Größe	Einheit
$l_{\text{Mag}}$	Länge Magnet	mm
$l_{\text{N}}$	Länge Federnase	mm
$l_{\text{S}}$	Länge Stempel	mm
$M$	Biegemoment	Nm
$n_{\text{N}}$	Anzahl Federnasen	-
$n_{\lambda}$	Anzahl Wellenlängen	-
$Q$	Querkraft	N
$q_{\text{h}}$	Linienlast Haltekraft	N/mm
$q_{\text{S}}$	Linienlast Stempel	N/mm
$R_{\text{D, Mag}}$	Druckfestigkeit Magnet	MPa
$R_{\text{e, BP}}$	Streckgrenze Blechpaket	MPa
$R_{\text{e, Fb}}$	Streckgrenze Federblech	MPa
$R_{\text{e, S}}$	Streckgrenze Stempel	MPa
$R_{\text{m, BP}}$	Zugfestigkeit Blechpaket	MPa
$R_{\text{m, Fb}}$	Zugfestigkeit Federblech	MPa
$R_{\text{m, Mag}}$	Zugfestigkeit Magnet	MPa
$t_{\text{n, K}}$	Festigkeit Klebstoff in Normalenrichtung	MPa
$t_{\text{s, K}}$	Festigkeit Klebstoff in Schubrichtung	MPa
$u$	Verschiebung	mm
$\gamma$	Scherdeformation	-
$\delta_{\text{K}}$	Kritische Rissöffnung Klebstoff	mm
$\Delta l_{\text{H}}$	Differenz Biegelänge	mm
$\varepsilon$	Dehnung	%
$\varepsilon_{\text{B, BP}}$	Dehnung bei Bruch Blechpaket	%
$\lambda$	Wellenlänge	mm

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\lambda_{Fb}$	Wellenlänge Federblech	mm
$\lambda_g$	Gestauchte Wellenlänge	mm
$\lambda_k$	Schlankheitsgrad	-
$\lambda_{min}$	Minimaler Schlankheitsgrad	-
$\mu_{Fb}$	Reibkoeffizient Federblech	-
$\mu_N$	Reibkoeffizient Federnase	-
$\nu_{BP}$	Poissonzahl Blechpaket	-
$\nu_{BP,12}$	Poissonzahl Blechpaket	-
$\nu_{BP,13}$	Poissonzahl Blechpaket	-
$\nu_{BP,23}$	Poissonzahl Blechpaket	-
$\nu_{Fb}$	Poissonzahl Federblech	-
$\nu_K$	Poissonzahl Klebstoff	-
$\nu_{Mag}$	Poissonzahl Magnet	-
$\nu_{St}$	Poissonzahl Stahl	-
$\rho_{Fb}$	Dichte Federblech	g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{Mag}$	Dichte Magnet	g/cm <sup>3</sup>
$\sigma_{B,Mag}$	Biegespannung Magnet	MPa
$\sigma_{D,Mag}$	Druckspannung Magnet	MPa
$\sigma_{dP}$	Spannung der Proportionalitätsgrenze	MPa
$\sigma_k$	Knickspannung	MPa
$\sigma_{Z,Mag}$	Zugspannung Magnet	MPa
$\tau$	Schubspannung	MPa



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Das Erreichen von Klimazielen zur Eingrenzung der globalen Erwärmung stellt eine historische Herausforderung dar. Ein Hauptverursacher von globalen Treibhausgasemissionen mit einem Anteil von 21 % ist der Verkehrssektor (Crippa et al. 2024). Der Wandel hin zur Elektromobilität bietet das Potenzial, die Emissionen im Verkehrssektor maßgeblich zu reduzieren. Im Gegensatz zu herkömmlichen Fahrzeugen werden für die Elektromobilität nicht Öl oder Gas für den Betrieb, sondern andere Ressourcen wie Kupfer oder Seltene Erden für Fahrzeugkomponenten benötigt. Insbesondere Seltene Erden wurden bereits von der Europäischen Union und dem Weißen Haus als kritische Rohstoffe ausgerufen (Biden-Harris Administration 2022, S. 1; Szczepanski 2021). Die Seltenen Erden kommen in Fahrzeugen zum größten Teil als Magnetwerkstoff im elektrischen Traktionsmotor, einer Kernkomponente des elektrischen Antriebsstrangs, zum Einsatz (Rom et al. 2024, S. 738). Neben der begrenzten Verfügbarkeit (Dentry et al. 2023) sind gleichzeitig die mit der Gewinnung der Rohstoffe hohen verbundenen Emissionen (Jin et al. 2018, S. 3799) sowie potenzielle politische Abhängigkeiten kritisch (Ferreira & Critelli 2022, S. 64), da China 95 % des weltweit verfügbaren Neodyms exportiert (Schillingmann et al. 2021, S. 2). Hinzu kommen die enormen Kosten der Magnete, wodurch die Materialkosten des Rotors für über ein Drittel der Gesamtkosten des Elektromotors verantwortlich sind (Schillingmann et al. 2021, S. 2; Stanek et al. 2021, S. 52).

Der am häufigsten eingesetzte Typ elektrischer Traktionsantriebe ist aufgrund seiner überlegenen Effizienz und Leistungsdichte die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM) (Neß & Raggl 2022, S. 41; Stanek et al. 2021). Zwar kommen alternative Elektromotoren wie die Asynchronmaschine (ASM) und die Fremderregte Synchronmaschine (FSM) ohne die Nutzung von Seltenerd magneten aus, sie benötigen jedoch einen höheren Kupfereinsatz (Neß & Raggl 2022, S. 42) und weisen über ihre Lebensdauer eine schlechtere CO<sub>2</sub>-Bilanz als PSMs auf (Souza et al. 2025, S. 11). Die zum Einsatz kommenden Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) Hochleistungsmagnete beinhalten die Seltenen Erden Neodym sowie Dysprosium und Terbium zur Steigerung der Temperaturbeständigkeit (Maxwell 2024; Sagawa et al. 1984, S. 1587–1588).

Einen weiteren kritischen Aspekt stellt der steigende Bedarf an Seltenen Erden in anderen Zukunftstechnologien wie der Windkraft dar, wobei der größte Absatz von Seltenen Erden den elektrischen Traktionsmotoren zuzuordnen ist (Dias et al. 2020, S. 15).

Die genannten Herausforderungen im Kontext der Seltenen Erden können durch die Etablierung einer Zirkulärwirtschaft, also der Demontage und Wiederaufbereitung von Altteilen, maßgeblich angegangen werden (Schönfeld et al. 2024, S. 2). Die Demontage der Magnete stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Die sich im Rotor der PSM befindlichen Seltenerd-magnete müssen für den Betrieb mit über 18.000 U/min sowie thermischen Belastungen ausreichend gesichert sein (Krings & Monissen 2020, S. 1808). Diese hohen Anforderungen an die Verbindungstechnik führen zu nicht lösbaren Verbindungen, die eine zerstörungsfreie Demontage zur Umsetzung hochwertiger Werterhaltungsstrategien erschweren (Ihne et al. 2024a, S. 4).

Die Demontage dieser Verbindungen soll möglichst automatisiert erfolgen, damit kritische Demontageschritte prozesssicher sowie kosteneffizient umgesetzt werden können (Poschmann et al. 2020, S. 343). Zudem gilt es den Demontageprozess flexibel zu gestalten, sodass Elektromotoren verschiedener Hersteller demontiert werden können.

In dieser Arbeit soll daher der Prozess der Magnetdemontage erfolgreich realisiert werden zur Rückgewinnung der wertvollen Magnete. Es gilt die Magnete automatisiert, flexibel sowie zerstörungsfrei zu demontieren, damit sie dem Stoffkreislauf wieder zugeführt werden können. Gewonnene Erkenntnisse aus der Magnetdemontage können zudem in die Produktgestaltung zukünftiger elektrischer Traktionsmotoren einfließen.

## **1.2 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 2 werden Aufbau und Funktionsweise sowie die Grundlagen zur Auslegung von PSM Rotoren vorgestellt. Es wird der Stand der Technik von Verbindungselementen von PSM Rotoren behandelt. Insbesondere etablierte Magnetfixierungen sowie auf Patenten basierende zukünftige Möglichkeiten zur Magnetfixierung werden betrachtet. Abschließend werden bereits bestehende Ansätze bezüglich Werterhaltungsstrategien von Elektromotoren und Seltenerd-magneten beschrieben. Daraus leitet sich der Forschungsbedarf ab.

In Kapitel 3 werden Zielsetzung sowie die Vorgehensweise inklusive gewählter Methoden beschrieben. Zudem werden Rahmenbedingungen für den Betrachtungsraum gewählt.

In Kapitel 4 wird eine Prozesskette für die Demontage von PSM Rotoren abgeleitet und prototypisch umgesetzt. Ausgangszustand sind magnetische Rotoren und Endergebnis demontierte Blechpakete.

Einflussparameter der Magnetdemontage werden in Kapitel 5 systematisch identifiziert und anschließend in Kapitel 6 simulativ untersucht. Es werden für unterschiedliche Magnetfixierungen numerische und analytische Modelle entwickelt, anhand derer der Einfluss von Parametern quantifiziert sowie auftretende Demontagekräfte und mechanische Spannungen ermittelt werden.

Kapitel 7 umfasst die Entwicklung und Implementierung einer Demontagezelle, welche anschließend für experimentelle Versuchsreihen zur Magnetdemontage eingesetzt wird. Die Versuchsreihen untersuchen Parameter, die im vorherigen Kapitel als besonders relevant oder schwer zu quantifizieren eingestuft wurden.

In Kapitel 8 wird die Magnetdemontage unter Verwendung der zuvor entwickelten Modelle und der Demontagezelle validiert. Hierfür werden die Magnete eines repräsentativen Serien-Elektromotors vollständig demontiert.

In Kapitel 9 werden Empfehlungen für die zukünftige Gestaltung von Magnetfixierungen sowie deren Demontageprozess gegeben und bewertet.

Im letzten Kapitel erfolgen eine Abschlussdiskussion sowie die Empfehlungen bezüglich zukünftiger Untersuchungen.

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschine

Die PSM stellt die dominierende Technologie im Bereich der elektrischen Traktionsmotoren dar. Im Vergleich zur FSM und zur ASM zeichnet sie sich durch eine hervorragende Leistungsdichte sowie einen Wirkungsgrad von bis zu 96 % aus (Neß & Raggl 2022, S. 42).

Der Stator und der Rotor der PSM bilden die Aktivteile des Elektromotors. Die mit Drehstrom durchflossenen Kupferwicklungen im Stator bilden ein elektromagnetisches Drehfeld aus, wodurch in Wechselwirkung mit dem mit Dauermagneten bestückten Rotor ein Drehmoment erzeugt wird (Doppelbauer 2025, S. 206–209). Beide Aktivteile sind aus elektrisch gegeneinander isolierten Elektroblechen zusammengesetzt, mit der Intention Wirbelströme zu vermeiden (Doppelbauer 2025, S. 254). Elektrische Traktionsmotoren sind in der Regel als Innenläufer ausgeführt, der Rotor befindet sich innerhalb des Stators (Krings & Monissen 2020, S. 1810). Als Permanentmagnete kommen NdFeB-Magnete aufgrund der hohen erreichbaren Leistungsdichte und Effizienz zum Einsatz. Innerhalb des Blechpakets liegende Magnete werden vergrabene Magnete genannt, die bei elektrischen Traktionsmotoren bevorzugt zum Einsatz kommen (Krings & Monissen 2020, S. 1810). Alternativ kommen Oberflächenmagnete zum Einsatz, welche am Außendurchmesser des Rotors befestigt sind. Aufgrund der nicht gegebenen Relevanz für elektrische Traktionsmotoren werde diese in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

### 2.2 Aufbau von PSM Rotoren

Die Demontage der sich innerhalb des Rotors befindlichen Magnete erfordert ein umfassendes Produktverständnis. PSM Rotoren besitzen aufgrund ihrer Funktionsweise ein sehr ähnliches Design (Heim et al. 2023b, S. 72). Die wichtigsten Bestandteile sind, wie in Abbildung 2-1 dargestellt, die Rotorwelle, Lager, Wuchtscheibe, Blechpakete und Magnete.

Die Blechpakete werden von zwei Wuchtscheiben begrenzt. Ein Blechpaket besteht aus einzelnen Blechschnitten. Die Blechschnitte können in einem Stanzprozess oder mittels Laserschneidprozess hergestellt werden. Die Blechpakete sind leicht gegeneinander verdreht, was zu einer Verbesserung des Noise Vibration Harshness (NVH) Verhaltens führt (Redlich et al. 2021, S. 5; Wang et al. 2020, S. 135). Die Magnete

können innerhalb des Blechpakets auf verschiedene Weisen angeordnet sein und verschiedene Größen aufweisen, wie in Abbildung 2-1 gezeigt wird. Die Magnete sind quaderförmig mit abgerundeten Kanten ausgeführt, sodass sie kosteneffizient in einem Sinterprozess mit anschließendem Zuschneiden hergestellt werden können. Der gesinterte Werkstoff ist spröde. Die Fixierung der Magnete wird ausführlich in Kapitel 2.4.4 behandelt.

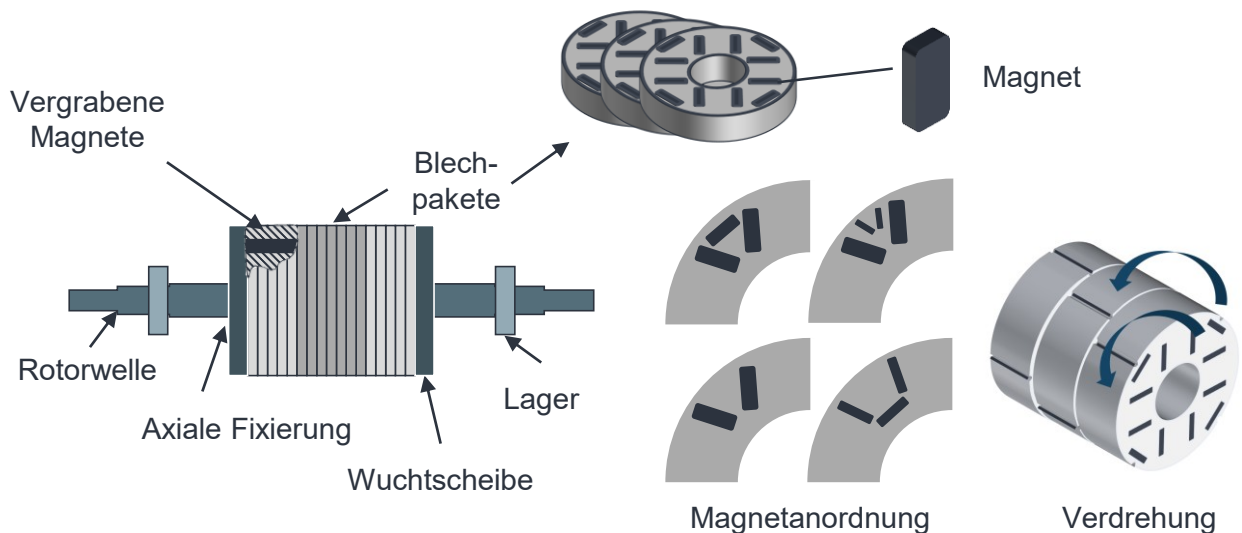


Abbildung 2-1: Aufbau eines PSM Rotors und dessen Komponenten nach (Heim et al. 2025, S. 2).

## 2.3 Auslegung von PSM Rotoren

Der Prozess zur Auslegung von PSM Rotoren erfolgt als Kombination der elektromagnetischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften der Maschine (Kalt 2021, S. 9), wobei Stator und Rotor stets als Gesamtsystem betrachtet werden (Kalt 2021, S. 16). Da die elektromagnetische Auslegung des Rotors und Stators eine untergeordnete Rolle im Kontext dieser Arbeit bilden, wird im Folgenden nur bedingt darauf eingegangen. Für die mechanische Auslegung von PSM Rotoren sind als Lasten die Drehzahl, Drehmoment, Beschleunigungen durch Stöße und die Betriebstemperatur relevant. Typischerweise stellt die Fliehkraft die größte Belastung aufgrund der hohen Drehzahlen dar (Doppelbauer 2025, S. 242). In der Regel erfolgt eine mechanische Finite-Elemente-Simulation mit anschließender experimenteller Validierung als Festigkeitsnachweis.

### 2.3.1 Drehzahl

Mit den hohen Drehzahlen des elektrischen Traktionsantriebs von bis zu 21.000 U/min (Hyundai 2025; Xiaomi 2023) gehen gleichzeitig hohe Anforderungen an Bauteilfestigkeiten und die Unwucht einher (Wößner et al. 2021, S. 5). Um eine unzulässig hohe Unwucht infolge einer ungleichmäßigen Massenverteilung bezüglich der Rotationsachse zu vermeiden, müssen Komponenten sowie Verbindungselemente entsprechend ausgewählt und toleriert werden. Die Unwucht kann zwar durch einen Auswuchtprozess ausgeglichen werden, jedoch ist eine zu große Unwucht bei nicht ausreichendem Wuchtbudget der Wuchtscheiben unzulässig (Peter 2018, S. 30). Wößner zeigt, dass ein radialer Versatz des Blechpakets in Bezug auf die Rotorwelle hohen negativen Einfluss auf die Rotorunwucht hat. Daher muss das Blechpaket stets bezüglich der Rotorwelle zentriert sein. Gleiches gilt in reduziertem Maße ebenfalls für die Wuchtscheiben (Wößner 2025, S. 66–70). Eine axiale Auffächerung des Blechpakets ggf. durch eine Delamination einzelner Blechschnitte beeinflusst ebenfalls die Rotorunwucht. Um dieser entgegen zu wirken, werden Blechpakete häufig axial verspannt. Die Umsetzung ist detailliert im Kapitel Verbindungselemente beschrieben. Die sich innerhalb des Rotors befindlichen Magnete dürfen keine Setzbewegungen während des Betriebs erfahren, da sich hierdurch ebenfalls die Unwucht unzulässig ändern kann. Daher sind diese häufig stoffschlüssig im Blechpaket verklebt (Wößner 2025, S. 68–69).

### 2.3.2 Temperatur

Die Fügeverbindungen müssen der Betriebstemperatur des Rotors standhalten, die insbesondere bei kraftschlüssigen Verbindungen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Fügepartner relevant sind. Die Betriebstemperatur des Rotors ist in der Regel auf ca. 150 °C aufgrund der thermischen Belastbarkeit der Magnete limitiert (Kalt 2021, S. 13). Neben dem generellen Kühlkonzept bestehen verschiedene Ansätze, um kritische Temperaturen der Magnete nicht zu überschreiten:

1. Reduktion von Wirbelströmen im Magneten
2. Magnete mit hoher Koerzitivfeldstärke
3. Thermische Anbindung der Magnete an das Blechpaket

#### **Reduktion von Wirbelströmen im Magneten**

Im Gegensatz zu den lamellaren Blechpaketen ist der Magnet ein Vollkörper, in dem das Drehstromfeld des Stators Wirbelströme induziert. Der Magnet selbst kann

ebenfalls segmentiert werden, wodurch die Wirbelströme verringert werden (Wang et al. 2019, S. 4). Die Magnete können in Segmente geteilt und einzeln in das Blechpaket montiert oder zuvor verklebt werden. Die Montage von bereits verklebten Magnetsegmenten reduziert den Montageaufwand im Vergleich zu mehreren Einzelmagneten, erhöht allerdings die Magnetkosten aufgrund des Klebprozesses. Alternativ können Magnete partiell durch Schnitte segmentiert werden, was einen Kostenvorteil erbringen kann, allerdings die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflusst (Wang et al. 2019, S. 4). Die Orientierung der Segmentierung kann in beliebiger Richtung umgesetzt werden. Die Segmentierungskonzepte sind in Abbildung 2-2 dargestellt.

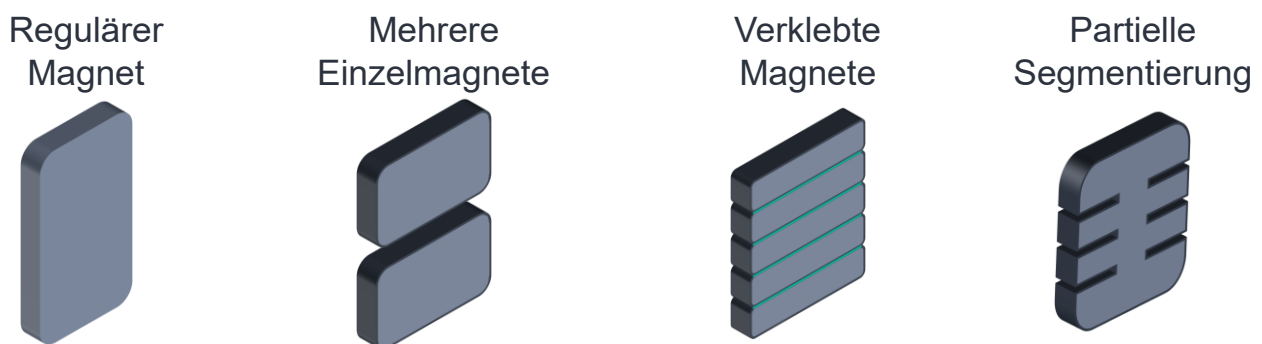


Abbildung 2-2: Arten der Magnetsegmentierung.

### **Magnete mit hoher Koerzitivfeldstärke**

Die einfachste Möglichkeit die Betriebstemperatur des Rotors zu steigern, besteht darin, Magnete mit hoher Temperaturbeständigkeit auszuwählen. Dabei ist die Koerzitivfeldstärke, die stark temperaturabhängig ist, ein Maß für die Widerstandsfähigkeit gegen das Entmagnetisieren durch ein externes Magnetfeld. Die Koerzitivfeldstärke wird durch das Beimischen von Dysprosium und Terbium erhöht, was mit einer enormen Steigerung der Materialkosten einhergeht (Maxwell 2024; Sagawa et al. 1984, S. 1587–1588).

### **Thermische Anbindung der Magnete an das Blechpaket**

Eine weitere Möglichkeit die maximale Betriebstemperatur des Rotors zu steigern, besteht darin, die thermische Anbindung der Magnete an das Blechpaket zu verbessern. Die thermische Anbindung der Magnete ermöglicht es, Wärme abzuführen, die innerhalb des Magneten durch Wirbelströme erzeugt wird (Lamarre et al. 2024, S. 3). Die thermische Leitfähigkeit zwischen Magnet und Blechpaket wird maßgeblich durch die Ausführung der Magnetfixierung bestimmt, welche in Kapitel 2.4.4 näher betrachtet wird.

### 2.3.3 Magnetischer Fluss

Einen weiteren bei der Auslegung zu berücksichtigenden Aspekt stellt die Leitung des magnetischen Flusses dar. Neben der in Kapitel 2.2 vorgestellten Magnetanordnung kann im Blechpaket mit sog. Flussbarrieren gezielt Material entfernt werden, um den magnetischen Fluss zu leiten. Hierbei wird die stark unterschiedliche magnetische Permeabilität von Elektroblech (Blechpaket) und Luft (Flussbarriere) genutzt (Schauerte et al. 2021, S. 828). Hohe Drehzahlen erfordern jedoch Strukturen, die der Fliehkraft standhalten, wodurch häufig ein Zielkonflikt entsteht (Hofer et al. 2018, S. 154). Zusätzlich gilt es, die Position der Magnete innerhalb der Magnettasche in Bezug auf den elektromagnetischen Fluss zu beachten. Aufgrund der Toleranzen von Magnet und Blechpaket kann sich der Magnet in Abhängigkeit der Magnetfixierung innerhalb der Magnettasche im Bereich der Größenordnung des Fügspiels frei positionieren, was den magnetischen Fluss beeinflusst. Eine definierte Positionierung der Magnete innerhalb der Magnettasche besitzt zudem einen positiven Einfluss auf die Rotorunwucht, da keine Unwucht durch die Magnetpositionierung eingebracht wird (Wößner et al. 2019, S. 3).

### 2.3.4 Neodym-Eisen-Bor Magnete

NdFeB-Magnete weisen unter den Magnetwerkstoffen die höchste Energiedichte auf und werden in verschiedene Güteklassen, sogenannte „Grades“ (englischer Fachbegriff), eingeteilt, die mit einem Zahlen- und Buchstabensystem klassifiziert werden. Ein Magnetgrade lautet beispielsweise N42UH, wobei der Buchstabe „N“ für Neodym steht. Kein Buchstabe am Ende der Bezeichnung steht für ca. 80 °C, H für 120 °C, UH für 150 °C und TH für 180 °C maximale Betriebstemperatur des Magneten (SM Magnetics 2024; Stanford Magnets 2025).

Die Feldstärke des Magneten wird typischerweise mit dem maximalen Energieprodukt  $BH_{\max}$  angegeben, welches für Neodymmagnete im Bereich von ca. 26 bis 52 MGOe (Mega-Gauss-Oersted) liegt (Arnold Magnetic Technologies 2025; Thianhe Magnetics; Thyssenkrupp 2015a, S. 2).

Dabei gilt es zu beachten, dass alle Angaben bezüglich der Magnetgrades lediglich Richtwerte sind. Die tatsächlichen physikalischen Eigenschaften gilt es mit dem Hersteller individuell abzustimmen. Die Eigenschaften der Magnete lassen sich anhand der Legierungszusammensetzung sowie des Herstellungsverfahrens beeinflussen.

Typische Materialzusammensetzungen von NdFeB-Magneten sind in Tabelle 2-1 aufgelistet.

Tabelle 2-1: Legierungszusammensetzung von NdFeB-Magneten (Maxwell 2024) .

<b>Element</b>	<b>Symbol</b>	<b>Konzentration in Gew. %</b>
Neodym	Nd	15 – 32
Eisen	Fe	Rest
Bor	B	0,9 – 1,2
Dysprosium	Dy	0 – 12
Terbium	Tb	0 – 3
Sonstiges	-	0 – 5

Die mechanischen Eigenschaften von NdFeB-Magneten sind von der Herstellung der Magnete mittels Sinterprozess abhängig. Hierdurch weisen sie ein sprödes Verhalten auf. Sie sind empfindlich gegenüber Zugbelastungen und widerstandsfähig bei Druckbelastung. In Tabelle 2-2 sind Werkstoffdaten von NdFeB-Magneten verschiedener Hersteller aufgezeigt.

Tabelle 2-2: Mechanische Eigenschaften von NdFeB-Magneten (Eclipse Magnetics; MatWeb; Miotti 2025; Thyssenkrupp 2015b).

<b>Eigenschaft</b>	<b>Symbol</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
E-Modul	$E_{\text{Mag}}$	140 - 160	GPa
Max. Druckspannung	$\sigma_{\text{D, Mag}}$	750 - 1050	MPa
Max. Biegespannung	$\sigma_{\text{B, Mag}}$	180 - 270	MPa
Max. Zugspannung	$\sigma_{\text{Z, Mag}}$	75 - 82,7	MPa
Poissonzahl	$\nu_{\text{Mag}}$	0,24	-
Dichte	$\rho_{\text{Mag}}$	7,5 - 7,8	g/cm <sup>3</sup>

Ein weiterer Aspekt, den es bei der Auslegung zu berücksichtigen gilt, ist die Korrosion des Magnetwerkstoffes. Die reaktionsfreudige Legierung benötigt eine Beschichtung zum Schutz gegen Degradation von mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften. NdFeB-Magnete sind typischerweise mit Nickel, Nickel-Kupfer-Nickel, Zink, Phosphatierung oder Epoxidharz beschichtet (Arnold Magnetic Technologies 2025; Songke 2017; Thianhe Magnetics; Yunsheng Deutschland 2022).

Magnete müssen vor ihrem Einsatz aufmagnetisiert werden. Dies erfolgt mit einem externen Magnetfeld, welches kurzzeitig durch stromdurchflossene Spulen erzeugt wird. Bei elektrischen Traktionsantrieben in Serienproduktion erfolgt das Magnetisieren am

Ende der Prozesskette in der Rotorproduktion, da ein Magnetfeld die technische Sauberkeit sowie die Handhabung während aller Prozessschritte negativ beeinflusst.

Ohne äußere Einwirkung bleibt das Magnetfeld bestehen. Magnete entmagnetisieren durch die Einwirkung eines externen elektrischen Feldes, welches ihre Koerzitivfeldstärke übersteigt. Durch einen magnetischen Impuls oder ein abklingend schwingendes Magnetfeld kann die Entmagnetisierung umgesetzt werden (Hogberg et al. 2015, S. 1243). Die hohe Koerzitivfeldstärke kann den Prozess technisch herausfordernd gestalten. Jedoch bietet der Prozess hohes Potenzial bezüglich Taktzeit und Energieeffizienz. Alternativ führt das Überschreiten der Curie Temperatur, die bei NdFeB Magneten bei ca. 312 bis 450 °C liegt, ebenfalls zum vollständigen Entmagnetisieren (Hogberg et al. 2015, S. 1243; Ihne et al. 2023a, S. 3; Ihne et al. 2024a, S. 6; Ihne et al. 2023b, S. 463). Bei entsprechend hohen Temperaturen kann sich die Beschichtung auflösen oder korrodieren, was zur Oxidation des Magnetmaterials führt.

## **2.4 Verbindungselemente in PSM Rotoren**

Eine effektive Demontage erfordert detaillierte Kenntnisse über die in PSM Rotoren eingesetzten Verbindungselemente. Fügeverbindungen lassen sich in Stoffschluss, Formschluss und Kraftschluss einteilen, wobei stoffschlüssige Verbindungen in der Regel am wenigsten für eine Demontage geeignet sind (Grote & Feldhusen 2014, F 40).

### **2.4.1 Blechpaket**

Das Blechpaket setzt sich aus mehreren gegeneinander isolierten Einzelblechen zusammen. Die Einzelbleche können durch das Einbringen von Durchsetzungen während des Stanzprozesses miteinander verbunden werden. Dieses Herstellungsverfahren bietet höchste Produktivität und bildet lediglich eine punktuelle Verbindung zwischen den Einzelblechen aus. Die beim Stanzen entstehenden Stanzgrate können die elektromagnetischen und mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen (Leuning et al. 2018, S. 5) und zusammen mit der Stanzpaketierung Wirbelströme hervorrufen (Lamprecht 2014, S. 127). Alternativ können Blechpakete vollflächig oder mittels Klebepunkten stoffschlüssig verbunden werden, was zu einer widerstandsfähigeren Verbindung führt (Teprosa; Voestalpine 2025).

### 2.4.2 Rotorwelle – Lager

Die Fügeverbindung zwischen den beiden Lagern und der Rotorwelle wird für gewöhnlich tangential und radial durch eine Passung sowie axial durch einen Formschluss realisiert (Schaeffler Technologies AG & Co. KG). Aufgrund hoher Anforderungen an die Lagerung von elektrischen Traktionsmotoren eignen sich Fest-/Loslagerungen oder angestellte Lagerungen mit X-Anordnung, da sich der Aktivteil des Rotors zwischen den beiden Lagern befindet. Entsprechend der gewählten Lagerung müssen die Freiheitsgrade verschiedener Richtungen durch geeignete Verbindungen begrenzt werden. Passungen für die tangentielle und radiale Fixierung richten sich in der Regel nach den ISO Toleranzklassen ISO 286-1 und ISO 286-2 und werden auf Basis von Lagerherstellern ausgewählt (Schaeffler Technologies AG & Co. KG). Für axiale Verbindungen kommen eine Vielzahl an Verbindungselementen in Frage. Speziell für Lager werden in axialer Richtung häufig formschlüssige Verbindungen wie Wellenschultern, Deckel, Sicherungsringe, Sprengringe, Muttern oder Kappen eingesetzt (Schaeffler Technologies AG & Co. KG).

### 2.4.3 Rotorwelle – Blechpaket – Wuchtscheibe

Die Verbindung zwischen Rotorwelle und Blechpaket erfolgt häufig in Kombination mit der Wuchtscheibe, insbesondere in axialer Richtung, bedingt durch deren axialen Kontakt. Die Verbindung von Blechpaket und Rotorwelle erfordert die Übertragung des vom Elektromotor erzeugten Drehmoments sowie die Aufnahme von axialen sowie radialen Kräften. Radiale Kräfte werden formschlüssig übertragen. Zudem ist eine Presspassung für die Anforderungen an die Unwucht notwendig. Das Drehmoment kann ebenfalls durch eine Presspassung übertragen werden. Das benötigte Übermaß erfordert meist einen thermisch unterstützten Fügeprozess (Epskamp 2020). Das Übermaß kann reduziert werden, indem eine formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung für die Drehmomentübertragung eingesetzt wird. Diese kann durch eine Passfeder, Keil-, Zahn- oder Polygonwelle umgesetzt werden (Wößner 2025, S. 24–25). Da das Blechpaket als Nabe fungiert, lässt sich die formschlüssige Gestalt kostengünstig in den Stanzprozess integrieren. Formschlüssige Verbindungen können während der Produktion zusätzlich für die tangentielle Positionierung der einzelnen Blechpakete zur Umsetzung der Verschränkung genutzt werden. Axiale Kräfte können mittels einer Presspassung oder mit einer formschlüssigen Verbindung wie einer Wellenschulter oder Wellenmutter aufgenommen werden. Die lamellare Struktur des Blechpakets kann unter den

Betriebseinflüssen von Temperatur und Drehzahl in geringem Maße auffächern. Dem kann durch ein axiales Verspannen des Blechpaketes entgegengewirkt werden, was in der axialen Verbindung zur Rotorwelle integriert werden kann. Zu diesem Zweck muss mindestens eine der axialen Verbindungen eine Spannkraft aufbringen. Geeignete Verbindungen zum Verspannen sind Wellenmuttern oder ein Pressring, der unter Vorspannung montiert wird. Alternativ kann die Verspannung ebenfalls durch Zugstäbe oder eine federnde Wuchtscheibe abgebildet werden (Wößner et al. 2022a, S. 669–670).

#### 2.4.4 Magnetfixierung

Da diese Arbeit die Magnetdemontage adressiert und im Zuge der steigenden Stückzahlen der Elektromobilität zunehmend neue Fixierverfahren eingesetzt werden, liegt ein besonderer Fokus der Verbindungselemente auf der Magnetfixierung. Anforderungen an die Magnetfixierung sind die Fixierwirkung zum Vermeiden von unerwünschten Bewegungen der Magnete, die Aufnahme auftretender Belastungen, insbesondere der Zentripetalkraft sowie die Wärmeleitfähigkeit.

Die Magnettaschengeometrie wird stark von der Gestaltung der Flussbarrieren beeinflusst, wie bereits in Kapitel 2.3 aufgezeigt und in Abbildung 2-3 dargestellt.

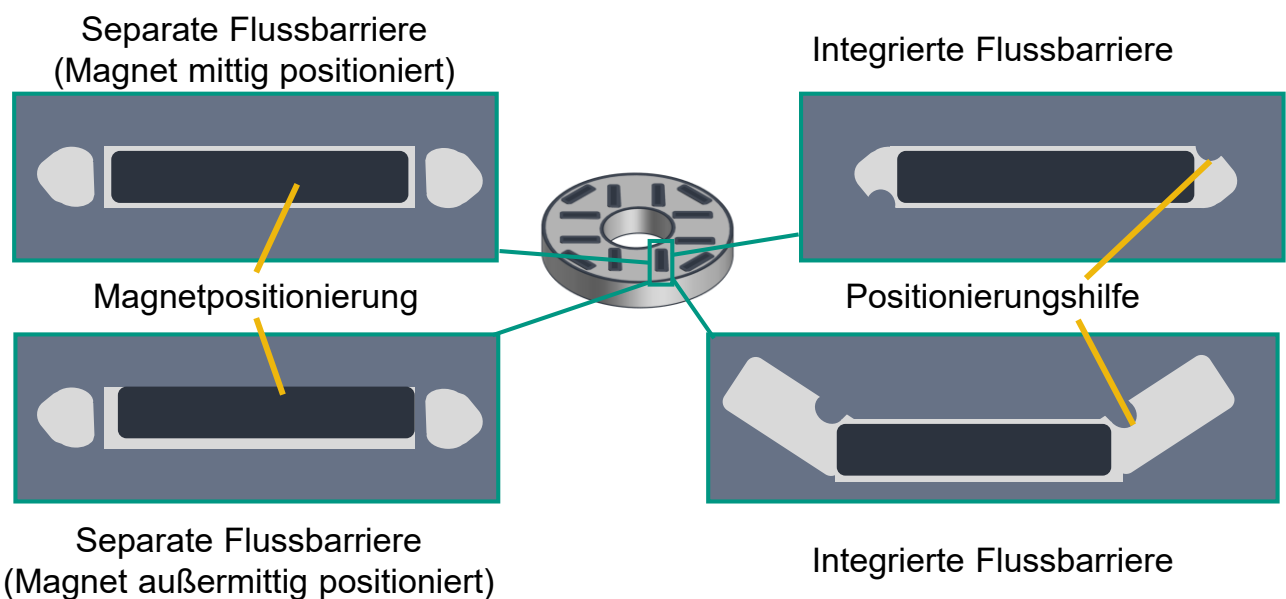


Abbildung 2-3: Unterschiedliche Ausführungen von Flussbarrieren.

Ist die Flussbarriere in Form einer separaten Tasche gestaltet, besitzt dies keinen relevanten Einfluss auf die Magnetfixierung. Wenn die Flussbarriere in die Magnettasche integriert ist, muss dies bei der Gestaltung der Magnetfixierung berücksichtigt werden,

beispielsweise durch eine Positionierungshilfe. Bestimmte Fixierungsarten können die Magnetposition innerhalb der Tasche definieren, wodurch der elektrische Fluss positiv beeinflusst werden kann (Gilde & Blaes 2020, S. 3).

Zunächst werden in dieser Arbeit die Fixierverfahren in mechanische und chemische Fixierverfahren eingeteilt, wie in Abbildung 2-4 dargestellt. Magnetfixierungen werden als mechanisch definiert, sofern der Montageprozess mechanisch und nicht chemisch ist. Die Anforderungen an die Magnetfixierung, insbesondere bezüglich der Unwucht, erfordern in der Regel kraftschlüssige oder stoffschlüssige Verbindungen. Formschlüssige Verbindungen von (Baumeister 2010; Podack 2006, S. 1; Schütz 2022, S. 1) werden nicht näher betrachtet, da sie die Anforderungen von Traktionsmotoren nicht erfüllen können (Wößner 2025, S. 5). In der Regel wird bei der mechanischen Magnetfixierung der Magnet an eine definierte Stelle innerhalb der Magnettasche ausgerichtet, was gemäß Kapitel 2.3 vorteilhaft ist. Zu beachten ist jedoch, dass z.B. Anpresskräfte innerhalb der Magnettasche zusätzlich Belastungen darstellen, die bei der Gestaltung des Elektromotors zu berücksichtigen sind. Mechanische Verbindungen können in Verbindungen mit Zusatzkomponenten und Verbindungen in Integralbauform klassifiziert werden. Die Integralbauform weist lediglich die Bauteile Magnet und Blechpaket auf, wobei in letzterem meist die Fixierwirkung integriert wird. Die Integration zielt darauf ab Kosten und Fertigungsschritte von weiteren Komponenten zu reduzieren, was jedoch mit einer Steigerung der Komplexität der Integralkomponente einher geht.

Chemische Magnetfixierungen basieren auf chemischen Prozessen, welche in Verbindung mit einem Kunststoff oder Klebstoff umgesetzt werden. Sie können untergliedert werden in deren Applikation und Härtung. Eine Kombination von mechanischen und chemischen Magnetfixierungen ist ebenfalls möglich.

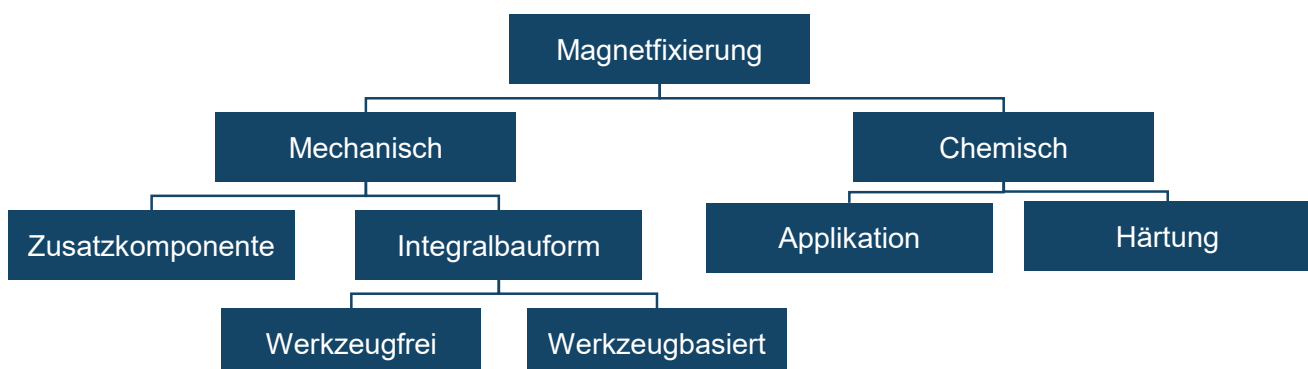


Abbildung 2-4: Einteilung von Magnetfixierungen.

### 2.4.4.1 Mechanische Verbindungen mit Zusatzkomponente

Verbindungen mittels Zusatzkomponente werden in unterschiedlichen Patenten behandelt, die in Abbildung 2-5 dargestellt sind. Das Funktionsprinzip ist stets ähnlich, lediglich die Komponente oder Komponenten zur Fixierung der Magnete unterscheiden sich bezüglich Geometrie, Werkstoff und Montageprozess. Eine beliebige Werkstoffauswahl der Zusatzkomponente ermöglicht einen hohen Gestaltungsspielraum.

Eine Ausführung von mechanischen Verbindungen mit Zusatzkomponente stellt die Magnetfixierung mittels Federblech dar (Dönges & Schulte 2021, S. 1; Kishi T., S. 11). Hierbei wird, wie in Abbildung 2-5 a) dargestellt, ein gewelltes Federblech zusammen mit dem Magneten in die Magnettasche eingebracht. Die Komprimierung des Federblechs ermöglicht eine kraftschlüssige Verbindung. Die Fixierkraft der Verbindung kann über die Breite des Federblechs sowie die Anzahl an Wellen und der Wellenhöhe eingestellt werden (Wößner et al. 2022a, S. 670).

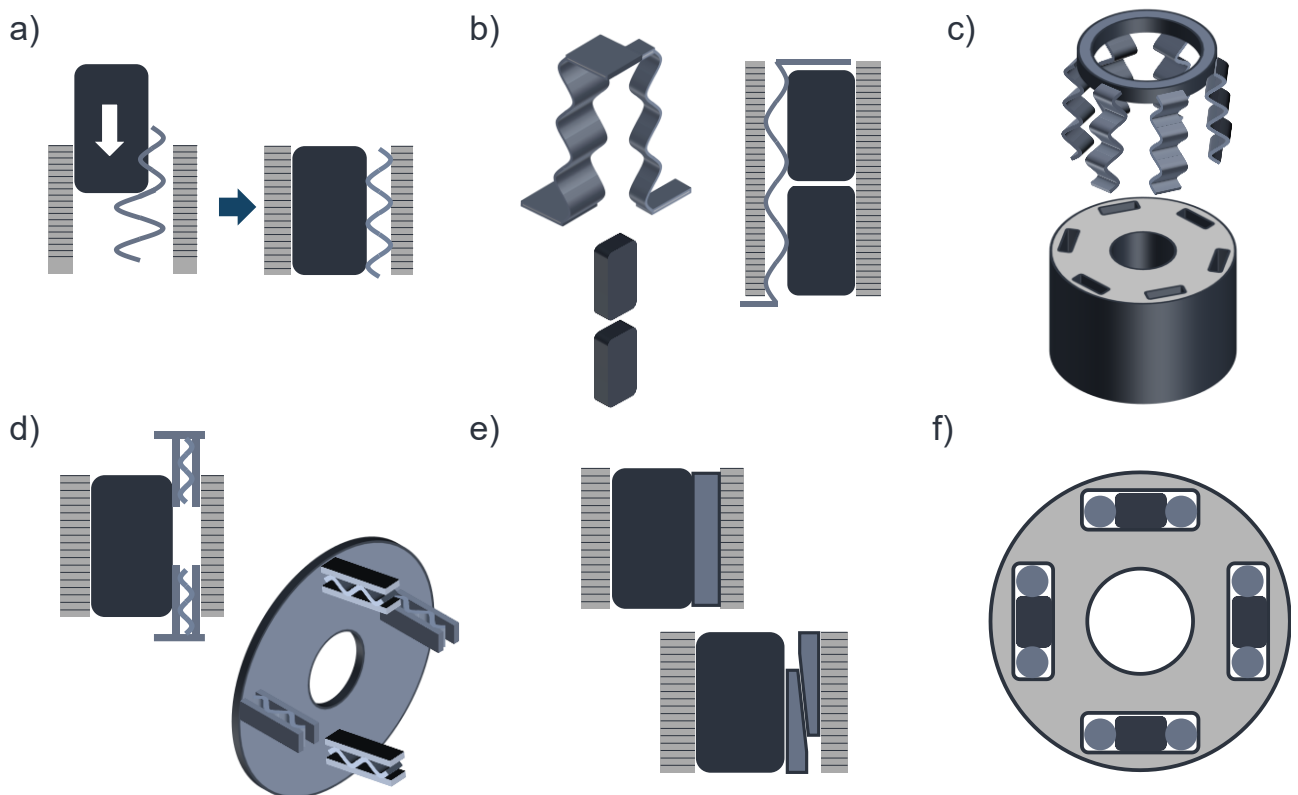


Abbildung 2-5: Verschiedene Ausführungen von mechanischen Magnetfixierungen mit Zusatzkomponente nach eigener Darstellung; a): (Dönges & Schulte 2021, S. 13), b): (Jugovic & El 2016, S. 16–17), c): (Asuman et al., 2020), d): (Kritharidou et al. 2010, 9,12), e): (Gilde & Blaes 2020), f): (Pieper & Bachmann 2021a, S. 8).

Eine andere Art Federblech ist in b) dargestellt. Es kommt eine Federstruktur zum Einsatz, die alle Magnete des Rotors innerhalb einer Magnettasche an zwei aneinandergrenzenden Seiten fixiert (Jugovic & El 2016, S. 1). Ein zusätzlicher Formschluss wird am oberen und unteren Ende durch eine 90° Umformung umgesetzt. Die Anzahl der Wellen entspricht dabei der Anzahl der Magnete, damit jeder Magnet die Fixierwirkung erfährt.

In c) wird ein zentraler Magnethalter eingesetzt, der seine Finger in jeweils eine Magnettasche einführt und die Magnete zur Fixierung radial durch die Fingerform nach außen drückt (Asuman et al. 2020, S. 11). Eine sehr ähnliche zentrale Komponente zur Magnetfixierung mit einzelnen Fingern ist in d) dargestellt. Die Klemmnasen sind dem Innendurchmesser der Drehachse zugewandt und fixieren in axialer sowie radialer Richtung. Die in die Komponente integrierte Feder verringert eine mechanische Belastung der Magnete, reduziert die Gefahr des Zerkratzens und ermöglicht eine Fixierwirkung über das gesamte Temperaturfeld (Kritharidou et al. 2010, S. 2).

In e) werden einzelne Zusatzkomponenten in die Magnettasche mit dem Magneten eingesetzt. Die Zusatzelemente bestehen aus Metall oder Kunststoff, wahlweise mit Glasfaserverstärkung. Hierbei ist auf die Temperaturbeständigkeit und den magnetischen Fluss zu achten (Gilde & Blaes 2020, S. 2). Die Zusatzkomponenten können die Fixierwirkung durch eine Presspassung, eine Keilform oder federelastische Eigenschaften in Querrichtung aufbringen (Gilde & Blaes 2020, S. 2–4). Zudem können die Zusatzkomponenten als Hohlkörper ausgeführt und zur Durchführung von Kühlmedium genutzt werden (Gilde & Blaes 2020, S. 4). Die Magnetfixierung f) basiert auf einem ähnlichen Funktionsprinzip zu e). Es werden Zusatzkomponenten in Zylinderform in die Magnettaschen zur Fixierung eingebracht. Abweichend ist hier die Nutzung von zwei Fixierkomponenten pro Magnettasche sowie das Einbringen durch Einpressen, Einschrauben oder Aufwärmen und Einschmelzen (Pieper & Bachmann 2021a, S. 7).

#### **2.4.4.2 Mechanische Verbindungen mit Integralbauform**

Mechanische Verbindungen mit Integralbauform werden innerhalb dieser Arbeit zusätzlich in werkzeugfreie und werkzeugbasierte Verbindungen eingeteilt. Bei werkzeugbasierten Verbindungen kommt ein spezielles Werkzeug zum Einsatz, während bei werkzeugfreien Verbindungen die Fixierwirkung durch die Montage des Magneten umgesetzt wird.

### 2.4.4.2.1 Werkzeugfreie Verbindungen in Integralbauform

Verschiedene Patente zeigen unterschiedliche Ausführungsformen von Magnetfixierungen mit werkzeugfreier Integralbauform in Abbildung 2-6.

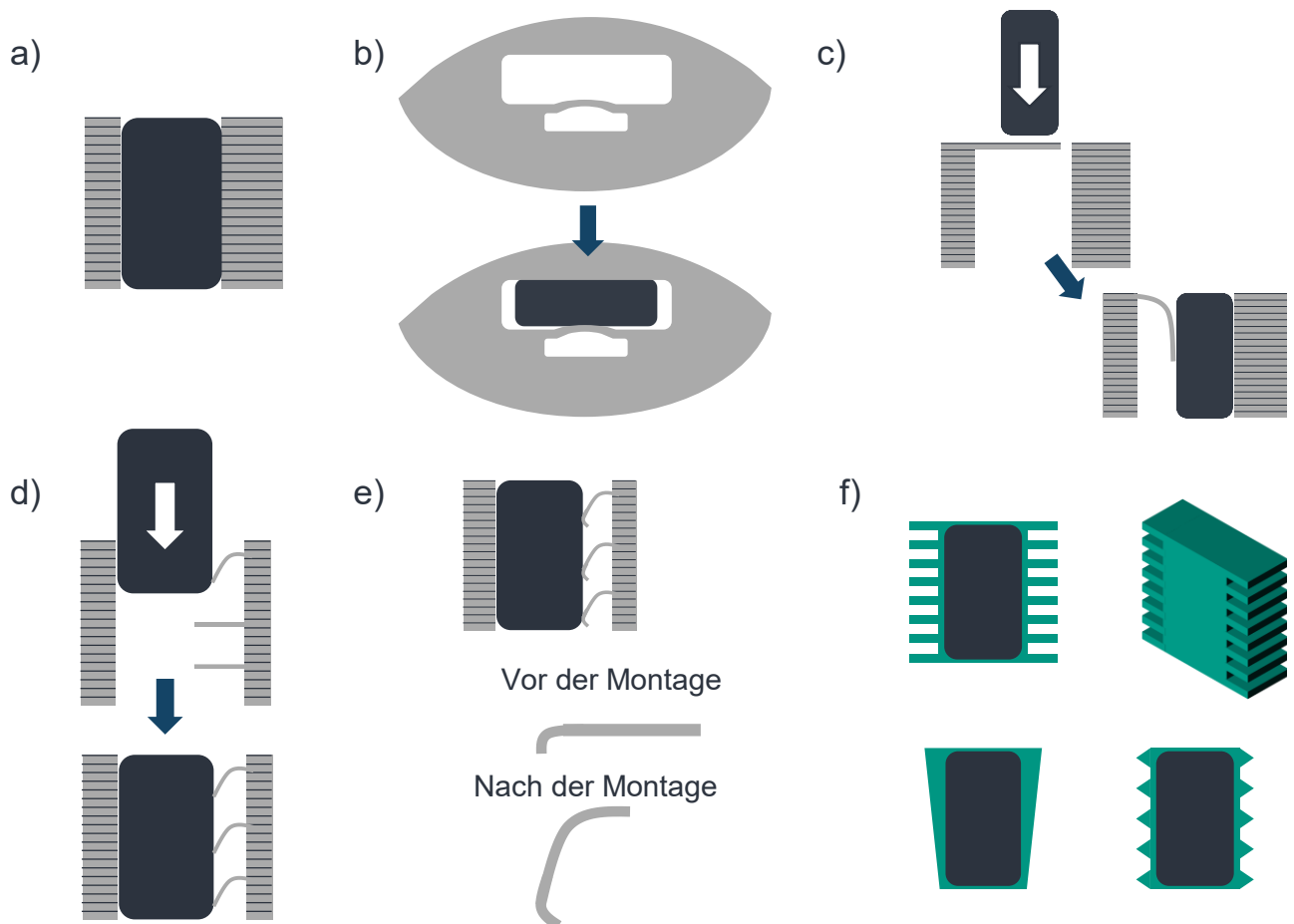


Abbildung 2-6: Magnetfixierungen in werkzeugfreier Integralbauform nach eigener Darstellung; a): (Wilhelm & Mann 2020, S. 1), b): (Schulde et al. 2017, S. 20), c): (Seidel et al. 2008, S. 1), d): (Lott et al. 2010), e): (Miyazono et al. 2023, S. 5), f): (Fröhlich 2016, S. 11).

Die Ausführung a) besteht darin, mittels eines Übermaßes eine kraftschlüssige Verbindung herzustellen. Das Fügen kann rein mechanisch oder durch Aufschrumpfen erfolgen, wobei entweder das Blechpaket erwärmt oder der Magnet gekühlt werden kann. Ein Vorteil dieser Verbindung besteht darin, dass kein Freiraum zwischen Magnet und Blechpaket besteht, was sich positiv auf den magnetischen Fluss und die thermische Anbindung des Magneten auswirkt. Nachteile stellen hohe Toleranzanforderungen sowie die hohe auftretende mechanische Belastung des Magneten dar. In einer ausführlichen Untersuchung zur Presspassung von Magneten in Blechpaketen wurden Beschädigungen an der Magnetbeschichtung sowie dem Magneten beobachtet, wodurch

ein direkter Einsatz dieser Technologie nicht realisiert werden konnte (Albrecht 2014, S. 137). In der gleichen Arbeit wird als Ergänzung zur Presspassung eine Opferschicht auf die Magnete aufgetragen, um die Beschädigung der Magnetbeschichtung zu vermeiden (Albrecht & Koenig 2012, S. 2), wobei weitere Untersuchungen empfohlen werden (Albrecht 2014, S. 142). In den Patenten von Abbildung 2-6 b) bis f) werden Federelemente eingesetzt, um einen Toleranzausgleich zu ermöglichen und die Beschädigung der Magnete zu vermeiden.

In b) wird ein Federelement durch eine Ausnehmung neben der Magnettasche realisiert, die sich beim Einführen des Magneten hauptsächlich elastisch deformiert und so eine kraftschlüssige Verbindung ermöglicht. Alternativ kann das Federelement mit einem offenen Ende gestaltet oder an der kurzen Seite des Magneten angebracht sein (Bekavac et al. 2007, S. 2). In Abbildung 2-6 c) wird eine Endlamelle verwendet, die beim axialen Einführen des Magneten plastisch umgeformt wird und den Magnet innerhalb der Magnettasche an die Wand drückt. So entsteht eine kraftschlüssige Verbindung. Das gleiche Wirkprinzip kommt bei d) zum Einsatz, wobei im Gegensatz zu c) nicht eine Endlamelle, sondern Lamellen als sog. Feder- oder Klemmnasen innerhalb des Blechpakets eingesetzt werden. Dies ermöglicht einen höheren Gestaltungsfreiraum der Verbindung durch den Einsatz einer Vielzahl von Lamellen. Zudem kann die Form der Fixierelemente variiert werden, um die gewünschte Fixierkraft zu erreichen und eine bessere Materialausnutzung der Feder zu ermöglichen (Böttger et al. 2016, S. 3; Lott et al. 2010, S. 2–3). Eine Erweiterung der Fixierelemente stellt e) durch abgerundete Federnasen dar. Die Rundung vermeidet Schäden am Magneten, die bei der Montage, insbesondere durch vorhandene Stanzgrate, verursacht werden können (Miyazono et al. 2023, S. 9). Weiterhin kann neben der Rundung zusätzlich die Kontaktfläche erhöht werden, um die Magnete zu schonen (Wetterau 2017, S. 7). In f) wird im Gegensatz zu den anderen Patenten die Fixierwirkung nicht im Blechpaket, sondern im Magneten integriert. Der Magnet wird mit Kunststoff umspritzt, wobei eine Fixierstruktur eingebracht wird. Die Fixierstruktur kann, wie in Abbildung 2-6 e) dargestellt, als Lamellenstruktur, mit einer Querprofilierung oder konisch ausgeführt sein. Der sich im Inneren des Verbindungselements befindliche Magnet kann vom Kunststoff vor Beschädigungen und Umwelteinflüssen geschützt werden (Fröhlich 2016, S. 3).

#### **2.4.4.2.2 Werkzeugbasierte Verbindungen in Integralbauform**

Bei den werkzeugbasierten Verbindungen in Integralbauform werden die Magnete nach dem kraftfreien Einführen in die Magnettasche mit einem Werkzeug fixiert. Das

Werkzeug verformt das Blechpaket plastisch, um eine kraftschlüssige Verbindung zu erzeugen. Verschiedene Patente hierzu sind in Abbildung 2-7 dargestellt.

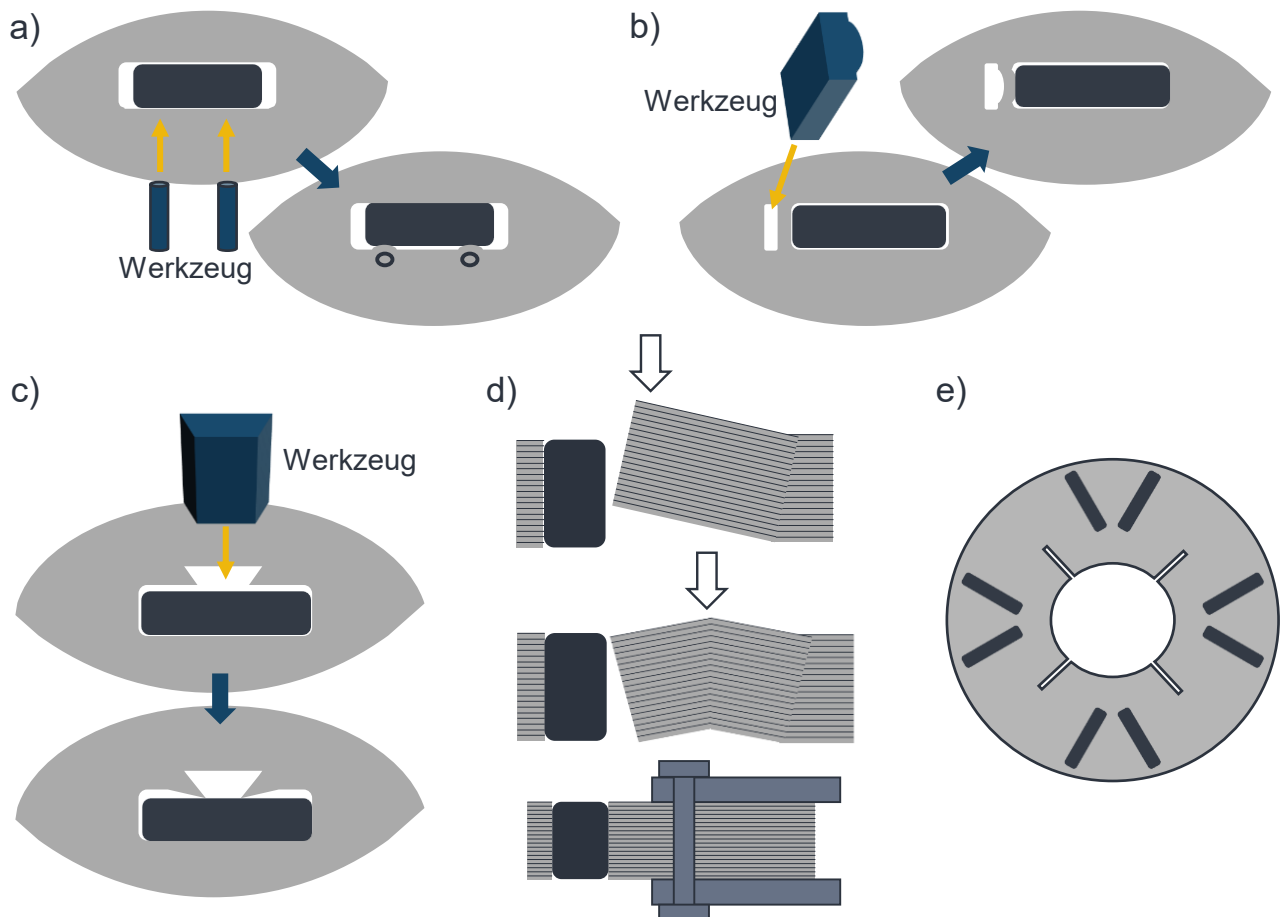


Abbildung 2-7: Magnetfixierungen in werkzeuggestützter Integralbauform nach eigener Darstellung; a): (Koenig 2011, S. 7), b): (Do et al. 2023, S. 2), c): (Utsumi et al. 2012, S. 32), d): (Marschall et al. 2016, S. 7), e): (Gilde 2020, S. 1).

In Patent a) werden die Magnete verstemmt, indem stirnseitig eine plastische Verformung der Magnettasche durch ein Werkzeug erzeugt wird. Hierdurch entsteht eine kraftschlüssige Verbindung (Koenig 2011). Eine Anpassung der Blechpaketgeometrie für dieses Fixierverfahren ist nicht notwendig. Detaillierte Untersuchungen zum Verstemmen als Technologie zur Magnetfixierung werden in (Albrecht 2014, S. 121–132) durchgeführt. Hierbei wird der Einfluss der Parameter Einpresstiefe des Werkzeugs, Randabstand des Werkzeugs zur Magnettasche, Werkzeuggeometrie, Anzahl der Verstemmpunkte pro Magnet, Verstemmrichtung (einseitig oder beidseitig) und Verstemmgeschwindigkeit auf die Haltekraft des Magneten und dessen Beschädigung untersucht. Durch Optimierung von Werkzeuggeometrie, Einpresstiefen sowie Randabstand konnte eine maximale Haltekraft von 1350 N erreicht werden (Albrecht 2014, S. 130).

In b) und c) werden Stege, die sich neben der Magnettasche befinden, durch das axiale Einführen eines säulenförmigen Werkzeugs verformt, um eine Fixierwirkung zu erzeugen. In c) sind die Federelemente derart gestaltet, dass sie zu große Kräfte nicht auf den Magnet übertragen, sondern eine Ausweichbewegung durchführen, was toleranzfreundlicher ist (Utsumi et al. 2012, S. 6).

In d) wird die gesamte Höhe des Blechpakets als Biegelasche eingesetzt. Hierfür wird die vorgeformte Biegelasche nach der Montage der Magnete mit einer Spannkraft beaufschlagt, um eine kraftschlüssige Verbindung zu erzeugen. Bei Bedarf wird das Blechpaket zusätzlich axial gesichert (Marschall et al. 2016, S. 3–4).

In e) enthält das Blechpaket Dehnungsschlitze am Innendurchmesser, welche bei einer Aufweitung des Blechpakets am Innendurchmesser die Magnettaschen derart verformt, dass eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Magnet und Magnettasche entsteht. Die Aufweitung am Innendurchmesser kann durch einen Presssitz von Rotorwelle und Blechpaket realisiert werden (Gilde 2020, S. 2).

#### **2.4.4.3 Stoffschlüssige Verbindungen**

Die stoffschlüssigen Verbindungen zur Magnetfixierung auf Polymerbasis lassen sich als Kleben definieren und sind gemäß DIN 8580 der Hauptgruppe 4, dem Fügen, zugeordnet (DIN 8580:2022-12, S. 13). Das Fertigungsverfahren Kleben ist nach DIN 8593-8 definiert:

*„Fügen unter Verwendung eines Klebstoffes (siehe DIN 16920), d. h. eines nichtmetallischen Werkstoffes, der Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann“* (DIN 8593-8:2003-09, S. 3).

Einige der später in Kapitel 2.4.4.3.1 vorgestellten Verfahren wie Spritzgießen oder Spritzpressen (engl. Transfermolding) können nach DIN 8580 dem Fertigungsverfahren Fügen durch Urformen zugeordnet werden (DIN 8580:2022-12, S. 13). Im Kontext der Magnetfixierung sind jedoch die stoffschlüssigen Haltekräfte auf Basis von Adhäsion und Kohäsion ausschlaggebend, weshalb alle Magnetfixierungen in diesem Kapitel dem Kleben zugeordnet werden. Stoffschlüssige Magnetfixierungen mittels Kleben werden in dieser Arbeit gemäß Abbildung 2-8 nach Applikation und Aushärtemechanismus des Klebstoffs eingeteilt. Bei der Applikation des Klebstoffs kann zusätzlich zwischen Lokal und Vollfüllung des eingebrachten Klebstoffes unterschieden werden.

Magnetfixierungen können als Kombination von Applikation und Aushärtemechanismus beschrieben werden, wobei nicht jede Kombination möglich ist.

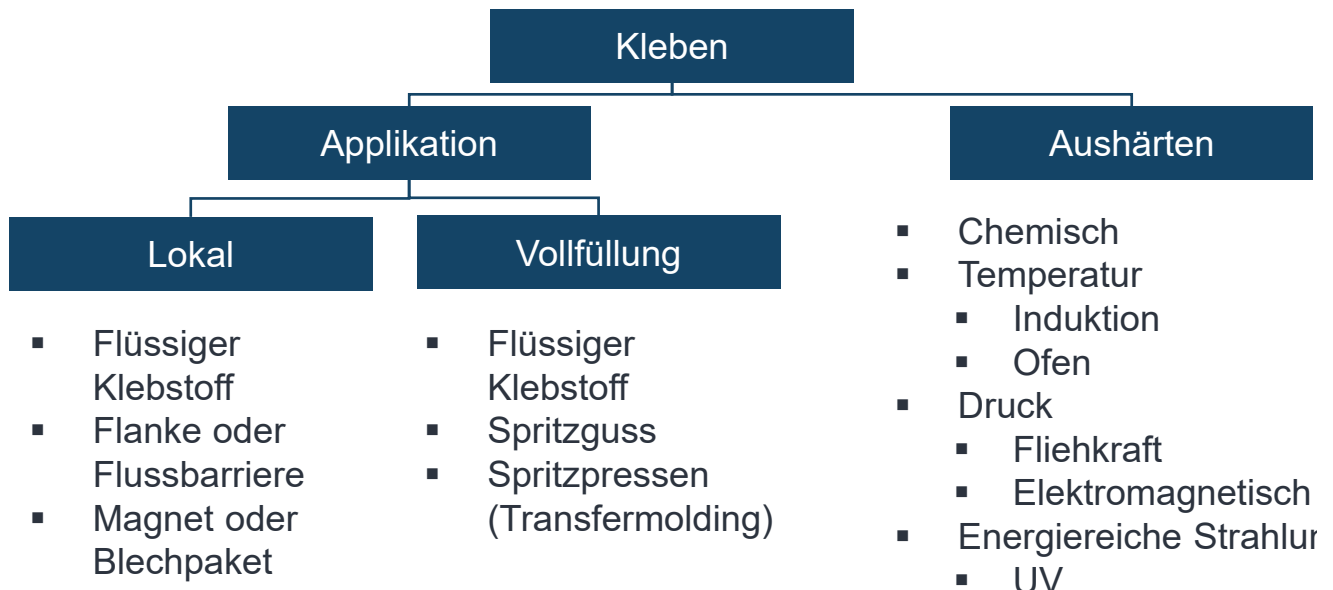


Abbildung 2-8: Einteilung von Magnetfixierungen mittels Kleben.

#### 2.4.4.3.1 Applikation des Klebstoffs

Der Klebstoff kann wahlweise die gesamte Magnettasche ausfüllen oder lokal begrenzt aufgetragen werden. Wie in Abbildung 2-9 dargestellt und in (Albrecht 2014, S. 142) beschrieben, kann der Klebstoff primär an den Seiten des Magneten, den sogenannten Flanken, oder in den Flussbarrieren aufgebracht werden.

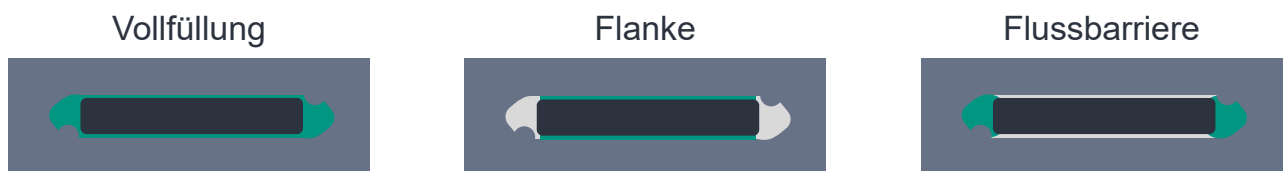


Abbildung 2-9: Arten von Klebstoffapplikationen für die Magnetfixierung.

Lokal begrenzte Magnetfixierungen basieren auf flüssigen Klebstoffen mit hoher Viskosität. Magnetfixierungen an der Flanke des Magneten werden raupenförmig oder flächig auf den Magneten oder auf das Blechpaket aufgetragen, bevor der Magnet in die Magnettasche montiert wird. Fixierungen in der Flussbarriere werden nach der Montage des Magneten in der Magnettasche eingebracht (Albrecht 2014, S. 142). Der lokale Einsatz von Klebstoff im Vergleich zu einer Vollfüllung ermöglicht eine bessere

Materialausnutzung bzw. das Einsparen von Material, wodurch Kosten gesenkt werden können. Demgegenüber steht die verbesserte Wärmeleitfähigkeit bei vollständig ausgefüllter Magnettasche, die zusätzlich durch Füllstoffe gesteigert werden kann (Habe-nicht 2016, S. 16). Die Kavität zwischen Magnettasche und Magnet an der Flanke kann mit niedrigviskosem Material gefüllt werden, wobei der Kapillareffekt genutzt werden kann. Dieser Effekt kann jedoch zum Eindringen von Klebstoff in den Zwischenraum einzelner Blechlamellen oder zum Austritt an der Unterseite des Blechpakets führen. Klebstoffe mit höherer Viskosität sind für den Einsatz in der Flussbarriere geeignet.

Magnetfixierungen als Vollfüllung werden mit unterschiedlichen Herstellungsverfahren erzeugt, wie in Abbildung 2-10 dargestellt. Die Magnettasche kann mit flüssigem Klebstoff gefüllt werden. Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen sowie zur Verarbeitung viskoser Klebstoffe kann der Magnet in eine bereits mit Klebstoff gefüllte Magnettasche montiert werden (Franke et al. 2015, S. 726).

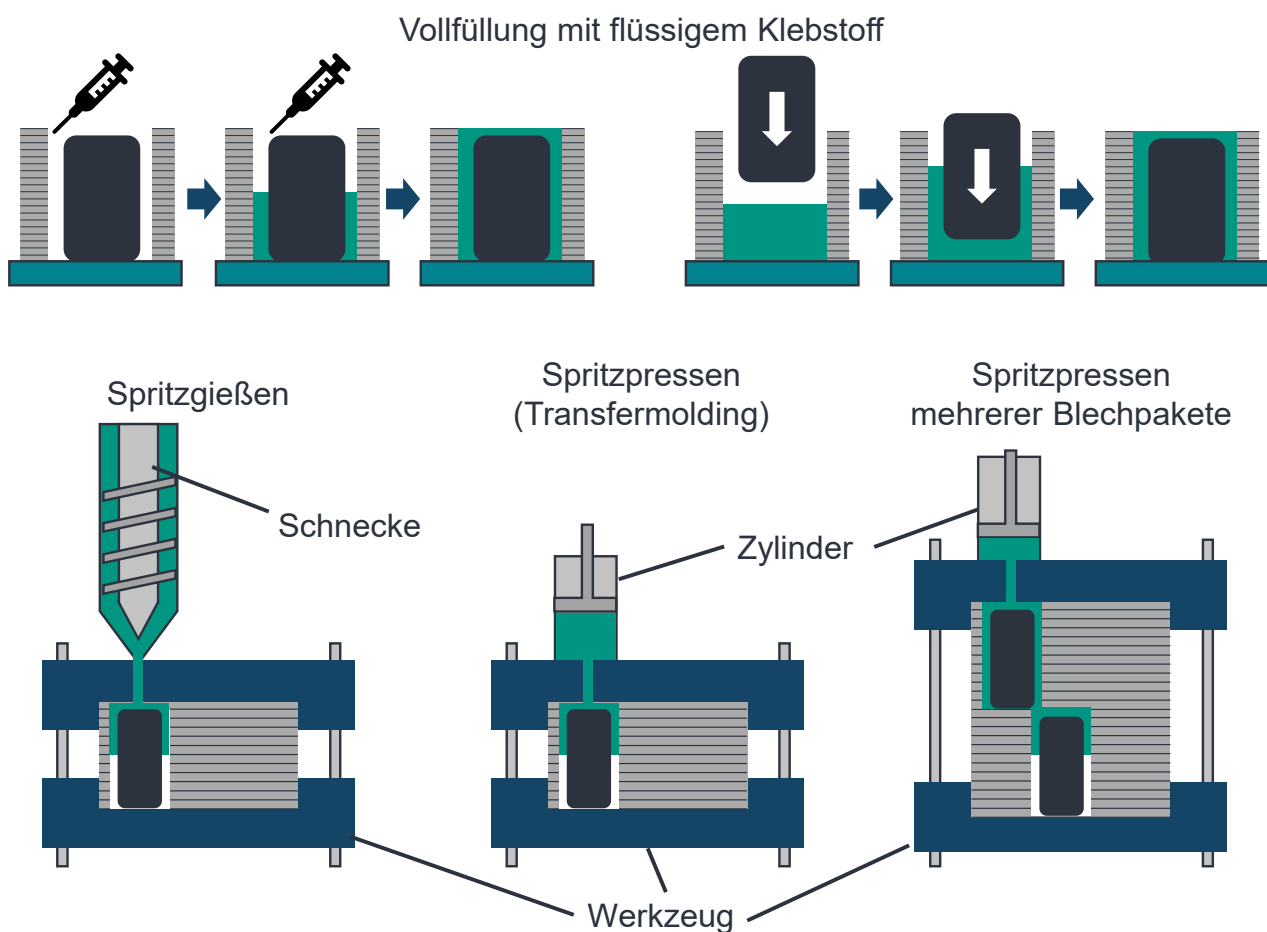


Abbildung 2-10: Herstellungsverfahren von Magnetfixierungen mit Vollfüllung.

Zwei alternative Fertigungsverfahren zum Ausfüllen der gesamten Magnettasche sind das Spritzgießen und das Spritzpressen (engl. Transfermolding). Bei beiden Verfahren wird Kunststoff unter der Einwirkung von Druck und Temperatur fließfähig gemacht (Baur 2022, 252,321). Mit beiden Verfahren können sowohl Thermoplaste als auch Duromere verarbeitet werden, wobei für das Spritzgießen vorzugsweise Thermoplaste (Baur 2022, S. 260–261) und für das Spritzpressen Duromere eingesetzt werden. Das Spritzgießen kann als eine Weiterentwicklung des Spritzpressens angesehen werden, da hier eine Schnecke zum Fördern und Materialaufschmelzen eingesetzt wird, wobei beim Spritzpressen lediglich ein Zylinder notwendig ist. Daraus resultieren höhere Investitionskosten für das Spritzgießen, gleichzeitig aber auch eine höhere Produktivität sowie eine höhere Materialeffizienz durch kleinere Angüsse (Baur 2022, S. 250–322). Es ist möglich, alle Magnete des Rotors gleichzeitig zu fixieren, wie in Abbildung 2-10 dargestellt, indem das gesamte Blechpaket gleichzeitig mit Kunststoff gefüllt wird (Mizutani & Takeuchi 2008, S. 8). Hierfür ist das Transfermolding vorteilhaft, da höherer Druck umsetzbar ist. Dabei entsteht eine zusätzliche axiale Verbindung zwischen den Blechpaketen.

Des Weiteren können die Magnete innerhalb der Magnettasche während der Applikation des Klebstoffs positioniert werden (Yamagishi & Watanabe 2011). Dies ist in der Regel mit zusätzlichem Aufwand beim Klebeprozess verbunden, birgt allerdings Vorteile bezüglich des magnetischen Flusses gemäß Kapitel 2.3.

Zudem existieren weniger etablierte Sonderverfahren. Eines ist die Beschichtung des Magneten mit Klebstoff, welcher bei Raumtemperatur fest ist und thermisch aktiviert werden kann (Bilcai et al. 2009, S. 16). Das gleiche Prinzip kann angewendet werden, wenn der Magnet nicht mit dem Klebstoff beschichtet wird, sondern der Klebstoff als Klebeband appliziert wird, welches Klebstoff in porösen Strukturen des Klebebandes enthält (Niese 2018). In einem weiteren Verfahren kann der Klebstoff durch Kanäle basierend auf der Rotation des Blechpakets in die Magnettasche eingebracht werden (Wößner et al. 2022b).

#### **2.4.4.3.2 Aushärten von Klebstoff**

Die Fixierwirkung beim Kleben wird durch Adhäsions- und Kohäsionskräfte realisiert. Zur Ausbildung dieser Kräfte muss der Klebstoff aufgetragen und anschließend aktiviert werden, was auch Aushärten oder Abbinden genannt wird. Funktional vergleichbare Magnetfixierungen können mittels unterschiedlicher Aushärtemechanismen realisiert

werden, die sich lediglich in den eingesetzten Werkstoffen unterscheiden. Es wird zwischen chemisch und physikalisch abbindenden Klebstoffen unterschieden (Böge et al. 2021, S. 709). Klebstoffe, die auf Basis einer chemischen Reaktion aushärten, werden auch Reaktionsklebstoffe genannt. Die Reaktion wird meist durch die Vereinigung mehrerer Stoffe hervorgerufen, die häufig in flüssiger Form vorliegen und als Resultat der chemischen Reaktion aushärten (Habenicht 2016, S. 10).

Physikalisch abbindende Klebstoffe werden durch Verdunstung, Temperatur, Druck oder Strahlung aktiviert (Habenicht 2016, S. 41–59). Die Verdunstung kann bei Raumtemperatur stattfinden oder durch einen Temperatureintrag beschleunigt werden (Habenicht 2016, S. 55). Zum Aushärten unter erhöhter Temperatur können Blechpakete in einem Ofen mittels Konvektion, Wärmestrahlung z.B. Infrarot oder Induktion eingesetzt werden (Niese 2018, S. 3). Das Aufbringen von Druck kann in einem Blechpaket durch die Einwirkung einer externen mechanischen Kraft, der Rotation des Blechpakets und der daraus resultierenden Fliehkraft oder der Einwirkung einer elektromagnetischen Kraft realisiert werden (Pieper & Bachmann 2021b, S. 10). Eine weitere Möglichkeit ist die Einwirkung von Strahlung, dabei handelt es sich meist um UV-Strahlung (Habenicht 2016, S. 41). Im Kontext der Magnetfixierung ist dabei zu beachten, dass lediglich die Stirnflächen des Blechpakets bestrahlt werden können, da weder Blechpaket noch Magnet lichtdurchlässig sind. Diese Methode eignet sich daher lediglich zum initialen Fixieren für die anschließende Handhabung der Blechpakete. Das vollständige Aushärten muss zusätzlich mit einer anderen Methode erfolgen.

**Zusammenfassung:** Mechanische Fixierungen weisen eine große Vielfalt auf. Zusatzelemente ermöglichen einen hohen Gestaltungsspielraum während bei der Integralbauweise eine einfache Montage möglich ist. Bei stoffschlüssigen Fixierungen, insbesondere bei der Vollfüllung, erlauben unterschiedliche Herstellungsverfahren wie Kleben, Spritzgießen und Spritzpressen die Realisierung derselben Magnetfixierung.

## 2.5 Werterhaltungsstrategien von PSM

Wererhaltungsstrategien im Kontext elektrischer Fahrzeuge weisen aufgrund des hohen Ressourceneinsatzes wie Seltene Erden im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Fahrzeugen enormes Potenzial auf (European Environment Agency 2018, S. 8). Dabei emittiert die Produktion eines elektrischen Fahrzeugs 108 % mehr CO<sub>2</sub>-Äquivalent im Vergleich zu einem verbrennungsmotorischen Fahrzeug (Fuels Institute 2022, S. 30), während die Emissionen während des Betriebs deutlich reduziert sind. Das

Hauptdifferenzierungsmerkmal zwischen elektrischen und verbrennungsmotorischen Fahrzeugen ist deren Antriebsstrang. Bei einer Kernkomponente des elektrischen Antriebsstrangs, dem elektrischen Traktionsmotor, sind 73 % der Wertschöpfung auf die Herstellung der Materialien, insbesondere des Magnetmaterials zurückzuführen (Stanek et al. 2021, S. 52). Eine Rückgewinnung der Materialien ist daher aufgrund des hohen Kostenanteils anzustreben.

Von der Europäischen Union wurden bereits unterschiedliche Werterhaltungsstrategien für End-of-Life Produkte definiert. Sie beinhalten Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose und Recycle (Hirsch & Schempp 2020, S. 9). Im Sinne der Nachhaltigkeit ist stets die hochwertigste Werterhaltungsstrategie zu bevorzugen, welche mittels Life Cycle Assessment (LCA) bewertet werden kann. Das Recycling lässt sich dabei in werkstoffliches und rohstoffliches Recycling untergliedern. Das werkstoffliche Recycling bietet durch die direkte Rückgewinnung des Werkstoffs im Vergleich zur Rückgewinnung der Werkstoffbestandteile im rohstofflichen Recycling eine höhere Effizienz und damit eine höhere Wertigkeit (Vogel et al. 2020, S. 7–8).

Aktuell werden Elektromotoren primär rohstofflich verwertet, indem die Motoren mittels Schredder oder Prallmühle zerkleinert und die einzelnen Bestandteile entsprechend ihren physikalischen Eigenschaften separiert werden. Effiziente Separationsverfahren basieren meist auf der Dichte und den elektromagnetischen Eigenschaften des zerkleinerten Materials (Martens & Goldmann 2016, S. 45). So können von einem Elektromotor Aluminium, Kupfer, Stahl, Elektroblech und Kunststoff getrennt werden. Das wertvolle Magnetmaterial verhindert eine effiziente Separation, da es aufgrund seiner magnetischen Eigenschaften am Elektroblech anhaftet (Ihne et al. 2024b, S. 699). Die Wiedergewinnungsquote wird auf 1% geschätzt (Schönfeld et al. 2024, S. 17).

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Wiedergewinnungsquote von Magnetmaterial besteht in der Demontage von Elektromotoren, was im Folgenden näher beschrieben wird.

### **2.5.1 Demontage von Elektromotoren**

Die Demontage von Elektromotoren im Kontext der Kreislaufwirtschaft ist aktueller Gegenstand der Forschung. Die Demontage ermöglicht die Umsetzung höherwertiger Werterhaltungsstrategien. In dem Verbundprojekt MORE ist die Demontage von elektrischen Traktionsmotoren adressiert. Die im Projekt und in projektbezogenen Veröffentlichungen ebenfalls betrachtete automatisierte und manuelle Demontage von

Oberflächenmagneten wird aufgrund der geringen Relevanz von Oberflächenmagneten im Kontext von elektrischen Traktionsantrieben nicht weiter betrachtet (Bast et al. 2014, 31-34, 39-41; Klier et al. 2013a, S. 2; Klier et al. 2013b, S. 89). Für die Demontage von vergrabenen Magneten wurde eine Prozesskette abgeleitet. Im ersten Schritt werden die Blechpakete von der Rotorwelle gepresst. Anschließend werden die durch das magnetische Feld verbundenen Blechpakete gegeneinander abgeschert (Bast et al. 2014, S. 35). Die Demontage der Magnete erfolgt mit dem in Abbildung 2-11 a) dargestellten Stempel, der alle Magnete eines Blechpakets pneumatisch in einem Hub gleichzeitig auspresst. Die Stempel besitzen zur Reduktion der auftretenden Maximalkräfte eine unterschiedliche Länge. Die Demontage unterschiedlicher Blechpaketgeometrien stellt dabei eine große Herausforderung dar (Klier et al. 2013a, S. 3). Anschließend werden die Magnete über ein Förderband mit einem Infrarotstrahler thermisch entmagnetisiert (Bast et al. 2014, S. 40). Die Handhabung der magnetisierten Magnete während des Demontageprozesses wird dabei nicht näher betrachtet. Eine Validierung des Ansatzes ist nicht erfolgt.

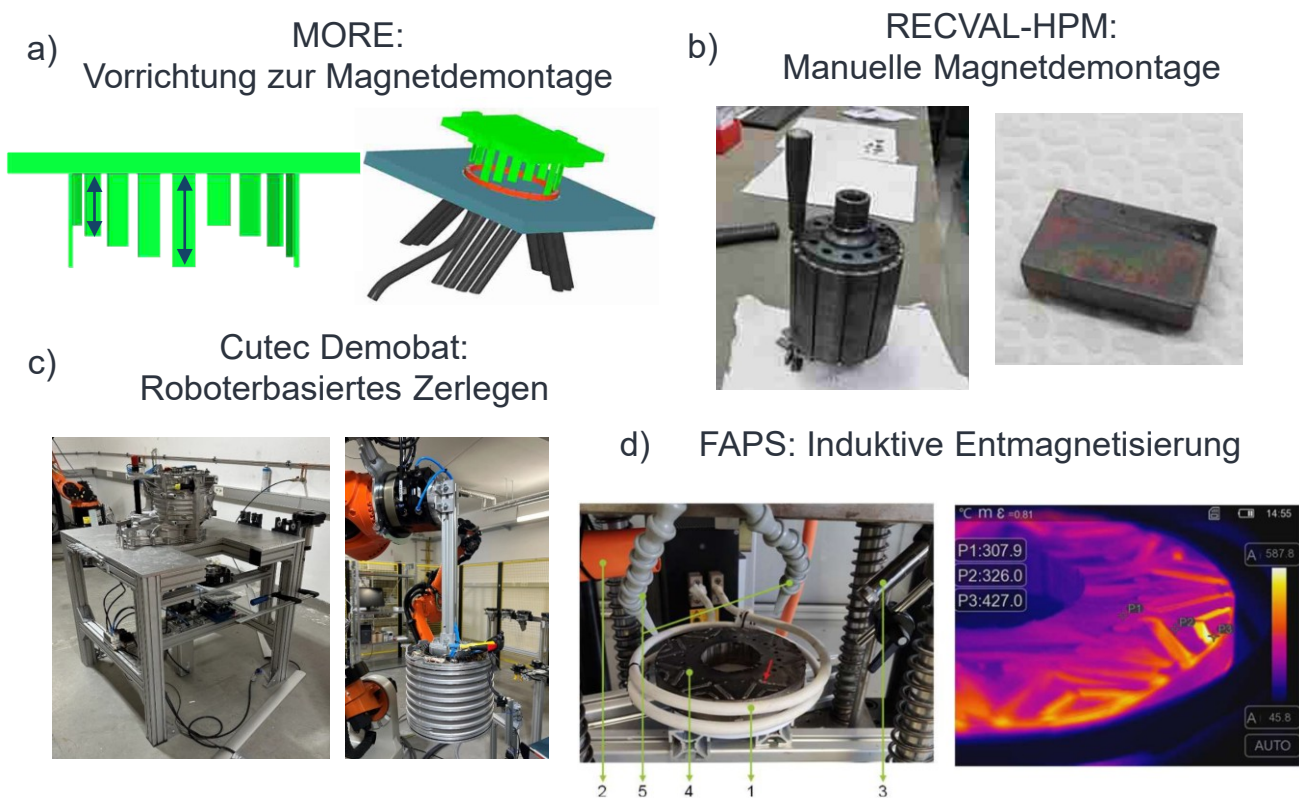


Abbildung 2-11: Ansätze zur Demontage von Elektromotoren, nach a) (Bast et al. 2014, S. 42; Klier et al. 2013a, S. 3), b) (Auerbach et al. 2017, S. 23), c) (Baazouzi et al. 2023, S. 139), d) (Ihne et al. 2024a, S. 6).

In einem weiteren Projekt RECVAl-HPM wird eine Prozesskette zur Demontage von elektrischen Traktionsantrieben und sonstigen Elektromotoren abgeleitet. Hierbei werden im Gegensatz zum Projekt MORE die Magnete im ersten Prozessschritt thermisch in einem Ofen entmagnetisiert, wodurch alle nachfolgenden Prozessschritte deutlich vereinfacht werden (Auerbach et al. 2017, S. 21). Da die Blechpakete bei dem betrachteten Rotor nicht gegeneinander verdreht sind und die Wuchtscheiben einen geringen Durchmesser besitzen, sind die Magnete ohne weitere Demontageschritte zugänglich. Die Magnete können manuell demontiert werden, wie in Abbildung 2-11 b) dargestellt. Es wird ein hoher Bedarf einer variantenflexiblen Automatisierung aufgrund des hohen Einflusses der Produkteigenschaften auf die Demontage identifiziert (Auerbach et al. 2017, S. 104).

Am Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum CUTEC werden ebenfalls Untersuchungen zur Demontage von elektrischen Traktionsantrieben durchgeführt. Ein roboterbasiertes Demontagemodul demontiert Traktionsmotoren inklusive Getriebe. Dieser Ansatz ermöglicht eine hohe Flexibilität bei gleichzeitig hohem Automatisierungsgrad. Zum Aufbringen hoher Demontagekräfte für z.B. Lager wird ein Zusatzmodul genutzt, da die Roboter nicht in der Lage sind die notwendigen Kräfte aufzubringen (Seelig 2024, S. 11). Im Fokus stehen das Lösen von Schraubenverbindungen sowie roboterbasierte Handhabungsprozesse für die Demontage. Es werden lediglich ASM und keine PSM demontiert. Die Demontage endet bereits nachdem der Rotor vom Stator extrahiert wird (Baazouzi et al. 2023, S. 138–139).

Ein weiterer Ansatz der Demontage von elektrischen Traktionsmotoren wird am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik FAPS untersucht. Der Unterschied zu den anderen Ansätzen besteht in der thermischen Entmagnetisierung mittels Induktion, wie in Abbildung 2-11 d) dargestellt (Ihne et al. 2023a, S. 4; Ihne et al. 2024a, S. 6). Die thermische Entmagnetisierung wird innerhalb der Prozesskette am ganzen Rotor oder auf Blechpaketebene umgesetzt (Ihne et al. 2023a, S. 4; Ihne et al. 2024a, S. 6). Die Demontage der Magnete erfolgt einzeln mit einem Stempel innerhalb einer Prüfmaschine. Die Temperaturen zum Entmagnetisieren der Magnete von 400 und 450°C reduzieren die Demontagekräfte der Magnete von 9,54 kN auf 5,69 bis 0,68 kN durch die Degradation des Klebstoffs (Ihne et al. 2024a, S. 6; Ihne et al. 2023b, S. 464). Die Magnetbeschichtung kann bei diesen Temperaturen ebenfalls zersetzt werden, wodurch in Kombination mit den hohen Temperaturen eine Oxidation des Magneten stattfindet (Li et al. 2003, S. 177).

Weiterhin gibt es Ansätze zur Sequenzplanung der roboterbasierten Demontage für elektrische Traktionsmotoren. Basierend auf den Produktdaten werden Prozessschritte abgeleitet, die mit speziellen Endeffektoren der Roboter umgesetzt werden. Mit Sensoren wird der Prozess auf den Produktzustand adaptiert. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität und einen hohen Automatisierungsgrad. Die Demontage endet bereits nach der Demontage von Rotor und Stator (Hansjosten et al. 2024, S. 1978–1983; Hansjosten & Fleischer 2023, S. 452–456).

Neben elektrischen Traktionsmotoren werden andere Produkte mit Seltenerdmetallen demontiert, insbesondere Festplatten, E-Bikes und E-Scooter. In einer Pilotanlage für Festplatten kann der Seltenerdhaltige Bereich der Festplatte identifiziert und zerstörend abgetrennt werden zur weiteren Verarbeitung der Magnete mittel HPMS Verfahren (Burkhardt et al. 2024, S. 301–302). Für E-Bikes wurden bereits die zur Demontage erforderlichen Prozessschritte analysiert sowie Demontageschritte für Motoren unterschiedlicher Hersteller verglichen (Erdmann et al. 2023, S. 146; Koller et al. 2023, S. 4). Die Demontage von Elektromotoren von E-Scootern wurde bisher nur exemplarisch manuell umgesetzt (Schönfeldt et al. 2025, S. 4). Eine Übertragung dieser Ansätze auf elektrische Traktionsmotoren ist aufgrund der stark abweichenden Produktdimensionen und -ausprägungen nicht zielführend.

**Zusammenfassung:** Die Forschungsarbeiten zeigen, dass die Demontage von elektrischen Traktionsantrieben ein hohes Potenzial aufweist, insbesondere bezüglich Automatisierung und Flexibilität. Eine automatisierte und gleichzeitig zerstörungsfreie Demontage bis zum Magneten konnte bislang noch nicht erfolgreich umgesetzt werden.

### 2.5.2 Aufbereitung von Magneten

Im Anschluss an die Demontage gilt es, die Magnete aufzubereiten. Die Aufbereitung von NdFeB-Magneten kann mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Verfahren durchgeführt werden. Diese unterscheiden sich im Energieverbrauch, Chemikalieneinsatz, Ausgangszustand der Magnete und der Qualität der aufbereiteten Stoffe bzw. Magnete.

Die Aufbereitungsstrategie ist maßgeblich vom Zustand der End-of-Life Magnete abhängig (Cherkezova-Zheleva et al. 2024, S. 660). Eine effiziente Aufbereitung unter Verwendung möglichst weniger Ressourcen setzt die Demontage mit bestmöglichem Magnetzustand voraus. Eine Beschädigung des Magneten oder dessen Beschichtung sowie Verunreinigungen durch Fremdmaterial müssen daher vermieden werden (Cherkezova-Zheleva et al. 2024, S. 660). Die Verfahren zur Magnetaufbereitung lassen sich

gemäß Abbildung 2-12 unterteilen, wobei von links nach rechts der Ressourcenbedarf zur Aufbereitung steigt und die Anforderungen an den Magnetzustand sinken (Cherkezova-Zheleva et al. 2024, S. 661). In den folgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Magnetaufbereitungsverfahren der Abbildung näher beschrieben.

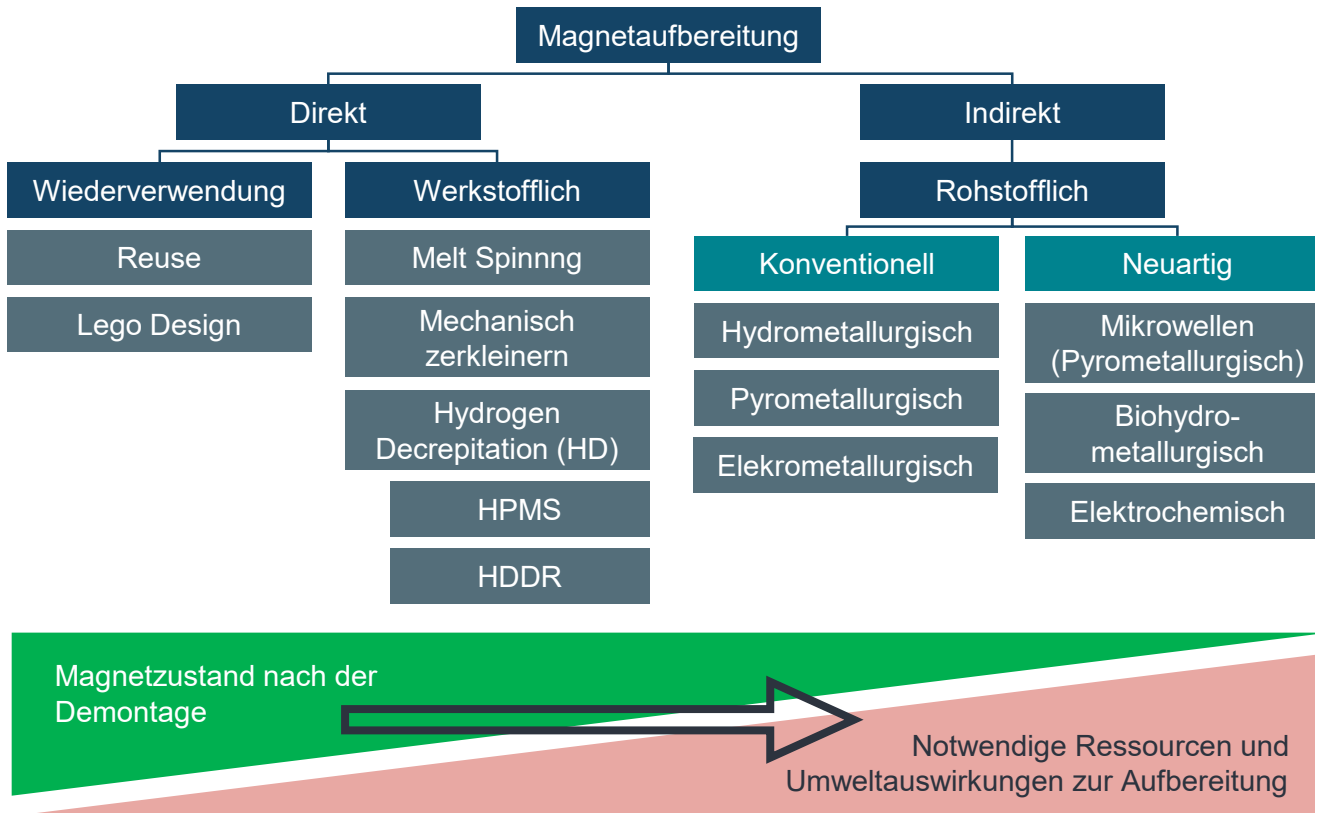


Abbildung 2-12: Ansätze zur Magnetaufbereitung in Anlehnung an (Cherkezova-Zheleva et al. 2024, S. 661).

Direkte Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass die Magnete direkt wieder als Magnete eingesetzt werden, wohingegen bei indirekten, rohstofflichen Verfahren, die Ausgangsstoffe der Magnete zurückgewonnen werden. Diese können anschließend wieder für Magnete oder andere Produkte verwendet werden. Direkte Verfahren lassen sich wiederum in Wiederverwendung und werkstoffliche Verfahren einteilen. Für die Wiederverwendung muss der Magnet in bestmöglichem Zustand vorliegen, da selbst kleine Beschädigungen der Magnetbeschichtung zur Oxidation und somit zu unzureichenden Magneteigenschaften führen (Cherkezova-Zheleva et al. 2024, S. 661).

### Wiederverwendung von Magneten

Die Wiederverwendung in der Werterhaltungsstrategie Reuse ist als ressourcenschonendste Werterhaltungsstrategie anzusehen. Fehlende Standardisierung von

Magnetgeometrie und -werkstoff sind dabei aktuell ein großes Hindernis (Ihne et al. 2024a, S. 4). Die Standardisierung der Magnetgeometrie kann durch ein sogenanntes Lego Design angegangen werden, indem ein Magnet aus vielen standardisierten Einzelmagneten besteht, die zu einer beliebigen Geometrie zusammengesetzt werden können (Hogberg et al. 2016, S. 1). Nachteilig hierbei ist der gesteigerte Montageaufwand, sowie ein erhöhter prozentualer Anteil an Magnetbeschichtung im Vergleich zu Vollmaterial (Hogberg et al. 2016, S. 2).

### **Werkstoffliche Aufbereitung von Magneten**

Werkstofflich aufbereitete Magnete besitzen die gleiche Zusammensetzung des Ausgangsmaterials. Aus diesem Grund gilt es Magnete mit gleicher Zusammensetzung aufzubereiten oder durch Kenntnis deren Zusammensetzung und mögliche Zugabe von Primärmaterial die Werkstoffeigenschaften der aufbereiteten Magnete aktiv einzustellen (Lixandru 2018, S. 93).

Eine Möglichkeit der direkten werkstofflichen Aufbereitung ist das Schmelzspinnverfahren (engl. „melt spinning“). Hierbei wird Magnetschmelze auf eine rotierende Rolle gegossen, um Magnetwerkstoffpartikel zu erhalten. Die Qualität der Partikel kann lediglich zur Herstellung von kunststoffgebundenen Magneten genutzt werden, welche in ihren magnetischen Eigenschaften den gesinterten Magneten unterlegen sind. Zudem ist ein hoher Energieeinsatz für das Schmelzen des Magnetmaterials erforderlich (Itoh et al. 2004, S. 396).

Anstatt das Magnetmaterial aufzuschmelzen, kann es entmagnetisiert, mechanisch zu Pulver zerkleinert und anschließend gesintert werden. Dieser Prozess führt zu einer Beeinträchtigung der magnetischen Eigenschaften verglichen mit dem Ausgangszustand (Hogberg et al. 2015, S. 1243).

Ein weiteres Verfahren ist das Hydrogen Decrepitation (HD) Verfahren. Ausgangsmaterial für das auf Wasserstoff basierende Verfahren sind demontierte, nicht oxidierte Magnete. In diesem Verfahren führt die Reaktion von Wasserstoff mit dem Magnetmaterial zu einer Volumenexpansion und damit einhergehend zu einer Zersetzung des Magneten in Pulver bei gleichzeitiger Entmagnetisierung. Unter der Wasserstoffatmosphäre wird eine Oxidation des Magnetwerkstoffs unterbunden (Zakotnik et al. 2008, S. 525). Anschließend wird der Wasserstoff durch Entgasen entzogen, damit das gewonnene Magnetpulver zum Sintern neuer Magnete genutzt werden kann. Bei diesem hocheffizienten Prozess können zum Erreichen möglichst hochwertiger

Magneteigenschaften eine Reihe unterschiedlicher Parameter wie Druck und Temperatur eingestellt und nicht recyceltes Material hinzugefügt werden (Auerbach et al. 2017, S. 39; Checa Fernández et al. 2023, S. 1456–1465; Li et al. 2019, S. 145–146; Lixandru 2018, S. 32; Michalski et al. 2022, 2-6; Zakotnik et al. 2008, S. 526).

Eine Erweiterung des HD Verfahrens stellt das Verfahren Hydrogen Processing of Magnetic Scrap (HPMS) dar. End-of-Life Produkte, die Magnete enthalten, werden in einer rotierenden Trommel unter Wasserstoffatmosphäre gesetzt. Hierdurch zersetzen sich die Magnete zu Pulver und können vom übrigen Material getrennt werden. Das Verfahren ermöglicht eine Kombination von Materialtrennung und -aufbereitung (Burkhardt 2018, S. 23–24; Walton et al. 2015, S. 239–240), birgt allerdings eine hohe Gefahr der Kontamination des Pulvers durch andere Stoffe oder die Magnetbeschichtung (Burkhardt et al. 2021, S. 4).

Eine andere Erweiterung des HD Prozesses ist der Hydrogenation, Disproportionation, Desorption and Recombination (HDDR) Prozess. Es erfolgt die Wasserstoffversprödung mit anschließender Erwärmung auf über 600 °C. Dies hat Pulver mit deutlich kleineren Partikeln zur Folge, die sich besser für die weitere Verarbeitung zu Magneten eignen (Lixandru 2018, S. 22). Die erhöhte Prozesstemperatur verursacht einen höheren Energiebedarf. Die Eigenschaften der recycelten Magnete können durch Prozessdruck und -temperatur eingestellt werden (Auerbach et al. 2017, S. 40–46; Lixandru 2018, 33ff).

Alle Verfahren basierend auf der Wasserstoffversprödung setzen mit Ausnahme der Phosphatierung als Beschichtung eine Beschädigung der Beschichtung, oder idealerweise ein Zerkleinern der Magnete voraus, da andernfalls die Beschichtung den Wasserstoff vom Eindringen in den Magneten hindert (Burkhardt et al. 2021, S. 3). Allerdings führt das Aufbrechen der Magnete zur Oxidation, wodurch die magnetischen Eigenschaften der aufbereiteten Magnete um 5 % degradieren (Burkhardt 2018, S. 76). Daher sollten Magnete erst unmittelbar vor dem Recycling aufgebrochen werden.

### **Rohstoffliche Aufbereitung von Magneten**

Die rohstoffliche Aufbereitung von Magnetmaterial wird in der Regel pyrometallurgisch unter hoher Temperatur oder hydrometallurgisch unter niedriger Temperatur durchgeführt. Zudem können elektrometallurgische Verfahren, die elektrische Energie einsetzen, genutzt werden (Jeon et al. 2021, S. 2–4). Ein Vorteil des rohstofflichen Recyclings ist die Möglichkeit der gleichzeitigen Verarbeitung von Magnetmaterial

unterschiedlicher Zusammensetzung und Oxidation. Dem gegenüber steht jedoch der hohe Energie- sowie Chemikalieneinsatz. Die Prozesse sind mit größeren Mengen von Fremdmaterial durchführbar, was allerdings den erforderlichen Ressourceneinsatz weiter erhöht (Cherkezova-Zheleva et al. 2024, S. 664).

Pyrometallurgische Prozesse setzen die Auftrennung des Magnetmaterials in seine Bestandteile durch Phasenabscheidung bei unterschiedlichen Temperaturen um. Sie können zudem in Kombination mit hydrometallurgischen Prozessen genutzt werden (Chung et al. 2022, S. 3–10; Stopic et al. 2022, S. 6–10).

Die geringere Temperatur der hydrometallurgischen Prozesse wird in der Regel durch das Auswaschen mittels Chemikalien ermöglicht. Dabei können verschiedene Prozessschritte und Prozessschrittkombinationen zum Einsatz kommen (Ciro et al. 2019, S. 5–15; Du et al. 2023, S. 2–8; Uysal et al. 2022, S. 3–9; Xia et al. 2022, S. 4–8).

Zur Vollständigkeit sind ebenfalls mikrowellenbasierte pyrometallurgische Verfahren (Zhou et al. 2019, S. 646–648), elektrochemische Verfahren (Makarova et al. 2020, S. 2–7), und biohydrometallurgische Verfahren (Auerbach et al. 2019, S. 106–110) zur Magnetaufbereitung zu nennen, deren Relevanz ist aktuell jedoch sehr gering.

**Zusammenfassung:** Es wurde bereits ein breites Spektrum an Aufbereitungsverfahren entwickelt. Die Möglichkeiten der Aufbereitung sind sehr stark vom Zustand des zur Verfügung stehenden Magnetmaterials abhängig. Nicht beschädigte Magnete und hohe Reinheitsgrade des Ausgangsmaterials ermöglichen eine Aufbereitung unter geringstem Ressourceneinsatz mit besten magnetischen Eigenschaften. Die Bereitstellung des erforderlichen Magnetmaterials für die Prozesse ist jedoch offen. Vor diesem Hintergrund ist eine Demontage mit bestmöglichem Magnetzustand anzustreben.

### 2.5.3 Ökologisches und ökonomisches Potenzial der Magnetaufbereitung

Das ökologische Potenzial der Magnetaufbereitung kann mittels LCA bestimmt werden. Angesichts der hohen negativen Umweltauswirkungen der herkömmlichen Produktion von Magnetmaterial weist die Aufbereitung ein besonders hohes Potenzial auf (Reuter et al. 2019). Die direkte werkstoffliche Aufbereitung durch Wasserstoffversprödung wurde bereits detailliert bilanziert, wobei Ressourceneinsparungen im Bereich von 64–96 % im Vergleich zur herkömmlichen Produktion möglich sind (Jin et al. 2018, S. 3796; Zakotnik et al. 2016, S. 118). Für andere Aufbereitungsverfahren liegen keine genauen Ökobilanzen vor.

Neben dem ökologischen Potenzial gilt es das ökonomische Potenzial zu betrachten. Der globale Bedarf von Seltenen Erden wird nach Prognosen von 170.000 t in 2022 auf 466.000 t im Jahr 2035 ansteigen, wodurch ein Versorgungsengpass wie zuvor im Jahr 2022 entstehen kann (BCG Global 2023). Durchschnittspreise im Jahr 2024 liegen bei 1034,24 \$/kg für Terbium, 341,4 \$/kg für Dysprosium und 69,16 \$/kg für Neodym (Statista 2025).

Um die Wirtschaftlichkeit der Demontage von elektrischen Traktionsmotoren mit anschließender Magnetaufbereitung zu bewerten, ist eine Gegenüberstellung der erzielbaren Erlöse und den damit verbundenen Kosten erforderlich. Maßgebliche Kosten verursachen die Demontage, Logistik sowie die Magnetaufbereitung selbst. Verschiedene Szenarien für die Demontage und Logistik sind abhängig von der Lokalisierung der Prozesse. Eine dezentrale Demontage verursacht höhere Kosten, reduziert jedoch die Logistikkosten. Verschiedene Szenarien zeigen, dass die Zentralisierung der Demontageschritte stets die wirtschaftlichste Lösung bildet, auch unter Variation von Lohn- und Transportkosten (Bast et al. 2014, S. 90). Ein höherer Automatisierungsgrad bei der Demontage ermöglicht zusätzliche Kosteneinsparungen für die zentrale Demontage. Die Wirtschaftlichkeit der Elektromotorendemontage wird zusätzlich durch Synergien mit der Batterieaufbereitung von Altfahrzeugen gesteigert. Hohe Batterierecyclingquoten der EU Batterieverordnung (Europäische Union 2023, S. 20) führen zu zunehmender Batteriedemontage und -aufbereitung, im Zuge dessen kann der elektrische Traktionsmotor vom Fahrzeug demontiert und zur Aufbereitung transportiert werden.

Unter der Annahme von rohstofflicher Verwertung und Neodymoxidpreisen von 49 € pro kg und Dysprosiumpreisen von 238 € pro kg sowie Demontagekosten von 14 bis 16 € konnten Bast et al. einen erzielbaren Gewinn von 31 bis 38 € pro Motor kalkulieren (Bast et al. 2014, S. 92). Im Jahr 2024 liegen die Durchschnittspreise der Rohstoffe ca. 40 % höher (Statista 2025).

## 2.6 Forschungsbedarf

Basierend auf dem Stand der Forschung und Technik kann der Forschungsbedarf im Kontext der Magnetdemontage elektrischer Traktionsmotoren abgeleitet werden. Es wurde gezeigt, dass die Wiedergewinnung und Aufbereitung von wertvollem Magnetmaterial enormes ökologisches sowie ökonomisches Potenzial bieten. Aufgrund der Variantenvielfalt, wirtschaftlicher Aspekte sowie der unterschiedlichen Produktzustände ergeben sich Anforderungen an die Flexibilität und die Automatisierung der Demontageprozesse. Die ressourceneffizientesten Verfahren zur Magnetaufbereitung benötigen dabei hochwertiges Ausgangsmaterial, welches weder beschädigt noch oxidiert ist. Daher ist eine zerstörungsfreie Magnetdemontage anzustreben.

Für die Demontage und Aufbereitung der Seltenerdminerale ist die Prozesskette von der E-Motorendemontage bis zur Magnetaufbereitung erforderlich. Die Prozesskette und zugehörige relevante bestehende Forschungsarbeiten sind in Abbildung 2-13 dargestellt und bezüglich der Kategorien Automatisierung, Flexibilisierung sowie Zerstörungsfrei bewertet und im Folgenden erläutert. Im Kontext des ersten Prozessschritts der E-Motorendemontage bis zur Rotorebene bestehen zahlreiche Publikationen, die bereits alle Aspekte umfassend abdecken.

Für die beiden Schritte Rotordemontage und insbesondere Magnetdemontage werden die betrachteten Aspekte nur lückenhaft behandelt. Insbesondere durch energieintensive thermische Prozesse werden häufig Klebeverbindungen gelöst, was eine Oxidation der Magnetbeschichtung zur Folge hat. Es besteht kein Ansatz, der die drei Aspekte Automatisierung, Flexibilisierung und Zerstörungsfrei gleichzeitig erfüllt. Hierdurch ergibt sich ein Forschungsdefizit im Bereich der Magnetdemontage.

Es wurden bereits in zahlreichen Forschungsarbeiten Verfahren zur Magnetaufbereitung umfassend behandelt, die aufgrund der hohen Anzahl nicht alle in Abbildung 2-13 dargestellt werden können. Die ressourceneffizientesten Verfahren mit der besten Qualität der aufbereiteten Minerale erfordern hochwertiges Ausgangsmaterial von einer zerstörungsfreien Magnetdemontage.

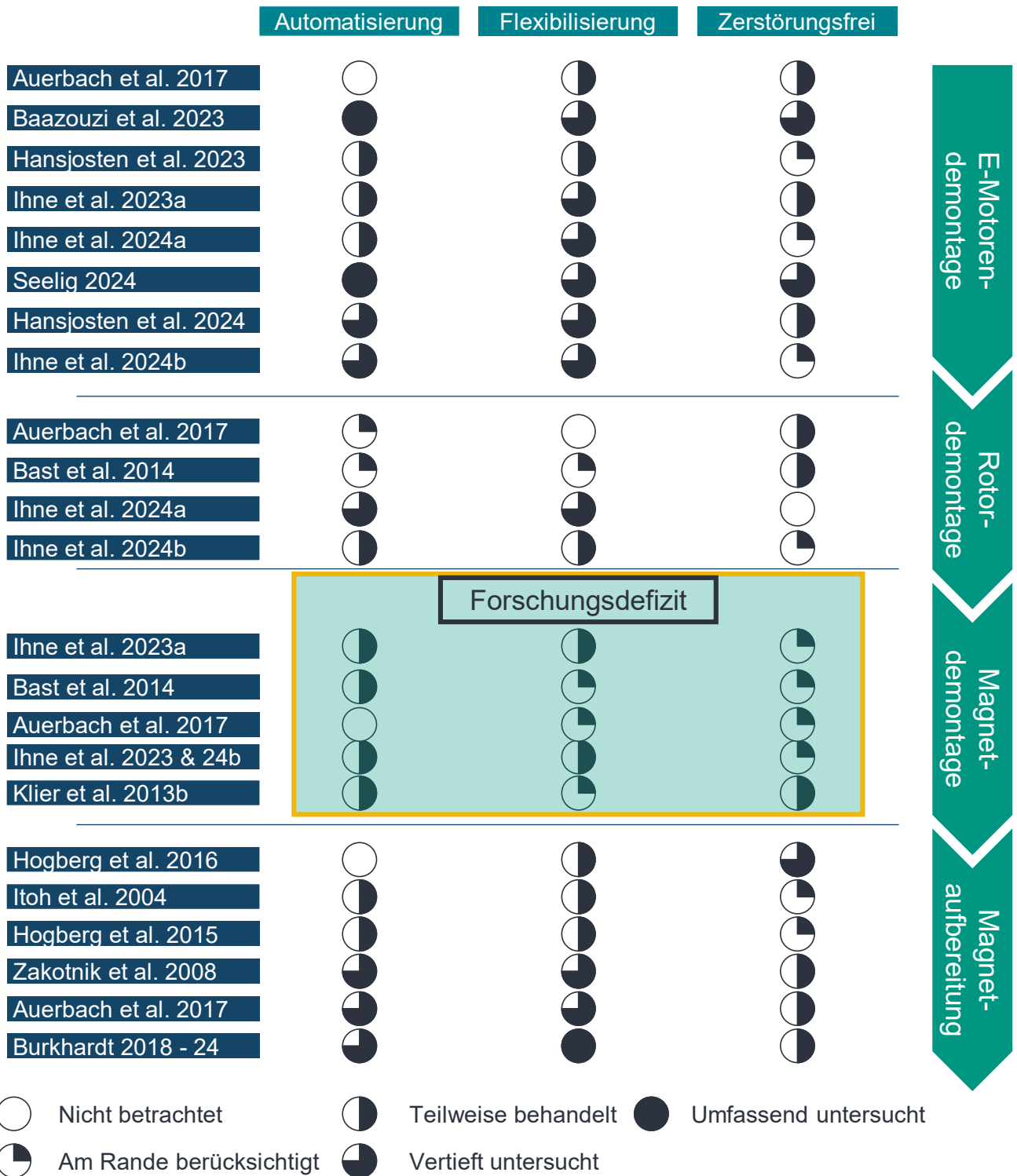


Abbildung 2-13: Übersicht des ermittelten Forschungsdefizits.

Für die Magnetdemontage aus elektrischen Traktionsmotoren lassen sich daher folgende Forschungsfragen ableiten, um eine automatisierte und flexible Magnetdemontage zerstörungsfrei zu realisieren.

**Forschungsfragen:**

- Wie wirken sich **Produkteigenschaften** auf die Magnetdemontage aus?
- Wie kann ein **Magnetdemontageprozess** mit hoher **Flexibilität** und hohem **Automatisierungsgrad** umgesetzt werden?
- Wie können **Parameter** für einen **zerstörungsfreien Demontageprozess** bestimmt werden?

## **3 Zielsetzung und Vorgehensweise**

### **3.1 Zielsetzung**

Das Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung der Demontage von Magneten aus PSM Rotoren. Den Prozess gilt es zerstörungsfrei umzusetzen, damit die hochwertigsten Werterhaltungsstrategien angewendet werden können. Der Prozess soll flexibel umgesetzt werden und somit eine dimensions- und herstellerunabhängige Demontage zur Abdeckung eines weiten Produktspektrums befähigen. Die wirtschaftliche Umsetzung der Magnetdemontage erfordert die Automatisierung des Prozesses. Hierfür ist ein robuster Prozess für verschiedene Zustände von End-of-Life Produkten notwendig. Basierend auf diesen Anforderungen soll experimentell sowie simulativ Prozessverständnis aufgebaut werden. Es sollen Modelle erzeugt werden, die dem Prozessverständnis dienen und für die Gestaltung von zukünftigen Demontageprozessen eingesetzt werden können. Dies ermöglicht die Parametrierung für einen zerstörungsfreien Demontageprozess durch die Adaption der Prozessparameter zu den vorliegenden Produktparametern, wie beispielsweise die Werkzeugauswahl oder die Wahl der Demontagegeschwindigkeit. Die simulativen Untersuchungen sollen durch experimentelle ergänzt werden, um insbesondere Einflüsse zu erfassen, die sich in der Simulation unzureichend abbilden lassen. Hierfür soll eine flexible und automatisierte Demontagezelle entwickelt werden, die die experimentelle Durchführung von Versuchsreihen ermöglicht sowie als Prototyp für die zukünftige Industrialisierung der Magnetdemontage fungiert. Das Prozessverständnis soll mit der Demontagezelle anhand eines elektrischen Traktionsantriebs validiert werden.

Basierend auf dem generierten Prozessverständnis sollen Empfehlungen zur zukünftigen Gestaltung von Magnetfixierungen und deren Demontageprozess abgeleitet werden. Bei der Gestaltung der Magnetfixierung im Produktentstehungsprozess sollen dabei Produkteigenschaften, Produktion und Kosten berücksichtigt werden, damit die Empfehlungen für die praktische Anwendung geeignet sind. Für den Demontageprozess gilt es die optimalen Prozessparameter für PSM Rotoren mit gegebenen Magnetfixierungen zu bestimmen, um Magnete beliebiger elektrischer Traktionsmotoren erfolgreich zu demontieren.

## 3.2 Vorgehensweise

Die Übersicht zur Vorgehensweise ist in Abbildung 3-1 dargestellt und im Folgenden näher beschrieben.

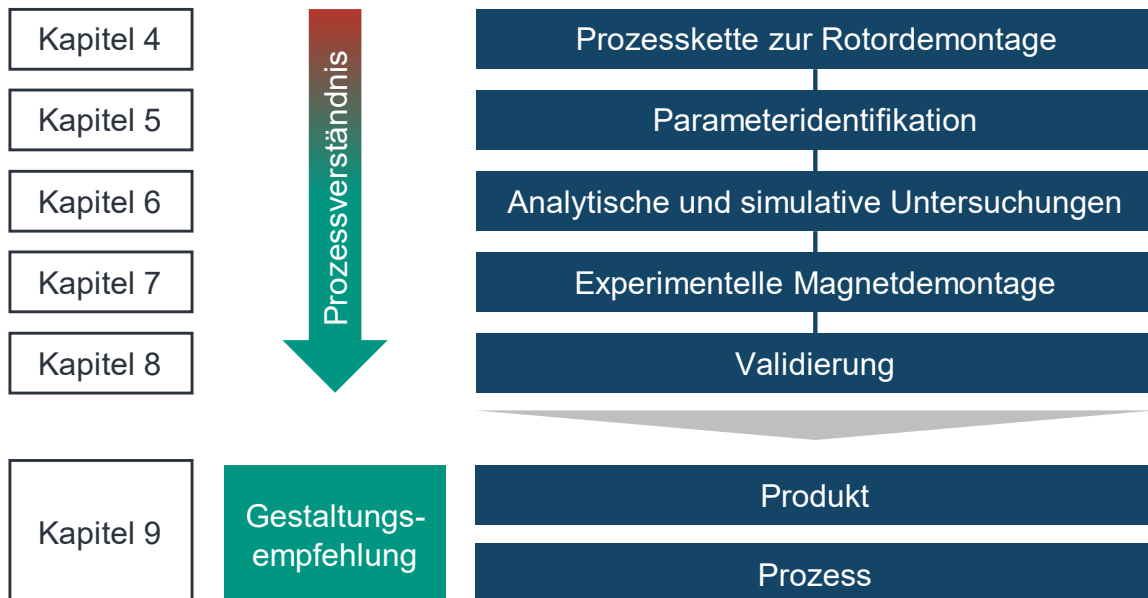


Abbildung 3-1: Vorgehensweise.

### Prozesskette zur Rotordemontage

Anhand des Stands der Forschung und Technik wird der Betrachtungsraum für die Magnetdemontage definiert. Es wird basierend auf der Funktionsweise von PSM Rotoren sowie anderer Forschungsansätze eine Prozesskette für die Magnetdemontage ausgehend vom Rotor abgeleitet. Diese wird theoretisch analysiert und prototypisch umgesetzt. Sie stellt sicher, dass die Magnetdemontage ganzheitlich umsetzbar ist. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der Prozessschritt der Magnetdemontage detailliert untersucht.

### Parameteridentifikation

Die Einflussparameter der Magnetdemontage werden für die betrachteten Magnetfixierungen systematisch analysiert und hinsichtlich Produkt und Prozess sowie bezüglich geschätzter Einflussgrößen klassifiziert. In der weiteren Vorgehensweise werden die identifizierten Parameter zum Aufbau von Prozessverständnis detailliert untersucht.

### **Analytische und simulative Untersuchungen**

Finite-Elemente-Modelle werden für die Vorhersage von Demontagekräften der Magnetfixierungen entwickelt. Diese werden genutzt, um mit einem simulativen Screening Versuchsplan unterschiedliche Einflussgrößen zu quantifizieren. Anschließend werden die als besonders wichtig identifizierten Parameter mit faktoriellen Versuchsplänen detaillierter untersucht. Die Modelle können für die zukünftige Auslegung von Demontageprozessen genutzt werden, indem Maximalkräfte definiert werden, um Fehler während des Demontageprozesses direkt zu erkennen und eingreifen zu können.

Zudem werden analytische Schadensmodelle zur Vorhersage kritischer Belastungen der Magnete entwickelt. Diese ermöglichen im Vergleich zu numerischen Modellen geringe Rechenzeiten und die einfache Integration von empirischen Ergebnissen. Die Modelle finden bei der Prozessparametrierung des Magnetdemontageprozesses Anwendung.

### **Experimentelle Magnetdemontage**

Es wird systematisch eine Demontagezelle für die Magnetdemontage entwickelt. Es werden Anforderungen definiert um sicherzustellen, dass die erforderlichen Funktionen für die Demontage sowie die Flexibilität und Automatisierung umgesetzt werden. Die Demontagezelle wird zur Durchführung von experimentellen Versuchsreihen verwendet. Analog zur simulativen Untersuchung werden zunächst eine Reihe von Einflussparametern mittels Screening untersucht, deren Einfluss anhand der Simulation nicht abschließend quantifiziert werden konnte. Im Anschluss erfolgen detaillierte Untersuchungen von den als relevant identifizierten Einflussparametern in faktoriellen Versuchsplänen.

### **Validierung**

Die Validierung der Modelle und der Demontagezelle wird anhand der Demontage eines elektrischen Traktionsantriebs umgesetzt. Es wird beispielhaft die Prozessparametrierung der Magnetdemontage mit den entwickelten Modellen durchlaufen und mit der Demontagezelle realisiert.

### **Gestaltungsempfehlungen**

Basierend auf den vorherigen Ergebnissen werden Empfehlungen für die Prozess- und die Produktgestaltung für eine optimierte Demontage gegeben und bewertet. Für Produktempfehlungen werden Produkteigenschaften mit besonders hohem Einfluss auf

den Demontageprozess identifiziert. Positive Einflüsse werden empfohlen, während für negative Einflüsse einfach umsetzbare Alternativen identifiziert werden.

Für die Prozessgestaltung werden zusammenfassend allgemeine Empfehlungen für einen erfolgreichen Demontageprozess ausgesprochen.

## 4 Prozesskette zur Demontage von PSM Rotoren

In diesem Kapitel wird eine Prozesskette zur ganzheitlichen Betrachtung der Magnetdemontage abgeleitet und prototypisch umgesetzt. Die Prozesskette zur Demontage von PSM Rotoren bis auf Magnetebene wird ausgehend vom Rotor der PSM durchlaufen. Zuvor erforderliche Prozessschritte sind nicht Teil dieser Arbeit, da hierfür im Stand der Technik aus Kapitel 2 bereits Lösungen vorhanden sind.

Die Prozesskette zur Demontage wird basierend auf dem typischen Aufbau von PSM Rotoren und vorhergehenden Forschungsarbeiten aus Kapitel 2 abgeleitet und ist in (Heim et al. 2023b) veröffentlicht. Der Betrachtungsraum beschränkt sich auf elektrische Traktionsmotoren für vollelektrische Fahrzeuge. Eine Übertragung auf andere Anwendungen ist grundsätzlich nicht ausgeschlossen. Es werden stoffschlüssige Magnetfixierungen sowie die Fixierung mittels Federnase und Federblech als Fixierung mit und ohne Zusatzelemente betrachtet. Die Prozesskette besteht aus sechs Schritten, welche in Abbildung 4-1 dargestellt sind.

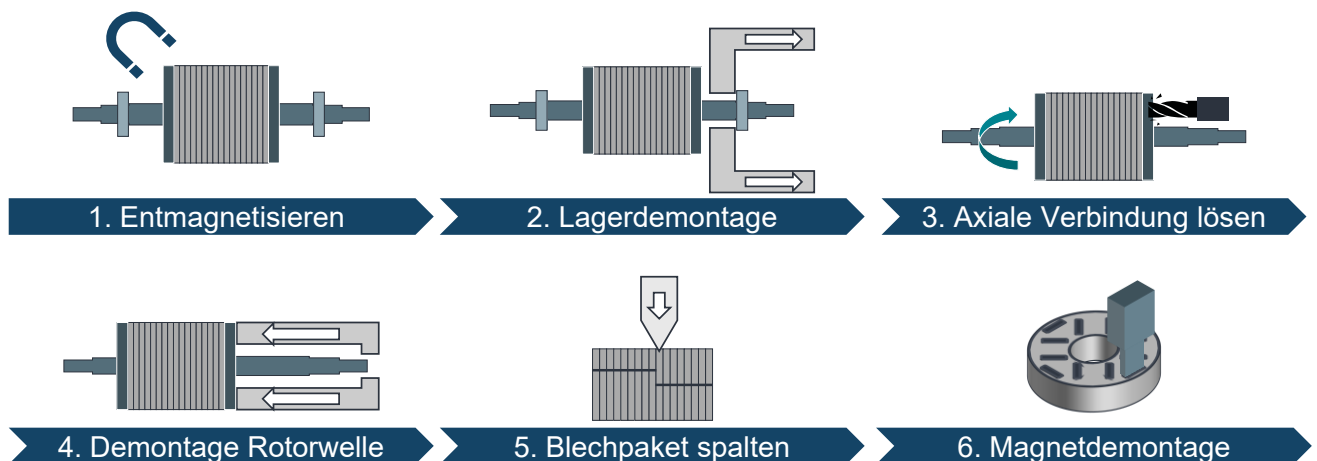


Abbildung 4-1: Prozesskette zur Rotordemontage (Heim et al. 2023b, S. 73).

### 4.1 Entmagnetisieren

Der erste Schritt der Demontage ist das Entmagnetisieren. Es ermöglicht die effiziente Durchführung der nachfolgenden Prozessschritte sowie eine einfache Handhabung der technischen Sauberkeit innerhalb der weiteren Prozesse. Das Anhaften von kleinen Metallpartikeln lässt sich andernfalls, insbesondere in der Umgebung von End-of-Life Produkten, lediglich unter enorm hohem Aufwand vermeiden. Die Entmagnetisierung wird mittels eines elektrischen Gegenfeldes umgesetzt. Diese Methode wurde im

Gegensatz zum thermischen Entmagnetisieren aufgrund des geringen Energiebedarfs sowie der äußerst geringen Prozesszeit gewählt, auch wenn sie komplexer in der Umsetzung ist. Zudem können Prozesstemperaturen von 400 bis 450 °C beim thermischen Entmagnetisieren zu einer Beschädigung der Magnetbeschichtung führen (Ihne et al. 2024a, S. 6; Ihne et al. 2023b, S. 463).

Der Entmagnetisierungsprozess wird prototypisch entsprechend Abbildung 4-2 umgesetzt. Ein Stand der Technik Rotor eines elektrischen Traktionsmotors wird zunächst regulär in einer Magnetisieranlage aufmagnetisiert und magnetisch vermessen. Anschließend wird die Polarität in der Magnetisieranlage umgekehrt und der Prozess mit dem gleichen Entmagnetisierungswerkzeug wiederholt. Alternativ kann der Rotor um einen Pol verdreht werden. Die Magnetisieranlage ist in ihren maximalen Strömen limitiert, da sie auf den Aufmagnetisierungsprozess ausgelegt ist. Daher wird der Rotor zunächst zur Reduktion der Koerzitivfeldstärke, ein Maß der Ummagnetisierungsfeldstärke, auf 110 °C erhitzt. Dies erfordert im Vergleich zum Erreichen der Curie Temperatur lediglich einen geringen Energieeinsatz. Zudem treten keine thermischen Schäden am Rotor auf, da die Temperatur sich unterhalb der Betriebstemperatur befindet.

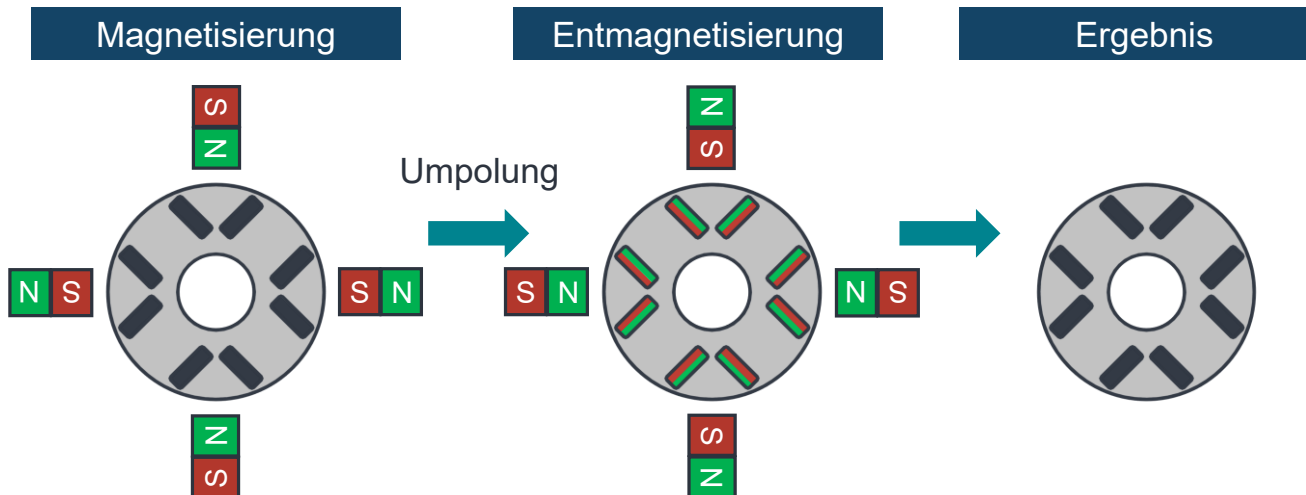


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Entmagnetisierungsprozesses.

Nach der Entmagnetisierung ist die Magnetstärke stark reduziert. Die Blechpakete lassen sich ohne Krafteinwirkung voneinander trennen, was aufgrund der hohen magnetischen Anziehungskräfte andernfalls lediglich mit Hilfsvorrichtungen umsetzbar ist. Es folgt eine Messung des magnetischen Dipolmoments mit einer Helmholtzspule sowie der magnetischen Flussdichte mit einem Gaußmeter (Hall-Sonde). Das magnetische Dipolmoment ist stark reduziert. Die magnetische Flussdichte ist ebenfalls reduziert,

jedoch in geringerem Ausmaß. Das Ergebnis des ersten Tests zeigt, dass die Magnetkräfte bereits ausreichend reduziert werden konnten, um die weiteren Prozessschritte durchführen zu können. Eine zukünftige Optimierung des Prozesses zur weiteren Senkung der Restfeldstärke ist möglich. Eine exakte Parameterkombination von Temperatur und Gegenfeldstärke kann das Ergebnis weiter verbessern.

## **4.2 Lagerdemontage**

Der Prozess der Lagerdemontage kann verglichen mit den anderen Prozessschritten als relativ einfach eingestuft werden. Je nach vorliegender Lagerung können Lager umgehend demontiert werden oder es wird zunächst eine axiale Verbindung wie beispielsweise ein Sicherungsring gelöst. Zudem kann entsprechend der Gestaltung des E-Motoren Gehäuses bzw. des Lagerschildes lediglich die Demontage eines Lagers notwendig sein, da sich das andere im Lagerschild oder Gehäuse befindet. Für die Lagerdemontage sind kommerzielle Werkzeuge verfügbar, die das Lager axial von der Rotorwelle mechanisch oder hydraulisch ziehen oder pressen, wahlweise wird dieser Prozess thermisch unterstützt (Schaeffler Technologies AG & Co. KG, S. 2).

## **4.3 Axiale Verbindung lösen**

Bevor das Blechpaket und die Wuchtscheiben von der Rotorwelle gelöst werden können, muss die axiale Fixierung getrennt werden. Es kann stets die Seite des Blechpakets mit der einfacher zu lösenden axialen Fixierung demontiert werden. Häufig wird auf einer Seite eine Wellenschulter eingesetzt, die nicht zum Lösen geeignet ist. Das Demontageverfahren ist stark von der Verbindung abhängig. Lösbare Verbindungen wie eine Wellenmutter sind vergleichsweise einfach zerstörungsfrei zu lösen. Andere Verbindungen, wie ein betrachteter Pressring oder eine geprägte Manschette, sind lediglich zerstörend demontierbar. Die Verbindung kann individuell zerstörend demontiert werden oder alternativ beim nachfolgenden Schritt der Rotorwellendemontage ebenfalls abgepresst werden. Hierfür sind allerdings sehr hohe Demontagekräfte erforderlich und andere Komponenten können dadurch beschädigt werden, weshalb dies nicht empfehlenswert ist.

Vor diesem Hintergrund werden Stand der Technik Motoren als Demontageobjekte untersucht. Die axiale Verbindung, aus Manschette oder Pressring bestehend, konnte jeweils abgefräst werden, dargestellt in Abbildung 4-3. Eine geringfügige Beschädigung der Rotorwelle konnte aufgrund fehlender Produktdaten sowie der Beschaffenheit der Verbindung nicht vermieden werden. Alternativ kann das Blechpaket durch Zugstäbe

durch den Rotor axial verpresst werden. Da diese axiale Verbindung unabhängig von der Rotorwelle ist, kann sie entweder in diesem Prozessschritt oder nach der Demontage der Rotorwelle demontiert werden.

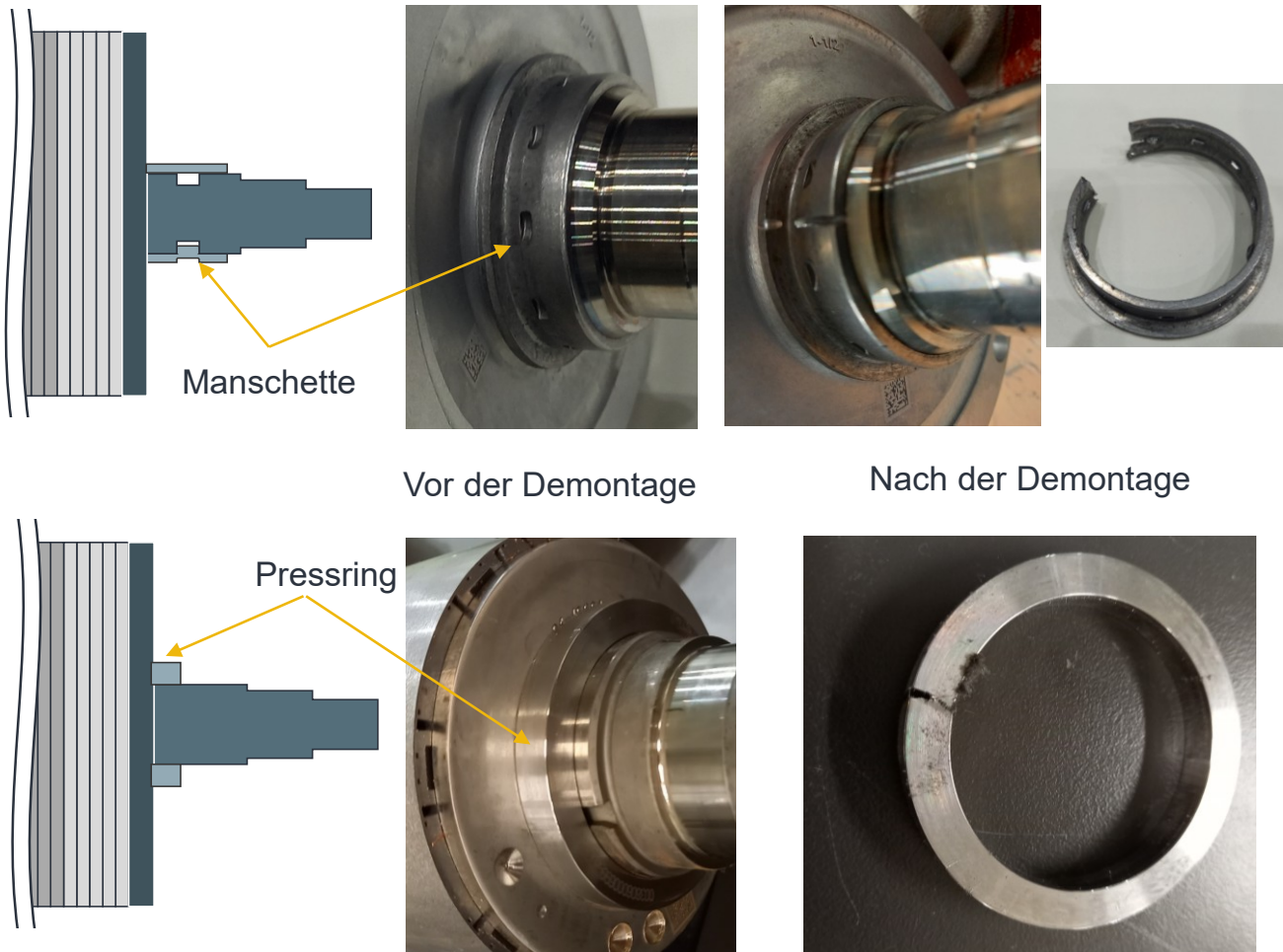


Abbildung 4-3: Demontage der axialen Verbindung.

#### 4.4 Demontage Rotorwelle

Im Anschluss an die Demontage der axialen Fixierung gilt es den Pressverband zwischen Rotorwelle und Blechpaket bzw. Wuchtscheibe zu lösen. Der geringe Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten der aus Stahl gefertigten Rotorwelle und des Blechpakets lässt keine thermische Unterstützung des Prozesses zu. Daher erfolgt die Demontage mechanisch mittels Abpressen. Der elektrische Traktionsantrieb wird experimentell unter Verwendung einer ringförmigen Vorrichtung demontiert, wie in Abbildung 4-4 dargestellt. Die Rotorwelle wird vertikal auf die ringförmige, auf die Geometrie der Wuchtscheibe angepasste, Vorrichtung gelegt, um eine gleichmäßige Kraftübertragung zu ermöglichen. Damit die Rotorwelle ohne Kollision vollständig durch das Blechpaket gepresst werden kann, bedarf es eines Auspresswerkzeugs mit geringerem

Durchmesser als dem Innendurchmesser des Blechpakets. Das Auspresswerkzeug besitzt zur einfachen Umsetzung eine zylindrische Innenzentrierung zur Rotorwelle.

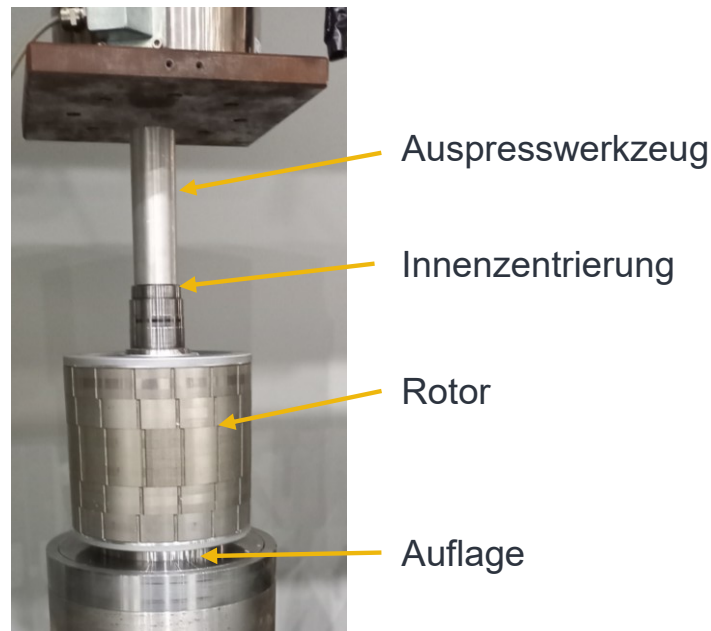


Abbildung 4-4: Demontage Rotorwelle.

Bei der Verbindung zwischen Rotorwelle und Blechpaket handelt es sich im vorliegenden Fall um eine Zahnwelle. Es ist eine leichte Stauchung des Blechpakets beim Aufbringen der Demontagekraft zu erkennen. Die Blechpakete weisen nach der Demontage keine sichtbaren Verformungen auf.

## 4.5 Blechpaket spalten

Aufgrund der Verschränkung der einzelnen Blechpakete zueinander ist es nicht möglich, alle axial hintereinanderliegenden Magnete durch alle Blechpakete gleichzeitig auszupressen. Zudem wären die erforderlichen Demontagekräfte enorm hoch. Daher müssen die Blechpakete zuerst getrennt werden. Die einzelnen Blechpakete sind nicht bei allen Elektromotoren miteinander verbunden. Die Verbindung entsteht durch den Einsatz von Magnetklebverfahren, die den gesamten Rotor gleichzeitig verkleben, wodurch die einzelnen Blechpakete durch den Klebstoff in den Magnettaschen miteinander verbunden werden. Bei dem zuvor betrachteten Rotor gibt es keine Verbindung zwischen den Blechpaketen, daher ist kein Demontageschritt erforderlich.

Die Blechpakete können auf unterschiedliche Weisen getrennt werden. Der Fokus liegt auf der Trennung ohne Beschädigung der Magnete und des Blechpakets, sodass der nachfolgende Magnetdemontageprozess ebenfalls zerstörungsfrei umgesetzt werden

kann. Daher wird ein Spaltprozess ausgewählt. Im Gegensatz zum Abscheren der Blechpakete ermöglicht der Spaltprozess durch die Schälbelastung geringere Prozesskräfte, da nicht die gesamte Klebefläche gleichzeitig getrennt wird.

Zur Erprobung des Spaltprozesses werden Versuchsträger hergestellt, indem zwei Blechpakete mit Magneten mit Klebstoff gleichzeitig vergossen werden, da der zuvor betrachtete Rotor keine solche Verbindung besitzt. Der Spaltprozess ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Zur Demontage wurde ein „E-Motoren-Knacker“ des Unternehmens Bronneberg eingesetzt, welcher für das Zerteilen von Statoren eingesetzt wird. Das Blechpaket wird auf einem Prisma positioniert und von oben mit einer Klinge aus gehärtetem Werkzeugstahl getrennt. Wichtig ist die exakte Positionierung unter der Klinge, die im manuellen Prozess zeitaufwändig sein kann. Hilfreich bei der Positionierung ist eine eindeutige Identifikation der verschiedenen Blechpakete. Durch die typischerweise alternierende Stanzrichtung sowie durch am Außendurchmesser verwendete Flussbarrieren, wie in Abbildung 4-4 am Rotor zu erkennen ist, können die einzelnen Blechpakete visuell unterschieden werden. Die Blechpakete konnten erfolgreich voneinander getrennt werden. Die Magnete wurden dabei nicht beschädigt.

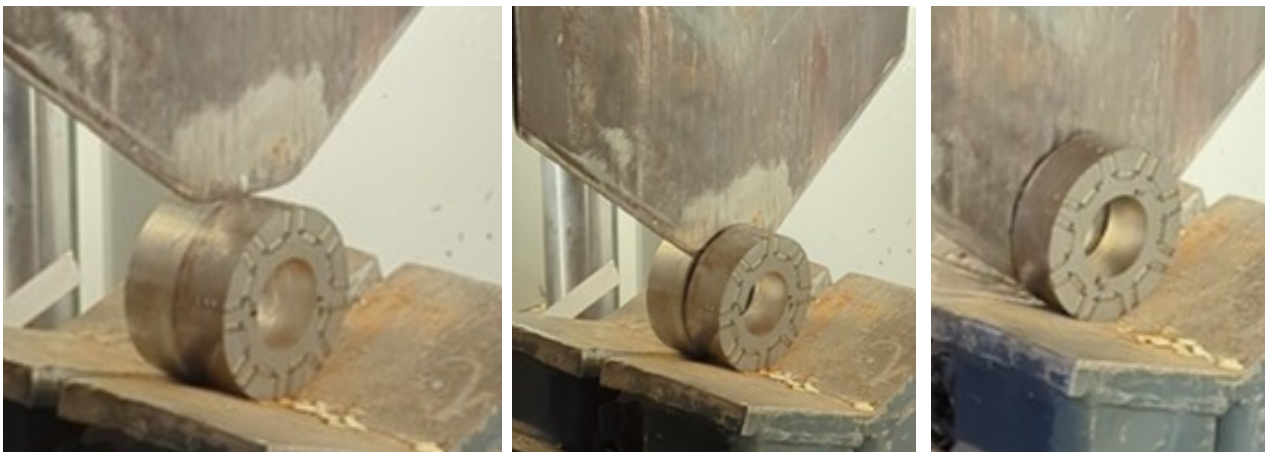


Abbildung 4-5: Prozess zum Spalten von Rotorblechpaketen.

**Zusammenfassung:** Alle Prozessschritte von der Entmagnetisierung bis zum Blechpaket spalten konnten prototypisch umgesetzt werden. Damit konnte gezeigt werden, dass die Bereitstellung von Blechpaketen mit Magneten für den Prozessschritt der Magnetdemontage realisierbar ist.

## 4.6 Magnetdemontage

Für die systematische Demontage von Magneten werden zunächst verklebte Magnetfixierungen auf Basis der „Leitlinie zum Trennen und Rückgewinnen von Klebstoffen und Füge­teilen aus geklebten Verbindungen“ nach DIN 54405 analysiert.

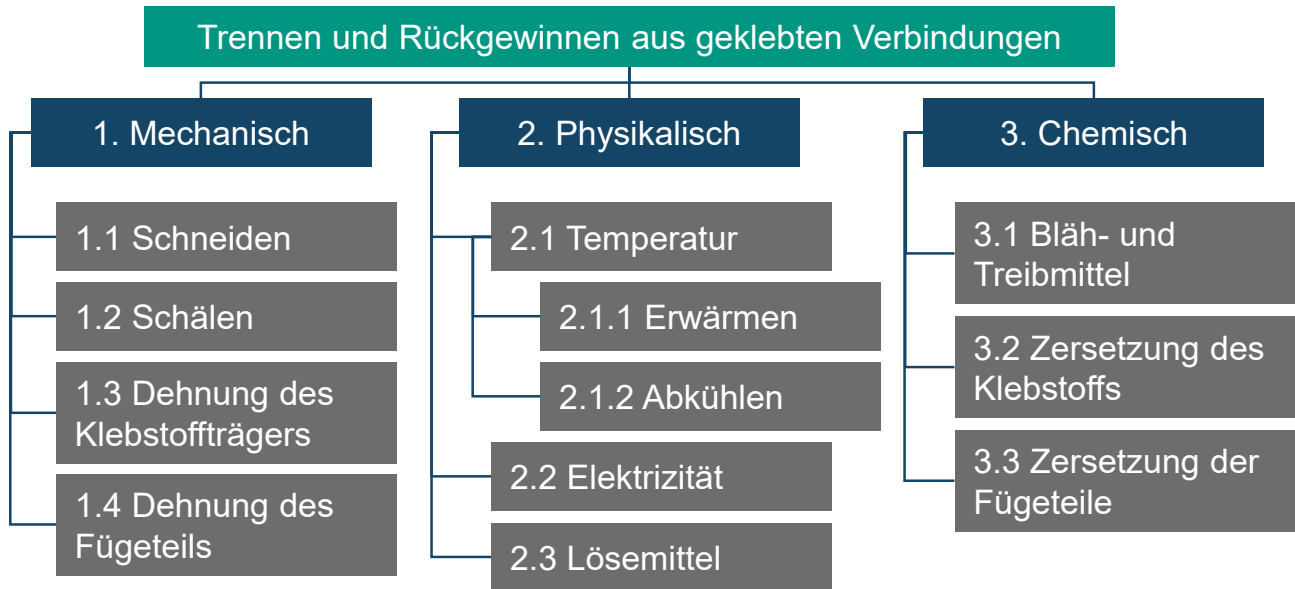


Abbildung 4-6: Trennen und Rückgewinnen aus geklebten Verbindungen nach DIN 54405.

In der DIN 54405 von Abbildung 4-6 kommen Ansätze zum Einsatz, welche auf für Klebstoffe besonders kritische Belastungen oder Umgebungsbedingungen wie Schälen, Temperatur oder Lösungsmittel abzielen. Im Folgenden werden die Ansätze bezüglich des Anwendungsfalls Magnetdemontage eingeordnet.

### 1. Mechanisch

Die mechanischen Löseverfahren Schneiden und Schälen lassen sich aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit des Blechpakets nicht zielführend umsetzen. Die Dehnung des Klebstoffträgers ist nicht möglich, da durch die Injektion in das Blechpaket kein Klebstoffträger genutzt wird. Die Füge­teile Blechpaket und Magnet besitzen eine hohe Steifigkeit, weshalb diese nicht in ausreichendem Maß gedehnt werden können. Es ist lediglich eine Dehnung des Klebstoffes selbst durch das Auspressen der Magnete möglich.

### 2. Physikalisch

Zu den physikalischen Verfahren zählen unter anderem das thermische Erhitzen und Abkühlen. Hierfür ist jedoch ein großer Energieeinsatz notwendig und zudem erzeugt

das Erhitzen zusätzliche Oxidation, welche sich negativ auf die Aufbereitung der Magnete auswirkt. Ein negativer Temperatureintrag ist mit einem sogar noch höheren Energieeinsatz verbunden. Zudem verursacht eine geringe Temperatur lediglich eine Versprödung des Werkstoffs und keine Zersetzung.

Das Lösen von Klebstoff mittels Elektrizität ist lediglich bei speziellen Klebstoffen anwendbar (DIN/TS 54405:2020-12, S. 8) und daher nicht geeignet für die Magnetdemontage, da aktuelle Motoren die Klebstoffe nicht einsetzen und kostspieliger Klebstoff verwendet werden muss. Das Auflösen von Stoffen mithilfe von Lösemittel ist den physikalischen Verfahren zuzuordnen. Dieses Verfahren ist lediglich für chemisch nicht vernetzte Polymere anwendbar (DIN/TS 54405:2020-12, S. 8).

### 3. Chemisch

Das chemische Trennen von Klebstoffen ist stark vom jeweiligen Klebstoff abhängig. So ist die Anwendung von Bläh- und Treibmittel in der Regel für Magnetfixierungen aufgrund der hohen Beständigkeit der Werkstoffe nicht umsetzbar. Die chemische Zersetzung von Klebstoff ist durch die Verwendung geeigneter Chemikalien umsetzbar, obwohl der Einsatz von großen Mengen der Chemikalien erforderlich ist. Des Weiteren kommen lange Prozesszeiten aufgrund des hochwertigen Klebstoffs und der schlechten Zugänglichkeit zwischen Blechpaket und Magnet hinzu. Nach (Elwert et al. 2017, S. 115) war für das chemische Lösen von Magneten eine Prozesszeit von mehr als 3 Stunden bei 120°C notwendig.

Das Zersetzen der Fügeteile ist aufgrund der hohen Beständigkeit des Blechpaketes nicht umsetzbar. Das Zersetzen des Magneten ist mittels HMPS Verfahren nach Kapitel 2.5.2 möglich, birgt aber lange Prozesszeiten sowie Verunreinigungen des zersetzten Magnetmaterials.

Nicht direkt in der Norm enthalten sind Klebstoffe, die besondere Eigenschaften besitzen, die ein Lösen besonders einfach ermöglichen (Banea 2019, S. 33–45). Diese Ansätze sind meist nicht prozessreif und kostspielig und finden aktuell keine Anwendung bei elektrischen Traktionsantrieben. Da es das Ziel ist sich bereits im Einsatz befindende elektrische Traktionsmotoren zu berücksichtigen, werden diese Ansätze nicht weiter betrachtet.

Insgesamt stellt sich das Auspressen der Magnete mittels Stempel durch den effizienten Prozess als zielführend dar. Das Auspressen wird elektromechanisch durchgeführt, da dies die einfachste Möglichkeit darstellt. Pneumatische und hydraulische Ansätze

sind bezüglich der Gestaltung des Demontageprozesses weniger flexibel. Vibrationsunterstützte Demontage wäre ebenfalls möglich, allerdings führt dies zu einer größeren Belastung der Bauteile und verursacht damit mehr Schäden. Ein Vorteil der mechanischen Demontage ist zudem eine hohe Flexibilität, da mechanische sowie chemische Magnetfixierungen demontiert werden können.

**Zusammenfassung:** Es bestehen unterschiedliche Möglichkeiten zum Lösen von Klebeverbindungen. Chemische und physikalische Verfahren sind aufgrund des hohen Energie- sowie Chemikalienbedarfs und der hohen potenziellen Beschädigung der Magnete nicht zielführend. Bei den mechanischen Verfahren ist aufgrund der Zugänglichkeit der Magnete lediglich das Auspressen mit einem Stempel umsetzbar. Diese Methode wird im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht. Der Prozessschritt Magnetdemontage muss zudem aufgrund der großen Anzahl von Blechpaketen und Magneten am häufigsten durchgeführt werden, weshalb eine Automatisierung des Prozesses notwendig ist.

## 5 Identifikation und Klassifizierung von relevanten Einflussparametern der Magnetdemontage

Die Einflussparameter lassen sich in Prozess- und Produktparameter einteilen. Prozessparameter können einfach während des Demontageprozesses gewählt werden, während die Änderung von Produktparametern im Design der Maschine sehr weitsichtig berücksichtigt werden muss. Inhalte dieses Kapitels wurden teilweise bereits in (A\_Claassen 2024; Heim et al. 2023a; Heim et al. 2024) veröffentlicht.

Für die Magnetdemontage werden anhand des Stands der Forschung und Technik von Kapitel 2 die allgemeinen Produktparameter, die alle Magnetfixierungen betreffen, in Tabelle 5-1 abgeleitet.

Tabelle 5-1: Allgemeine Produktparameter der Magnetdemontage.

System	Parameter	Ausführung
Magnet	Geometrie	Höhe, Breite, Länge
	Beschichtung	Nickel, Nickel-Kupfer-Nickel, Zink, Phosphatierung, Epoxid
	Werkstoff (NdFeB)	N42UH, N42H, N44UH, etc.
	Ausführung	Segmentiert, Anzahl Magnete pro Tasche
Blechpaket	Blechstärke	0,35 mm; 0,27 mm; 0,20 mm
	Herstellungsverfahren	Stanzen, Laserschneiden
	Paketierung	Vollflächig verklebt, Stanzpaketierte
	Magnettaschengeometrie	Höhe, Breite, Länge

Magnete weisen unterschiedliche **Geometrien** auf, die in Abhängigkeit der eingesetzten Magnetfixierung den Demontageprozess beeinflussen. Die Magnetmasse ist nicht als Parameter aufgeführt, da die Dichte auch bei unterschiedlichen Magnetgrades annähernd gleich ist. Verschiedene Arten der **Magnetbeschichtung** wurden bereits in Kapitel 2 beschrieben. Sie können Adhäsions- oder Reibkräfte beeinflussen. Die elektromagnetischen Eigenschaften der Magnete sind für den Demontageprozess nicht relevant. Die Festigkeit stellt eine wichtige **Werkstoffeigenschaft** bezüglich der Beschädigung der Magnete während der Demontage dar. Magnete können in verschiedenen **Ausführungen** vorliegen, beispielsweise kommen segmentierte Magnete oder mehrere Magnete pro Tasche vor.

Der Einfluss der **Blechstärke**, **Herstellung** und **Paketierung** wird nicht weiter betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass durch die lamellare Struktur des Blechpakets bei

stoffschlüssigen Fixierungen ein Formschluss entsteht, sodass die Haftung zwischen Magnetfixierung und Magnet entscheidend ist und nicht die Eigenschaften des Blechpakets. Die Werkstoffeigenschaften des Blechmaterials können vernachlässigt werden, da sich verschiedene Materialien maßgeblich in den elektromagnetischen Eigenschaften unterscheiden (Waelzholz 2023, S. 6). Trotz der starken Abhängigkeit von der Geometrie der Magnete kann die **Magnettaschengeometrie** unterschiedlich gestaltet sein und damit den Demontageprozess beeinflussen.

## 5.1 Stoffschlüssige Magnetfixierungen

Für stoffschlüssige Magnetfixierungen lassen sich eine Reihe von Produktparametern ableiten, die in Abbildung 5-1 gezeigt werden.

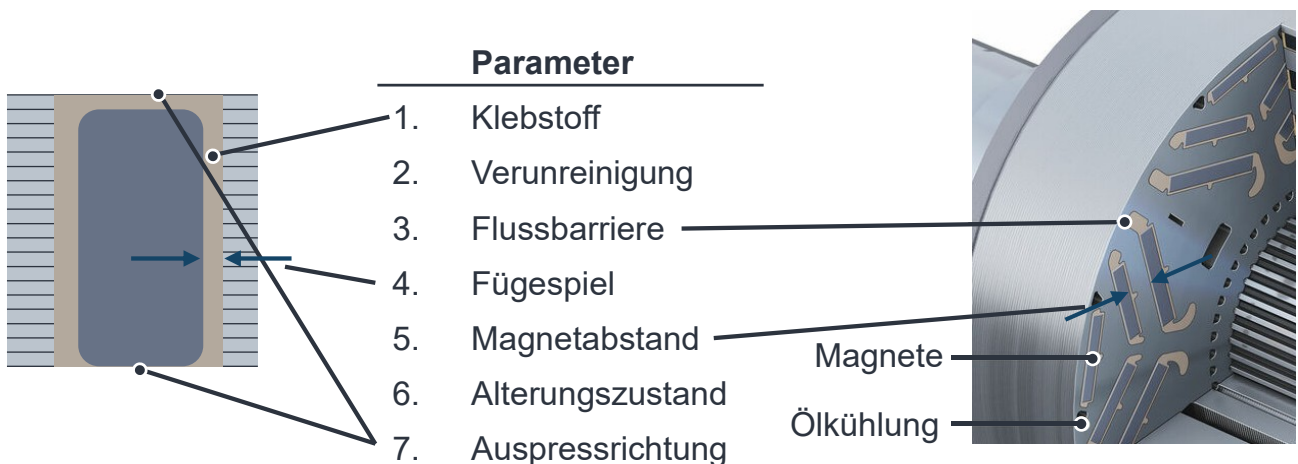


Abbildung 5-1: Produktparameter zur Demontage von stoffschlüssigen Magnetfixierungen (Audi AG 2024; Heim et al. 2024, S. 2).

Einen wichtigen Einfluss besitzt der **Klebstoff** selbst. Dieser bindet die Adhäsions- und Kohäsionskräfte aus. Zur Ausbildung von hochwertigen Adhäsionskräften ist eine saubere Oberfläche der beiden Fügepartner Magnet und Blechpaket notwendig. Daher sind **Verunreinigungen** während der Herstellung von Bedeutung. Das Blechpaketdesign weist **Flussbarrieren** mit unterschiedlichen Formen auf, welche entweder in der Magnettasche integriert sind oder unabhängig gemäß Kapitel 2.4.4 vorliegen. Falls sie in der Magnettasche integriert sind, sind diese ebenfalls mit Klebstoff gefüllt und können den Demontageprozess beeinflussen. Das **Fügespiel** zwischen Magnet und Blechpaket bestimmt die Dicke der Klebstoffschicht im Inneren. Ein geringes Fügespiel ist vorteilhaft bezüglich des magnetischen Flusses. Aufgrund von Toleranzen, dem

Montageprozess und der Klebewirkung kann ein Mindestmaß jedoch nicht unterschritten werden. Der **Magnetabstand** beschreibt den Abstand zwischen zwei parallel nebeneinander angeordneten Magnettaschen. Bei geringem Abstand und daraus resultierenden dünnen Stegen kann die Demontage eines Magneten den nebenliegenden beeinflussen. Durch den Betrieb des elektrischen Traktionsmotors im Fahrzeug besitzen End-of-Life Produkte einen **Alterungszustand**, der durch thermische und mechanische Lasten sowie die zeitliche Alterung erfolgt. Für die Montage ist es erforderlich, dass die Magnethöhe stets geringer als die Blechpakethöhe ist. Zudem richtet sich der Magnet typischerweise aufgrund der Schwerkraft oder des Fixierprozesses bündig an einer Seite des Blechpakets aus. Dadurch entsteht an der gegenüberliegenden Seite eine durchgehende Klebeschicht, welche zwei mögliche **Auspressrichtungen** des Magneten definiert.

## 5.2 Mechanische Fixierung

### 5.2.1 Federnase

Die Produktparameter für die Magnetfixierung mittels Federnase werden identifiziert. Abbildung 5-2 stellt die Parameter Länge, Anzahl, Breite, Winkel, Radius, freie Länge und Werkstoff dar.

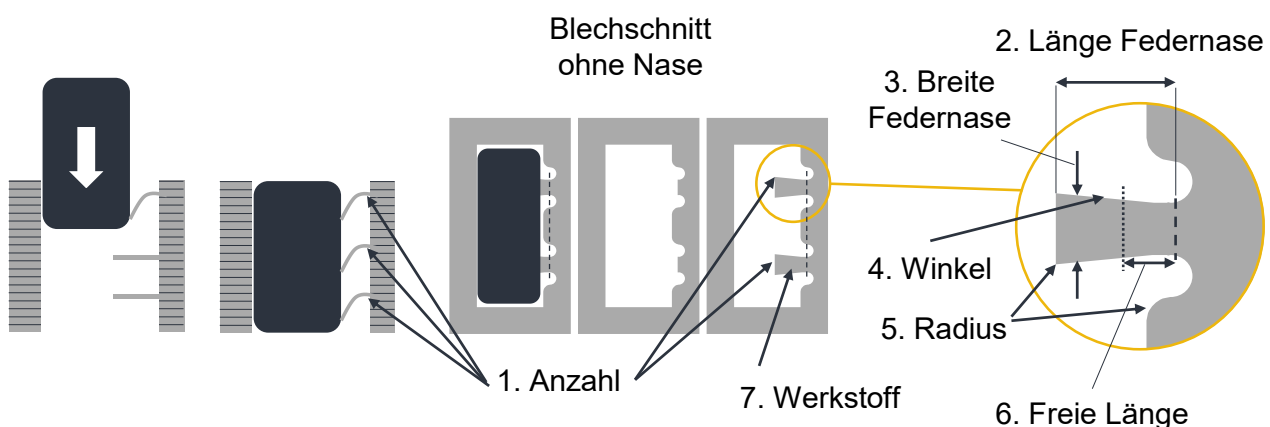


Abbildung 5-2: Produktparameter zur Demontage von Magnetfixierungen mit Federnase.

Die **Anzahl** der Federnasen wird aus dem Produkt der Federnasen pro Blechschnitt sowie Anzahl der Blechschnitte mit Federnase gebildet. Die Anzahl der Federnasen pro Blechschnitt ist frei wählbar. Die in Abbildung 5-2 dargestellten zwei Federnasen

ermöglichen einen definierten Kontakt aller Magnete. Die Anzahl der Blechpakete mit Federnasen ist durch die Höhe des Blechpakets limitiert.

Die Form der Federnasen kann beliebig gewählt werden. Im vorliegenden Fall wird eine Trapezform gewählt, wodurch sich die Parameter **Länge**, **Breite** und **Winkel** ergeben. Komplexe Formen sind nicht zu empfehlen, da die ohnehin filigranen Strukturen im Stanzprozess herausfordernd in der Herstellung sind und einen erhöhten Verschleiß des Stanzwerkzeugs verursachen (Wang 2011, S. 106). Aus diesem Grund sind die Ecken jeweils mit einem **Radius** versehen. Der Einfluss des Radius wird im weiteren Verlauf zwar modelliert, allerdings nicht explizit untersucht, da es sich lediglich um eine fertigungstechnische Limitation handelt. Die gestrichelten Linien in Abbildung 5-2 begrenzen die Federlänge, da darunterliegende Federbleche ohne Federnase nur bis zu dieser Linie ausgebildet sind. Durch die Aussparungen im Blechpaket lässt sich durch das Verschieben der Federnase die Federlänge einstellen, ohne den Luftspalt der Magnetasche zu vergrößern. Zudem zeigt die gepunktete Linie die Position des Eingriffs des Magneten an, welche die **freie Länge** der Federnase ergibt. Hierdurch wird der effektive Hebelarm der Feder bestimmt. Das Material der Federnase ist das Blechmaterial, weshalb dessen **Werkstoffeigenschaften** für die Federnase von Bedeutung sind. Insbesondere E-Modul, Streckgrenze und Fließkurve des Werkstoffs sind relevant.

### 5.2.2 Federblech

Die Einflussparameter der Magnetfixierung mittels Federblech werden identifiziert und in Abbildung 5-3 dargestellt. Zur Reduktion der Komplexität wird die Wellenform des Federblechs in der vorliegenden Arbeit auf eine Sinuskurve beschränkt. Theoretisch sind beliebige Formen umsetzbar.

Die identifizierten Einflussparameter sind die Blechstärke, Amplitude, Wellenlänge, Breite, Anzahl der Wellen und Werkstoffeigenschaften. Die **Blechstärke** ist zusammen mit der **Breite** des Blechs für die Biegesteifigkeit des Blechs verantwortlich. Die **Amplitude** ermöglicht den Federweg. Die Breite des Blechs ist durch die Breite des Magneten und der Magnetasche limitiert. Die **Wellenlänge** beeinflusst die **Anzahl der Wellen**, die innerhalb der Magnetasche auf dem zur Verfügung stehenden Bauraum umsetzbar sind. Die **Werkstoffparameter** des Federblechs stellen weitere Einflussparameter dar, da im Gegensatz zur Federnase der Werkstoff frei gewählt werden kann.

Geht man von einer rein elastischen Materialausnutzung aus, sind der E-Modul sowie die Streckgrenze die Einflussparameter auf die Fixierwirkung.

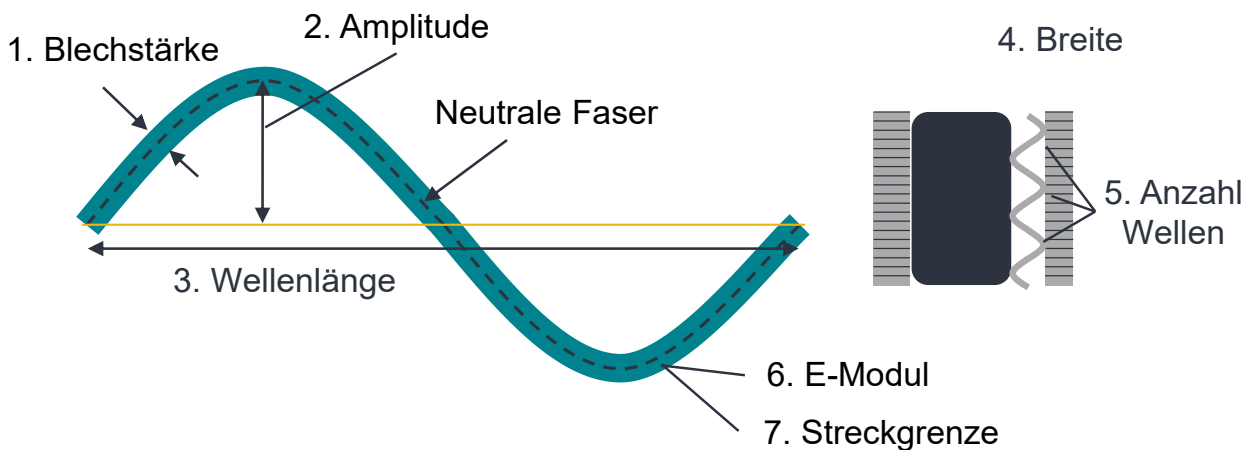


Abbildung 5-3: Produktparameter zur Demontage von Magnetfixierungen mit Federblech nach (Heim et al. 2023a).

### 5.3 Prozessparameter

Prozessparameter besitzen den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu Produktparametern für die Demontage frei gewählt werden können. Die Prozessparameter für die Demontage von Magneten in Abbildung 5-4 sind Stempelgeometrie, Auspressgeschwindigkeit, Demontagesequenz und Auspressrichtung, wobei letzteres bei symmetrischen Magnetfixierungen nicht berücksichtigt werden muss. Die Demontagesequenz stellt keinen unabhängigen Prozessparameter dar, sondern eine resultierende Größe.

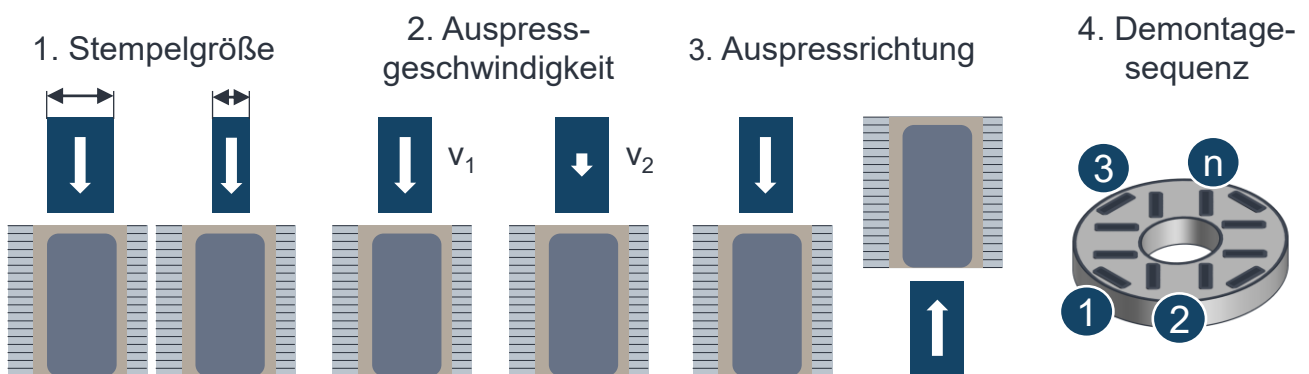


Abbildung 5-4: Prozessparameter zur Demontage von Magneten.

Die **Stempelgeometrie** besitzt im Kontakt mit dem Magneten einen direkten Einfluss auf die Flächenpressung und die maximal auftretenden Spannungen im Magneten. Die

geringste Flächenpressung tritt bei der größtmöglichen Kontaktfläche auf, was einer deckungsgleichen Querschnittsfläche von Magnet und Stempel entspricht. Dadurch wird jedoch die Flexibilität eingeschränkt, da mit einem deckungsgleichen Stempel ausschließlich eine spezifische Magnetgeometrie demontiert werden kann. Die **Auspressgeschwindigkeit** ist eine wichtige Kenngröße in Bezug auf die Taktzeit und damit die Produktivität. Eine Steigerung der Auspressgeschwindigkeit kann zu höheren auftretenden dynamischen Belastungen führen. Die **Auspressrichtung** kann frei gewählt werden. Aufgrund der **Demontagesequenz** können beispielsweise in der Magnetfixierung Mikrorisse auftreten, wenn das Blechpaket während der Demontage von anderen Magneten verformt wird.

## 6 Analytische und simulative Untersuchung der Magnetdemontage

Durch die Vielzahl an Einflussparametern stellt sich eine rein experimentelle Untersuchung aufgrund der hohen Anzahl erforderlicher Versuche nicht als zielführend dar. Die theoretischen Untersuchungen der Demontage von Magneten in diesem Kapitel ermöglichen einen effizienten Aufbau von Prozessverständnis. Die Ergebnisse können verwendet werden, um maximale Demontagekräfte und Spannungen für die Werkzeugauswahl oder die Prozessüberwachung zu bestimmen. Für die in dieser Arbeit betrachteten Magnetfixierungen: Stoffschluss, Federnase und Federblech werden jeweils individuelle Modelle erstellt. Finite-Elemente-Modelle werden unter Verwendung der Software Abaqus 2022 von Dassault Systems© entwickelt.

### 6.1 Stoffschlüssige Fixierung

Die stoffschlüssigen Fixierungen umfassen gemäß Kapitel 2.4.4 Magnete, die mit Klebstoff, Spritzgießen oder Spritzpressen fixiert sind. Durch die Anpassung der Werkstoffparameter können diese Fixierungsarten mit einem einzigen Modell abgebildet werden, da es sich um die gleiche Art der Magnetfixierung handelt. Die Ergebnisse bezüglich Simulation der stoffschlüssigen Magnetfixierungen sind bereits in (A\_Walter 2023) veröffentlicht und dort im Detail beschrieben. Für die stoffschlüssige Magnetfixierung gilt es, die Zusammenhänge von Einflussparametern auf die auftretenden Demontagekräfte sowie Spannungszustände im Magneten zu identifizieren. Diese Daten können zur Werkzeugauslegung und Prozessparametrierung genutzt werden, um die zerstörungsfreie Demontage erfolgreich umzusetzen.

#### 6.1.1 Strukturelle Klebeverbindungen

Stoffschlüssige Magnetfixierungen können gemäß Kapitel 2.4.4.3 als Klebeverbindungen betrachtet werden. Strukturelle Klebeverbindungen übertragen Belastungen primär mittels Schubspannungen. Bei einfachen Belastungsfällen kann die übertragbare Klebelast  $F_K$  ermittelt werden mit:

$$F_K = A_K * \tau$$

6-1

wobei  $A_K$  die Klebstofffläche und  $\tau$  die übertragbare Schubspannung ist, welche experimentell mittels Überlappungsproben bestimmt wird (Habenicht 2016, S. 153–154).

Diese einfache Berechnung der übertragbaren Last stößt schnell an ihre Grenzen. Je nach verwendetem Klebstoff sowie den Werkstoffeigenschaften der Fügepartner kommt es zu einer Spannungsüberhöhung an den Enden der Klebeverbindung, dargestellt in Abbildung 6-1.

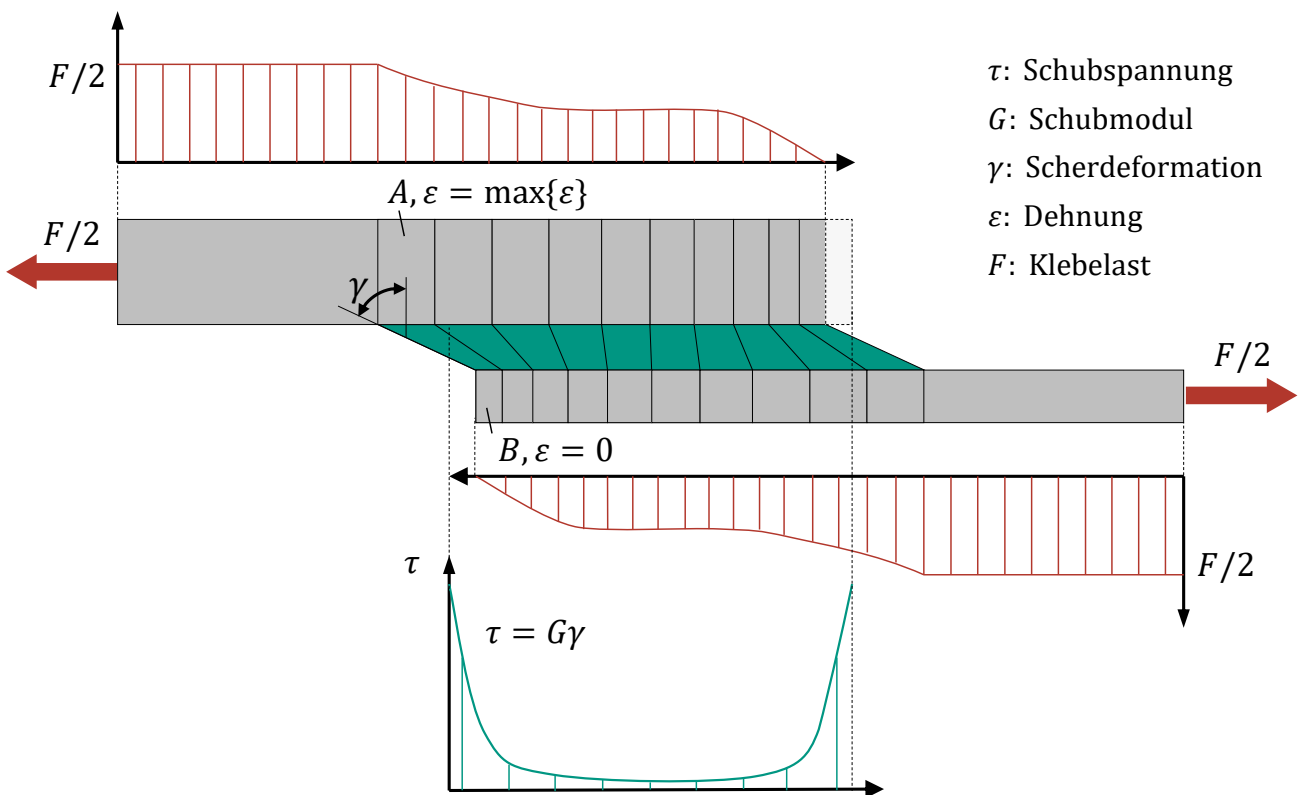


Abbildung 6-1: Verlauf von Normalkräften und Schubspannungen in einer zwei-schichtigen Laschenklebung unter elastischer Deformation ((A\_Walter 2023, S. 6) nach (Rapp 2015, S. 17)).

Beim Aufbringen der Zugkraft werden die Bauteile gedehnt. Diese Dehnung erfolgt nicht homogen, sondern nimmt an Position B in Abbildung 6-1 zum Ende des Bauteils bis  $\varepsilon = 0$  ab. Bei dem gegenüberliegenden Bauteil an Position A ist hingegen die Dehnung maximal. Durch diesen Unterschied erfährt der Klebstoff an dieser Stelle die höchste Schubbelastung, die zu Rissen und zum Versagen des Klebstoffs führt. Bei weit ausgedehnten Klebeverbindungen kann es dazu kommen, dass die Schubspannung in der Mitte auf null fällt. Eine weitere Steigerung der Länge der Fügeverbindung führt in diesem Fall zu keiner Steigerung der Tragfähigkeit der Klebeverbindung. Dieser Effekt wird durch die Shear-Lag-Theorie beschrieben (Rapp 2015, S. 17). Eine quantitative Untersuchung der Spannungen innerhalb der Klebeverbindung und der

Demontagekräfte sowie der Einfluss verschiedener Werkstoffe kann nicht analytisch abgebildet werden, sondern erfordert eine Finite-Elemente-Simulation.

### 6.1.2 Modellaufbau

Zunächst erfolgt ein Modellaufbau als Laschenklebung in Anlehnung an (Campilho et al. 2013; Da Rocha 2016), um zu bestimmen welcher Modellierungsansatz für die Klebeverbindung zielführend ist. Sowohl der Magnet als auch die Magnettasche werden vereinfacht als Rechteck zweidimensional modelliert, um die Rechenzeit in einem vertretbaren Rahmen zu halten. Die Modellierung erfordert Werkstoffkennwerte der vorliegenden Komponenten. Das Blechpaket und der Magnet werden zunächst als isotroper Werkstoff aus Stahl modelliert, um die Komplexität gering zu halten. Die Auswahl der Werkstoffparameter erfolgt durch den Abgleich von wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Campilho et al. 2013, S. 50; Campilho & Fernandes 2015, S. 104; Da Rocha 2016, S. 51–54) und Herstellerangaben (Delo 2024, S. 1–3; Elantas 2009, S. 3). Es wird ein fiktiver Werkstoff für die Magnetfixierung modelliert, welcher Werkstoffeigenschaften im mittleren Bereich der vorliegenden Daten nutzt. Diese Werkstoffparameter sind in Tabelle 6-1 aufgelistet.

Tabelle 6-1: Werkstoffparameter für die Simulation der Magnetdemontage.

System	Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Magnet- fixierung	E-Modul	$E_K$	2300	MPa
	Schubmodul	$G_K$	800	MPa
	Festigkeit Normalenrichtung	$t_{n,K}$	45	MPa
	Festigkeit Schubrichtung	$t_{s,K}$	22	MPa
	Kritische Rissöffnung	$\delta_K$	0,06	mm
Stahl	E-Modul	$E_{St}$	210	GPa
	Schubmodul	$G_{St}$	80	GPa
	Poissonzahl	$\nu_{St}$	0,3	-

Zunächst werden unterschiedliche Modellierungsansätze angewendet und miteinander bezüglich Kraft-Weg-Verlauf, Schubspannungsverlauf, numerischer Stabilität und Rechenzeit verglichen. Die Modellierung des Klebstoffs wird mittels Kohäsivelementen implizit sowie explizit, mit einer Kohäsivfläche explizit und einem Kontinuum explizit modelliert. Kohäsivelemente stellen spezielle Elemente für die Modellierung von Klebstoffen dar. Bei einer Kohäsivfläche beträgt das Volumen des Klebstoffs null. Die

Eigenschaften der Klebeverbindung werden als Kontakt der beiden Fügepartner modelliert. Bei einem Kontinuum wird ein separates Bauteil definiert, dem die Eigenschaften des Klebstoffs zugewiesen werden. Die Fügepartner bestehen jeweils aus CPS4R Elementen (engl. plane stress element with reduced integration).

Nach ausführlicher theoretischer Betrachtung wird sich für eine dynamisch implizite Modellierung mit Kohäsivelementen entschieden. Es stellt für den vorliegenden Fall die beste Option aus Ergebnisqualität, numerischer Stabilität und Rechenzeit dar. Genauere Informationen sind (A\_Walter 2023) zu entnehmen.

Nach der Auswahl der Kohäsivelemente wird das Ersatzmodell von Magnet und Blechpaket durch spezifische Werkstoffdaten ersetzt. Herstellerangaben zu Werkstoffeigenschaften von Elektroblech beziehen sich lediglich auf Einzelbleche, nicht aber auf deren Verbund. Durch das Stapeln der mit einem Isolationslack überzogenen Einzelbleche kommt es zu einem transversalisotropen Materialverhalten mit stark reduzierter Steifigkeit in Stapelrichtung. Zur Abbildung dieses Materialverhaltens werden die Werkstoffdaten aus (Baloglu 2021, S. 109) in Tabelle 6-2 verwendet. Für das Magnetmaterial werden Herstellerangaben verwendet (Eclipse Magnetics; e-Magnets 2025; MatWeb ), die ebenfalls in Tabelle 6-2 eingetragen sind.

Tabelle 6-2: Werkstoffparameter von Blechpaket und Magnet für die Simulation der Magnetdemontage.

System	Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Blechpaket	E-Modul (radial)	$E_{BP,1}$	206,4	GPa
	E-Modul (tangential)	$E_{BP,2}$	206,4	GPa
	E-Modul (axial)	$E_{BP,3}$	118,98	GPa
	Schubmodul	$G_{BP,12}$	79,37	GPa
	Schubmodul	$G_{BP,13}$	35,62	GPa
	Poissonzahl	$\nu_{BP,12}$	0,300	-
	Poissonzahl	$\nu_{BP,13}$	0,301	-
Magnet	Poissonzahl	$\nu_{BP,23}$	0,174	-
	E-Modul	$E_{Mag}$	160	GPa
	Poissonzahl	$\nu_{Mag}$	0,24	-
	Zugfestigkeit	$R_{m, Mag}$	82,7	MPa
	Druckfestigkeit	$R_{D, Mag}$	850-1050	MPa

Im nächsten Schritt wird die räumliche Dimensionalität des Modells festgelegt. Hierfür wird das bisherige zweidimensionale Modell mit einem dreidimensionalen Modell verglichen. Die Modelle sind in Abbildung 6-2 dargestellt.

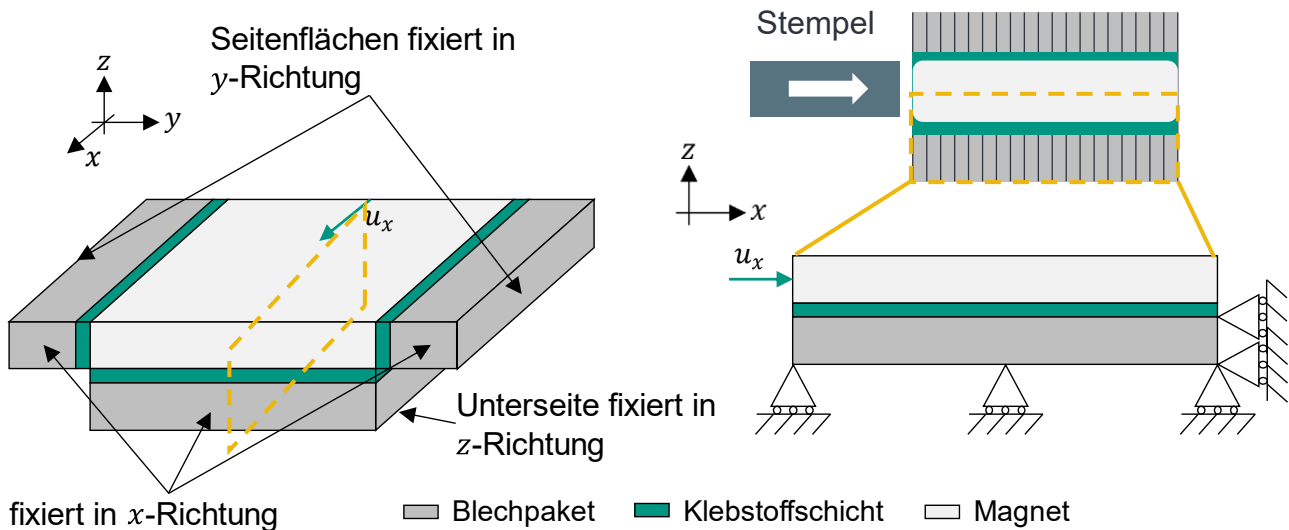


Abbildung 6-2: Darstellung der Simulationsgeometrien und Randbedingungen im 3D- (links) und im 2D-Modell (rechts) (A\_Walter 2023, S. 46).

Bei dem 3D-Modell werden die Ecken nicht modelliert, da diese zu numerischer Instabilität führen können und nur einen sehr geringen Anteil des Modells darstellen, weshalb deren Einfluss vernachlässigbar gering eingestuft wird. In beiden Modellen ist das Blechpaket jeweils an den äußeren Seiten sowie an der Unterseite fixiert, welche den Kontakt des Blechpakets mit einer Auflagefläche während des Demontageprozesses abbildet. Es wird eine Verschiebungsrandbedingung  $u_x$  in positive x-Richtung am Magneten bei  $x = 0$  für die Demontage vorgegeben. In z-Richtung besteht bei beiden Modellen eine Symmetrierandbedingung. Im 3D-Modell besteht zudem eine Symmetrie in y-Richtung, die in Abbildung 6-2 zum besseren Verständnis des Gesamtmodells nicht dargestellt ist.

Für den Vergleich von 3D- und 2D-Modell werden Magnete mit der Größe  $32 \times 24 \times 4,3$  mm verwendet. Die Skalierung der 2D-Simulationen für den Vergleich erfolgt durch die Multiplikation der 2D-Simulation mit der zweifachen Magnetlänge und -breite.

Das Ergebnis des Vergleichs der Demontagekräfte ist in Abbildung 6-3 dargestellt. Die Kraft-Weg-Kurven verlaufen sowohl qualitativ, als auch quantitativ sehr ähnlich. Die Spannungsverteilung am Magneten des 3D-Modells zeigt zudem eine ähnliche Form zu einem exemplarischen Auspressversuch eines Magneten, der mittels Transfermolding fixiert ist. Eine dreiecksförmige Spannungsverteilung ist zu erkennen. Diese Spannungsverteilung lässt sich mit dem 2D-Modell nicht abbilden. Der Vergleich der Kraft-

Weg-Verläufe zeigt jedoch, dass der Einfluss auf die Demontagekraft aufgrund der Kraftverteilung nur gering ist und die Vereinfachung des 2D-Modells für die weiteren Untersuchungen verwendet werden kann.

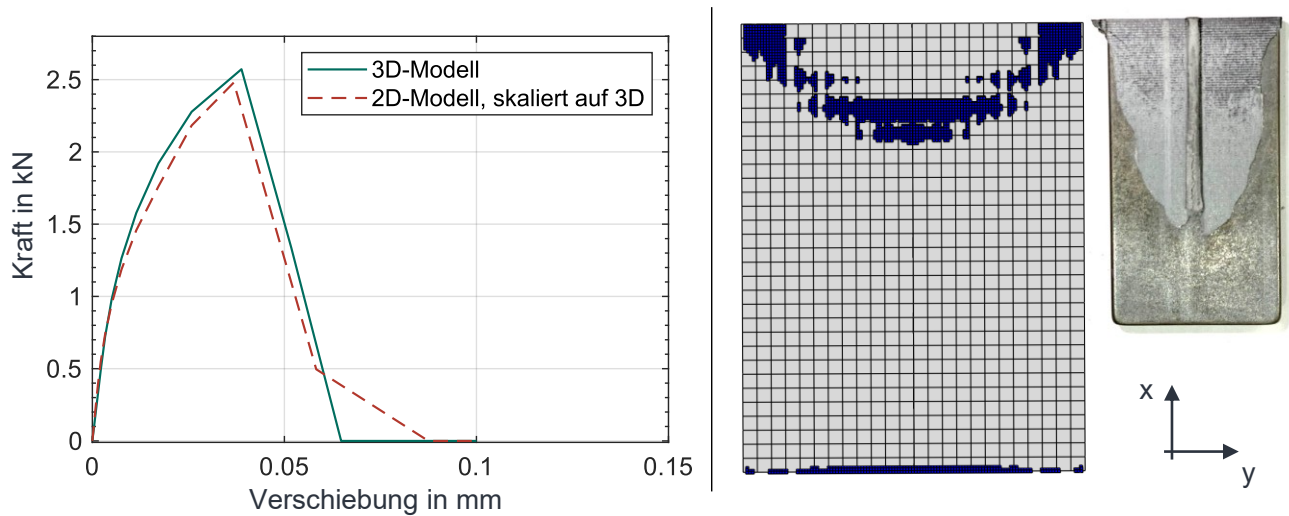


Abbildung 6-3: Links: Vergleich der Kraft-Weg-Kurven des 3D- und auf 3D-skalierten Modells. Rechts: Gegenüberstellung der verbleibenden Kohäsivelemente des Simulationsmodells und der real verbliebenen Transfermolding-Masse an einem Magneten (A\_Walter 2023, S. 47).

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Modellierung eines Auspresswerkzeugs im Vergleich zur verwendeten Verschiebungsrandbedingung untersucht. Hierfür wird aufgrund der hohen Festigkeit des Werkzeugs ein Starrkörper modelliert, der mit einer Verschiebungs- sowie Kontakttrandbedingung versehen ist. Im Vergleich zur reinen Verschiebungsrandbedingung ohne Werkzeug sind die Kraft-Weg-Verläufe sowie die Schubspannungsverteilung innerhalb der Verbindung unwesentlich verändert. Die auftretenden Spannungen im Magneten sind leicht erhöht, liegen jedoch noch deutlich unterhalb einer schadenskritischen Belastung. Daher wird auf eine Modellierung des Auspresswerkzeugs verzichtet und eine Verschiebungsrandbedingung aufgebracht.

Das entwickelte Modell wird zur Durchführung von Parameterstudien parametrisiert. Gleichzeitig wird eine Konvergenzanalyse bezüglich der Vernetzungsgröße durchgeführt, um sicher zu gehen, dass innerhalb des Parameterraums keine numerischen Fehler auftreten. Die Studie zeigt, dass bei einer Elementgröße von 0,2 mm Demontagekräfte und Spannungen präzise abgebildet werden können.

### 6.1.3 Simulative Einflussanalyse mittels Screening

Anhand des entwickelten Simulationsmodells werden Einflüsse der Modellparameter auf die Demontagekraft untersucht. Zunächst wird ein Screening Versuchsplan genutzt, um die wichtigsten Einflussgrößen effizient zu identifizieren. Anschließend erfolgt die detaillierte Untersuchung einzelner Parameter.

Die Faktorstufen für die Screening Versuchsreihe werden in Tabelle 6-3 definiert. Diese werden so gewählt, dass sie in einem realistischen Rahmen für typische Rotoren von elektrischen Traktionsmotoren liegen. Hierfür werden Daten von wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Baloglu 2021; Campilho & Fernandes 2015; Du et al. 2016; Nerg et al. 2014; Parasiliti et al. 2012; Walter 2021) sowie Herstellerangaben herangezogen (Delo 2020; Delo 2024; MatWeb ). Es ist zu beachten, dass die Kombination der Faktoren in der Realität nicht beliebig gewählt werden kann. Insbesondere bei den Werkstoffparametern bestehen häufig Abhängigkeiten. So weisen Epoxidwerkstoffe mit einer besonders hohen Festigkeit ein sprödes Verhalten auf (Delo 2023; Delo 2024).

Tabelle 6-3: Faktorstufen für die simulative Screening Versuchsreihe.

System	Faktor	Symbol	Faktorstufe			Einheit
			-		+	
Mag- net	Höhe	$h_{\text{Mag}}$	15	37,5	60	mm
	Breite	$b_{\text{Mag}}$	3	4	5	mm
	E-Modul	$E_{\text{Mag}}$	150	165	180	GPa
Blech- paket	Breite	$b_{\text{BP}}$	1,2	3,1	5	mm
	E-Modul	$E_{\text{BP}}$	170	190	210	GPa
	Schubmodul	$G_{\text{BP}}$	50	70	90	GPa
Kohäsivschicht	Dicke	$D_K$	0,05	0,10	0,15	mm
	E-Modul	$E_K$	0,4	3,7	7	GPa
	Schubmodul	$G_K$	0,15	0,675	1,2	GPa
	Festigkeit Normalenrichtung	$t_{n,K}$	30	50	70	MPa
	Festigkeit Scherrichtung	$t_{s,K}$	8	16,5	25	MPa
	Kritische Rissöffnung	$\delta_K$	0,03	0,165	0,3	mm

Neben den maximalen und minimalen Faktorstufen wird ebenfalls eine mittlere Stufe verwendet, da durch die Parametrierung des Modells der zusätzliche Aufwand einer weiteren Faktorstufe sehr gering ist. Es ergeben sich mit dem Screening Versuchsplan durch die 12 Faktoren mit jeweils 3 Faktorstufen 25 Simulationen. Die Ergebnisse des Screenings sind in Form eines Haupteffektediagramms in Abbildung 6-4 dargestellt.

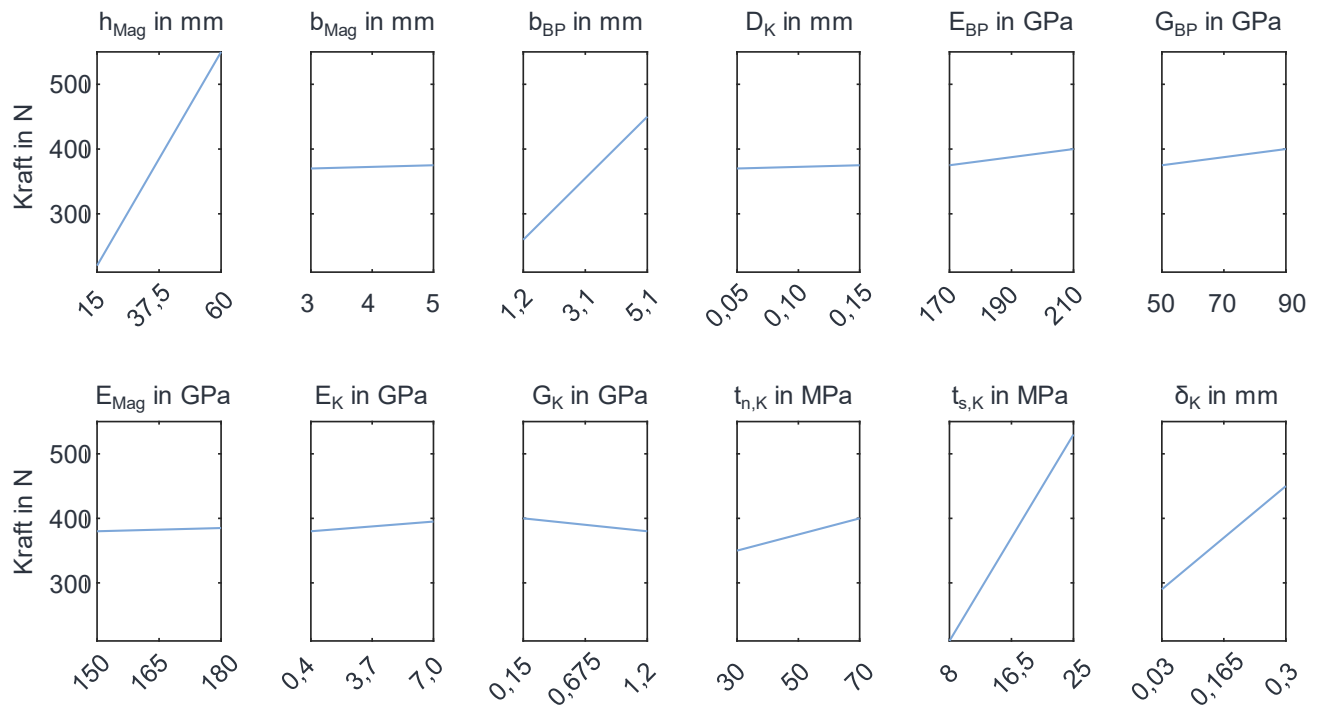


Abbildung 6-4: Haupteffektediagramm maximale Demontagekraft bei stoffschlüssigen Magnetfixierungen (nach (A\_Walter 2023, S. 60)).

Die Höhe des Magneten bzw. des Blechpakets besitzt den größten Einfluss auf die Demontagekraft. Dies ist der einzige Geometrieparameter der Klebefläche in dem 2D Modell. Die Scherfestigkeit des Klebstoffs besitzt den zweitgrößten Einfluss. Dieser ist deutlich größer als die Festigkeit der Kohäsivschicht in Normalenrichtung. Damit ist die Scherung erwartungsgemäß die ausschlaggebende Belastungsart und deckt sich mit Formel 6-1, in der die übertragbare Kraft einer Klebeverbindung als Produkt aus Scherfestigkeit und Klebefläche berechnet wird.

An dritter Stelle steht der Einfluss der Breite des Blechpakets. Die Breite des Blechpakets bedingt die Steifigkeit des Bauteils. Eine geringe Steifigkeit führt zu einer gesteigerten Verformung des Bauteils und damit zur Spannungsüberhöhung an den Enden der Fügeverbindung. Der gleiche Effekt gilt für die Breite des Magneten. Allerdings ist der Wertebereich der Magnetbreite kleiner als der des Blechpakets. Zudem ist der Magnet der steifere Fügepartner, sodass die maximale Verformung ohnehin nicht am Magneten auftritt. Aus diesen Gründen besitzt die Breite des Magneten einen vernachlässigbar geringen Effekt.

Den viertgrößten Einfluss besitzt die kritische Rissöffnung  $\delta_K$ . Sie beschreibt die Verschiebung innerhalb der Klebeverbindung, ab der ein Riss einsetzt. Eine größere Verschiebung bis zur kritischen Rissöffnung steigert die übertragbaren Demontagekräfte,

da die zuvor genannten Bauteilverformungen hierdurch weniger kritisch sind. Alle weiteren Faktoren weisen einen vergleichsweise geringen Einfluss auf und werden daher nicht weiter untersucht.

### 6.1.4 Einzelfaktoranalyse

Die wichtigsten im Screening identifizierten Parameter werden detailliert analysiert. Hierfür werden alle Faktoren konstant gehalten, während jeweils die Faktoren Magnethöhe, Scherfestigkeit, Breite des Blechpakets und die kritische Rissöffnung variiert werden.

#### 6.1.4.1 Magnethöhe

Der Einfluss der Magnethöhe wird hinsichtlich eines linearen oder nichtlinearen Verhaltens untersucht. Ein nichtlineares Verhalten ist entsprechend des Shear-Lag-Effekts für große Fügelängen zu erwarten, daher werden diese fokussiert und ein Bereich von 30 bis 170 mm Fügelänge betrachtet. Die maximalen Demontagekräfte für unterschiedliche Magnethöhen sind in Abbildung 6-5 dargestellt.

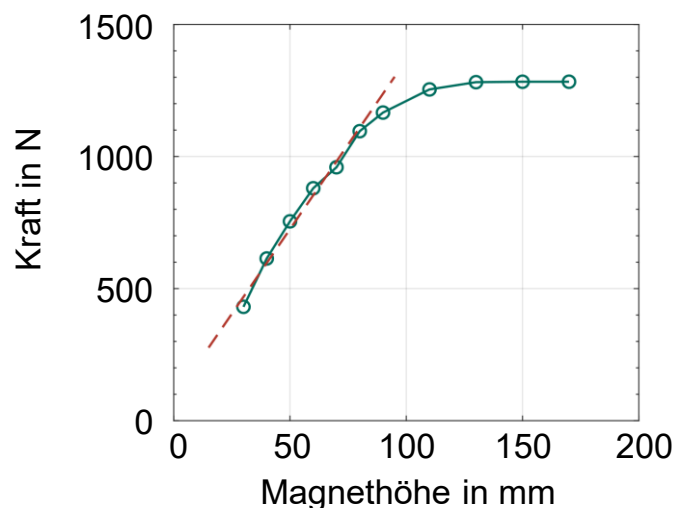


Abbildung 6-5: Einfluss der Magnethöhe auf die maximale Demontagekraft (A\_Walter 2023, S. 61).

Die Maximalkraft steigt von 30 bis 90 mm linear und nähert sich asymptotisch ab 130 mm einem Grenzwert an, was auf den Shear-Lag-Effekt zurückzuführen ist. Mit typischerweise weniger als 60 mm Magnethöhe gemäß Tabelle 6-3, ist die Nutzung dieses Effekts für die Demontage von elektrischen Traktionsmotoren kaum anwendbar. Gleichzeitig ermöglicht das lineare Verhalten für Magnethöhen unter 90 mm eine lineare Skalierung von Demontagekräften bei unterschiedlichen Magnethöhen.

### 6.1.4.2 Scherfestigkeit

In diesem Abschnitt wird die Scherfestigkeit der Magnetfixierung untersucht. Es werden fünf Simulationen mit Scherfestigkeiten im Bereich von 5 bis 30 N/mm<sup>2</sup> durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein rein linearer Zusammenhang besteht.

### 6.1.4.3 Breite des Blechpakets

Die Breite des Blechpakets wird von 1 bis 12 mm in Schritten von 1 mm erhöht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-6 links dargestellt. Eine Konvergenz der maximalen Demontagekraft tritt bereits ab einer Breite von 5 mm auf. Da dies ein Wert ist, der in der Praxis unterschritten werden kann, wird die Blechpaketbreite bei den experimentellen Arbeiten weiter untersucht.

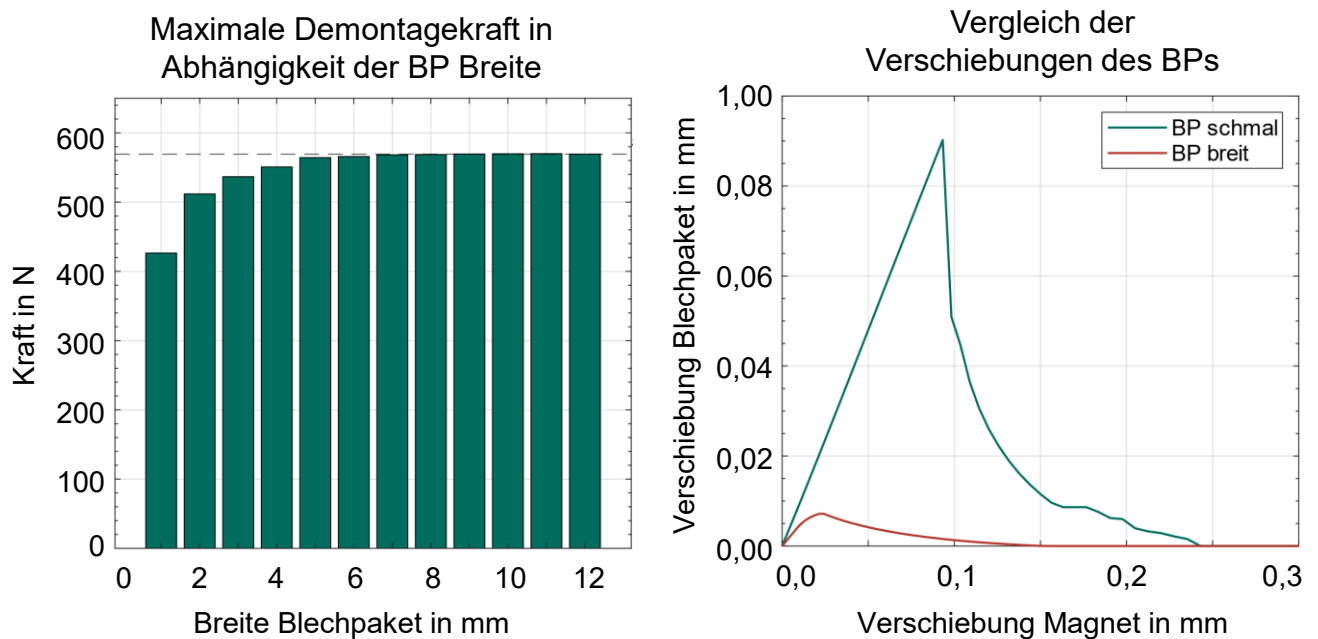


Abbildung 6-6: Einfluss der Blechpaketbreite auf die maximale Demontagekraft (links), Verschiebung des Blechpaket in Abhängigkeit der Verschiebung des Magneten (rechts) (A\_Walter 2023, S. 65).

In Abbildung 6-6 rechts wird die durch die Randbedingung aufgebrachte Verschiebung am Magneten in Demontagerichtung mit der Verschiebung des Blechpakets an der gleichen Stelle verglichen. Das schmale Blechpaket mit 1 mm erfährt eine deutlich gesteigerte Verschiebung aufgrund der geringeren Steifigkeit als das Blechpaket mit 12 mm. Dadurch tritt die maximale Verschiebung und die damit verbundene maximale Demontagekraft erst bei einer größeren Verschiebung des Magneten auf. Die maximale

Demontagekraft ist nur bedingt gesteigert, obwohl die Verschiebung um ein Vielfaches höher ist.

#### 6.1.4.4 Kritische Rissöffnung

Die kritische Rissöffnung wird von 0,01 bis 0,3 mm variiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-7 dargestellt.

Eine eindeutige Konvergenz ist im betrachteten Bereich in Abbildung 6-7 oben links nicht zu erkennen, allerdings ein degressiver Verlauf der maximalen Demontagekraft. Eine Ausweitung des Wertebereichs ist aus werkstofflicher Sicht nicht sinnvoll, da entsprechende Werkstoffe für den betrachteten Anwendungsfall nicht existieren. Zum besseren Verständnis der Wirkzusammenhänge wird der Schubspannungsverlauf innerhalb der Klebeverbindung in Abbildung 6-7 rechts oben untersucht. In Abbildung 6-7 unten sind für die kritische Rissöffnung von 0,01; 0,04; 0,1 sowie 0,3 mm der Schubspannungsverlauf zu verschiedenen Zeitpunkten  $t$  während der Demontage aufgezeigt. Die Simulation startet bei  $t = 0$  und endet bei  $t = 100$  nach der Umsetzung der Verschiebungsrandbedingung. Es sind jeweils die Zeitschritte mit den höchsten Schubspannungen dargestellt.

Bei der kritischen Rissöffnung von 0,01 mm wächst die Schubspannung zunehmend an den Rändern an. Beim Erreichen der maximalen Schubspannung versagt das Material am äußersten Rand, wobei im mittleren Bereich der Klebeverbindung die Schubspannungen nur geringfügig ausgebildet sind. Die Stelle mit der maximalen Schubspannung wandert vom äußeren Rand zur Mitte der Klebeverbindung, während hohe Schubspannungen nur sehr lokal auftreten, sodass keine hohe Materialausnutzung stattfindet.

Bei einer kritischen Rissöffnung von 0,3 mm wächst ebenfalls die Schubspannung zu Beginn insbesondere an den Rändern stark an. Dann setzt sich die maximale Schubspannung nach innen fort, ohne an den Rändern bereits vollständig zu versagen. Das Versagen des Materials tritt über die gesamte Länge der Fügeverbindung auf, sodass die maximal übertragbare Schubspannung über die Länge konstant fällt. Hierdurch wird eine deutlich bessere Materialausnutzung des Klebstoffs erreicht, wodurch eine deutlich höhere Maximalkraft zur Demontage notwendig ist. Für kritische Rissöffnungen von 0,04 und 0,1 mm lässt sich ein ähnliches Verhalten beobachten.

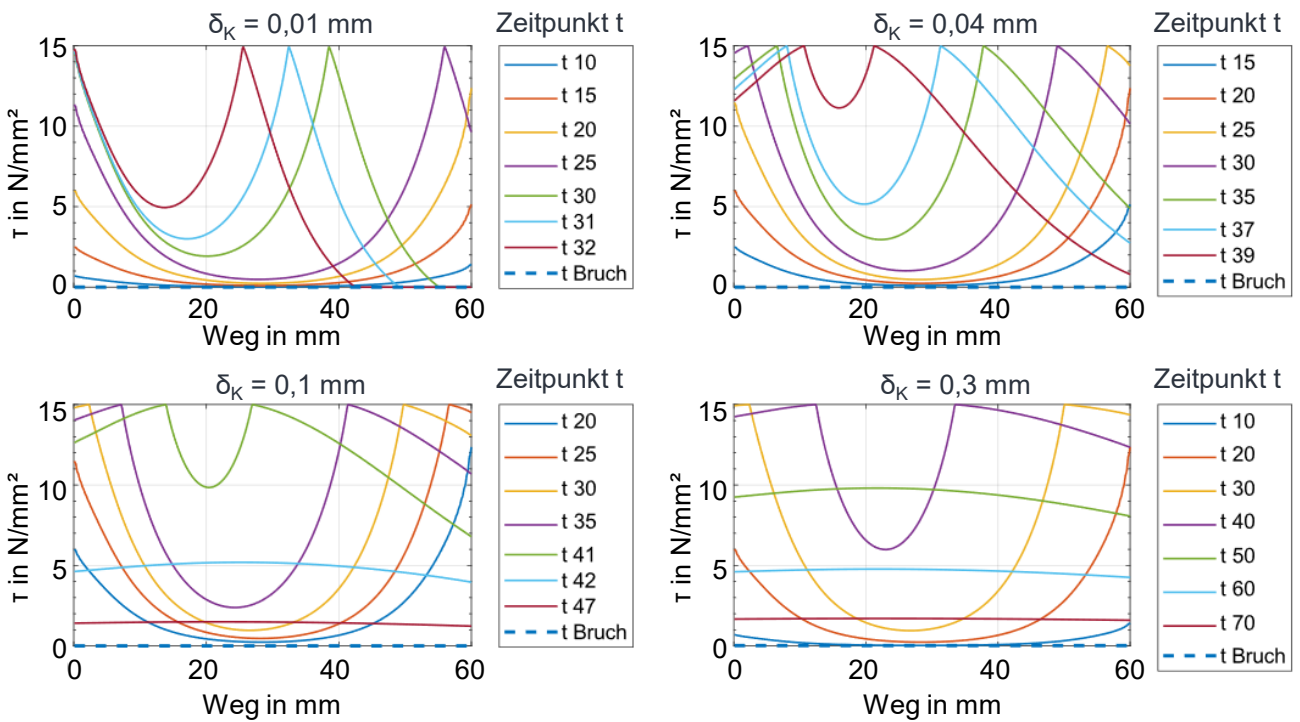
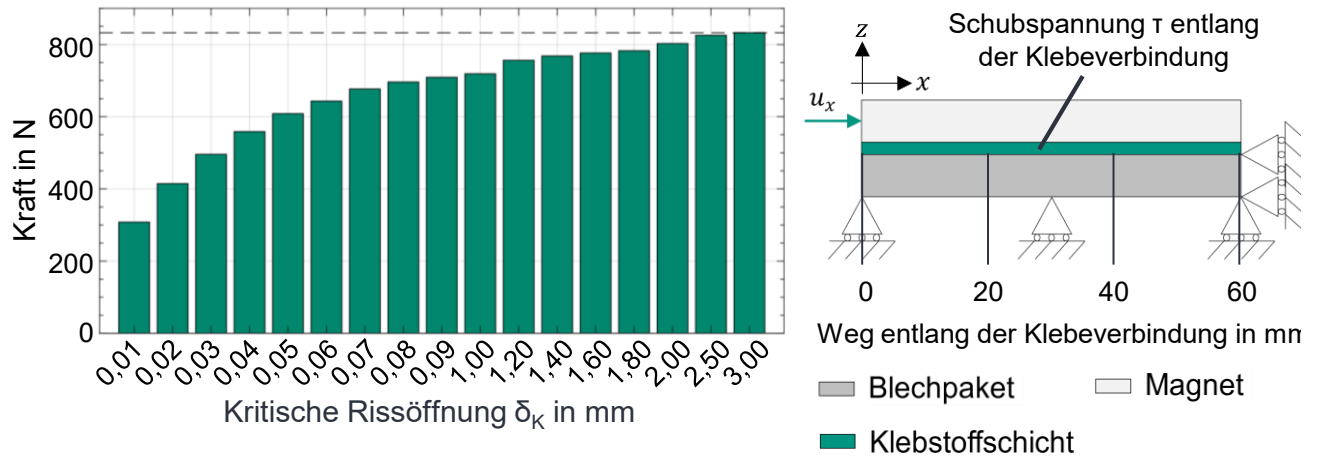


Abbildung 6-7: Einfluss der kritischen Rissöffnung auf die Demontagekraft (links oben) und Schubspannungsverteilung innerhalb der Klebeverbindung (unten) (A\_Walter 2023, S. 66–67).

Zudem ist bei allen Werten der kritischen Rissöffnung zu sehen, dass die Schubspannung nicht symmetrisch verteilt ist. Der Magnet als der steifere Fügepartner bildet früher die kritischen Spannungen ein seinem Ende bei  $x = 60$  mm aus.

**Zusammenfassung:** Die insgesamt hohe Anzahl der in der Simulation berücksichtigten Einflussfaktoren konnte auf die relevantesten reduziert werden. Die wichtigsten Einflussparameter bezüglich der Demontagekraft konnten mit Magnethöhe, Scherfestigkeit, Breite des Blechpakets und kritischer Rissöffnung identifiziert werden. Im Parameterraum im Bereich der Traktionsmotoren ist die Nichtlinearität schwach ausgeprägt. Die ungleichmäßige Schubspannungsverteilung aufgrund des Shear-Lag Effekts innerhalb der Klebeverbindung kann für die Demontage nur bedingt genutzt werden.

### 6.1.5 Schädigungsmechanismen

Nach der Untersuchung der auftretenden Demontagekräfte werden die möglichen Schädigungsmechanismen der Magnete im Demontageprozess gemäß der Belastungssituation von Abbildung 6-8 a) untersucht.

Von den möglichen Belastungsarten Zug, Druck, Biegung, Torsion und Scherung kann die Torsion beim Auspressen vernachlässigt werden. Die Scherfestigkeit der Magnete ist deutlich höher einzuordnen als die der Polymere der Magnetfixierung. Ein Versagen rein aufgrund von Scherung würde daher lediglich in der Schädigung der Magnetfixierung resultieren, was der regulären Demontage entspricht. Durch das Auspressen mittels Stempel treten Druckspannungen im Magneten auf. Der Sinterwerkstoff der Magnete besitzt gemäß Tabelle 2-2 eine Druckfestigkeit, die die Zugfestigkeit um etwa das Zehnfache übersteigt, weshalb Zugbelastungen deutlich kritischer einzustufen sind. Eine reine Zugbelastung tritt beim Demontagevorgang nicht auf, lediglich Zugbelastungen hervorgerufen durch eine Biegebelastung. Für die Biegebelastung wird die Betrachtung auf die lange Seite des Magneten beschränkt, da die Hebelarme größer sind, weshalb hier die kritischen Stellen zu finden sind. Das zuvor entwickelte Finite-Elemente-Modell kann hierfür nicht verwendet werden, da es die Breite und nicht die Länge des Magneten abbildet. Für die genaue Vorhersage von Spannungszuständen wäre ein 3D Modell erforderlich. Darüber hinaus wären komplexe Randbedingungen notwendig. Eine feste Einspannung des Magneten anstelle der Magnetfixierung würde Spannungsüberhöhungen zur Folge haben. Eine Modellierung der Magnetfixierung birgt eine sehr hohe Komplexität des Modells. Außerdem können kritische Beanspruchungen des Magneten bei einem Versagen der Magnetfixierung nicht bestimmt werden. Aus diesen Gründen werden für die Schädigungsmechanismen analytische Modelle bestimmt, die mit empirischen Werten ergänzt werden. So werden eine sehr geringe Rechenzeit und

die gleichzeitige Berücksichtigung realer Einflüsse durch die empirischen Werte ermöglicht.

Im Magneten ergeben sich daher die kritischen Lastfälle bei gegebener Belastung nach Abbildung 6-8 a). Die Druckbelastung in Abbildung 6-8 b) wird durch den Stempel hervorgerufen. An den beiden Ecken des Stempels sind aufgrund des diskontinuierlichen Kraftflusses Spannungsspitzen zu erwarten. Die Superposition von Druckbelastung und Biegebelastung führt im oberen Teil des Magneten zu einer weiteren Steigerung der dort anliegenden Druckbelastung. In diesem Fall versagt der Magnet durch Druckeinwirkung an den Ecken des Stempels. Ausschlaggebend für die Druckspannungen sind die Querschnittsfläche des Stempels sowie die maximale Demontagekraft.

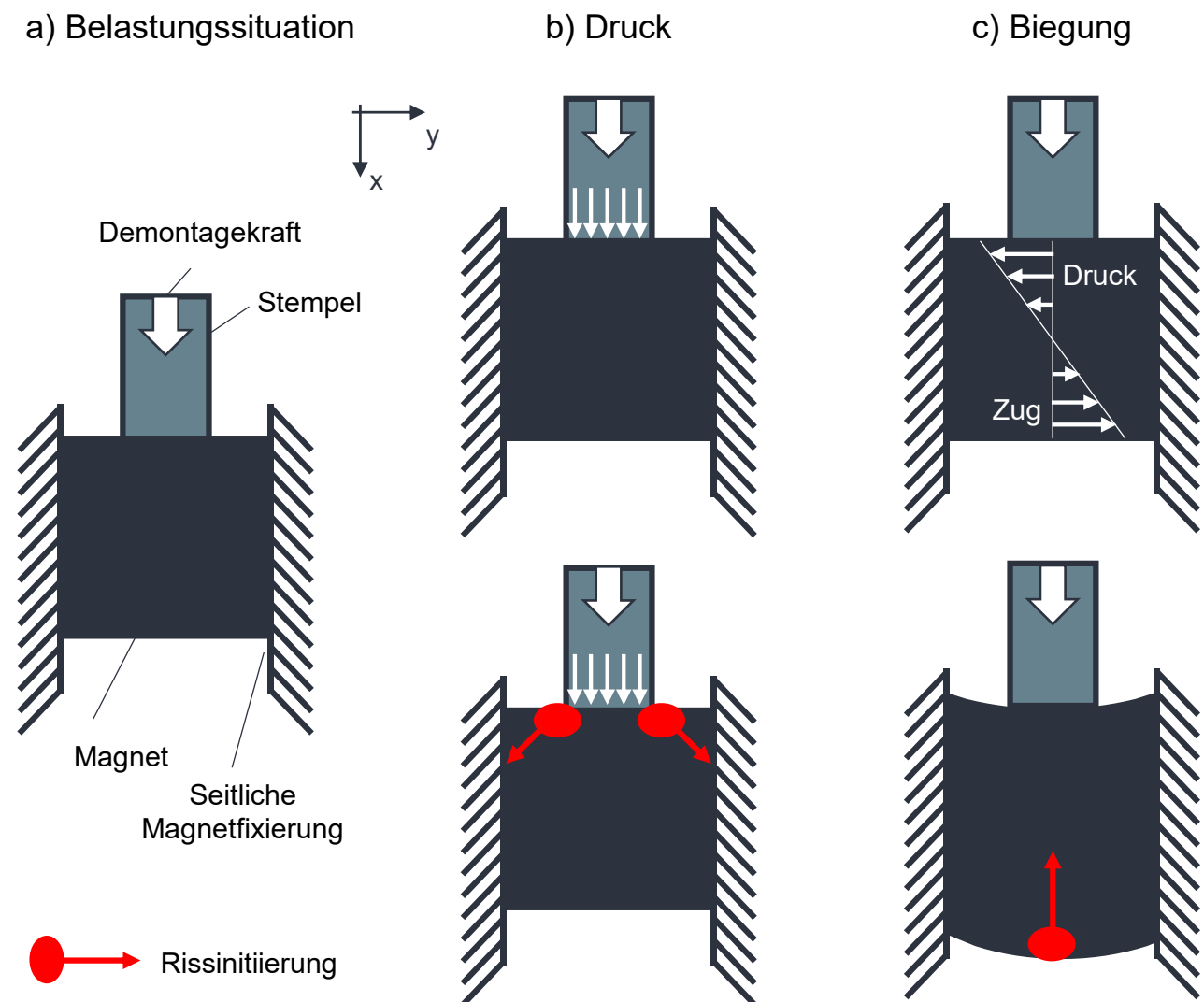


Abbildung 6-8: Schadensmechanismen bei der Demontage von stoffschlüssig fixierten Magneten.

Ein Versagen durch reine Druckbeanspruchung ist aufgrund der hohen Druckfestigkeit von NdFeB Magneten unwahrscheinlich. Unter hoher Druckbeanspruchung in

Kombination mit einer lokalen Spannungsüberhöhung kann ein Riss im Magneten an der Ecke des Stempels initiiert werden, der sich von dort schlagartig ausbreitet und zum sofortigen Versagen des Magneten führt. Der Weg des geringsten Widerstandes verläuft schräg nach außen und unten, da unter dem Stempel hohe Druckspannungen vorhanden sind, die das Risswachstum dort hemmen.

In Abbildung 6-8 c) ist die Biegebelastung dargestellt. Von den an der Oberseite des Magneten wirkenden Druckspannungen und der an der Unterseite wirkenden Zugspannungen sind die Zugspannungen als deutlich kritischer einzustufen. Typischerweise liegt im klassischen Sinne kein Biegebalken vor, da die Annahme einer deutlich größeren Länge gegenüber der Höhe nicht erfüllt ist. Der Magnet versagt unter Biegespannung mit einem Anriss in der Mitte der Unterseite des Magneten, der sich senkrecht nach oben fortsetzt. Die Spannungen sind abhängig von der Stempelbreite, die den Hebelarm bestimmt, sowie der maximalen Demontagekraft und dem Aspektverhältnis des Magneten.

#### 6.1.5.1 Druckbeanspruchung

Die Druckspannung des Magneten  $\sigma_{D, Mag}$  kann als Quotient der Demontagekraft  $F_{De}$  und der Querschnittsfläche des Stempels  $A_S$  berechnet werden. Aufgrund von ungleichmäßiger Spannungsverteilung ist ein Spannungsüberhöhungsfaktor  $K$  zu berücksichtigen:

$$\sigma_{D, Mag} = \frac{F_{De}}{A_S} * K \quad 6-2$$

Der Faktor  $K$  ist schwer zu bestimmen, da dieser von den Steifigkeiten von Stempel und Magnet und deren Verformungen abhängt. Eine starke Verformung des Magneten bei keiner Verformung des Stempels führt zu einer kontaktfreien Fläche in der Mitte des Stempels und damit zu stark überhöhten Spannungen. Selbst mit einer Finiten-Elemente-Simulation kann der Spannungsüberhöhungsfaktor schwer bestimmt werden. Daher werden empirische Werte für die Spannungsüberhöhung genutzt, welche in Kapitel 7 bestimmt werden.

Es werden die auftretenden Druckspannungen bei dem Demontageprozess für einen Magneten berechnet. Hierfür werden in Tabelle 6-4 beispielhafte Parameter für die Magnetdemontage eines elektrischen Traktionsmotors definiert.

Tabelle 6-4: Parameter für einen beispielhaften Magnetdemontageprozess.

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Demontagekraft	$F_{De}$	15	kN
Breite Magnet	$b_{Mag}$	4	mm
Länge Magnet	$l_{Mag}$	20	mm
Höhe Magnet	$h_{Mag}$	20	mm
Breite Stempel	$b_S$	3	mm
Länge Stempel	$l_S$	10	mm

Für den beispielhaften Prozess kann die auftretende Druckspannung mit Formel 6-2 berechnet werden zu:

$$\sigma_{D,Mag} = \frac{F_{De}}{A_S} * K \quad 6-3$$

$$\sigma_{D,Mag} = \frac{15 \text{ kN}}{10 \text{ mm} * 3 \text{ mm}} * K = K * 500 \text{ N/mm}^2$$

Mit einem angenommenen empirischen Spannungsüberhöhungsfaktor von 1,5 erhöht sich die Spannung auf 750 N/mm<sup>2</sup>, was im Bereich der in Kapitel 2.3.4 aufgezeigten Druckfestigkeit von NdFeB-Magneten liegt. Eine kleine Stempelfläche ist daher kritisch bezüglich der Druckbelastung, da die Spannung linear mit der Querschnittsfläche des Stempels ansteigt.

### 6.1.5.2 Biegebeanspruchung

Für die Berechnung der auftretenden Biegespannungen wird ein Biegebalken angenommen. Der notwendige Schlankheitsgrad für einen Biegebalken liegt bei Magneten in der Regel nicht vor, dennoch wird ein Biegebalken modelliert, um Grenzwerte abzuschätzen, bei denen die Biegebeanspruchung als kritisch einzustufen ist. Zunächst wird ein analytisches Ersatzsystem in Abbildung 6-9 gebildet, um die Schnittkräfte zu bestimmen.

Der Magnet als Biegebalken mit der Höhe  $h_{Mag}$  und Breite  $b_{Mag}$  wird durch den Stempel belastet. Die Stempelkraft wird als Linienlast  $q_S$  über die Breite  $l_S$  modelliert. Dabei ergibt die Multiplikation der Linienlast  $q_S$  und der Stempellänge  $l_S$  die Demontagekraft  $F_{De}$ . Über die Länge des Magneten  $l_{Mag}$  wirkt die Haltekraft  $q_h$ , die den Klebstoff an der langen Seite des Magneten darstellt. Am linken und rechten Ende des Magneten wirken an dessen Kante die zusätzlichen Haltekraften  $F_1$  und  $F_2$  durch den Klebstoff an der kurzen Seite des Magneten. Die beiden Seiten des Magneten werden als momentfrei

angenommen, da die Querschnittsflächen des Klebstoffs identisch mit dem des Magneten sind. Die Werkstoffeigenschaften des Klebstoffs sind denen des Magneten aber bei weitem unterlegen, sodass der Klebstoff nicht in der Lage ist eine Durchbiegung des Magneten an dessen Rändern zu verhindern.

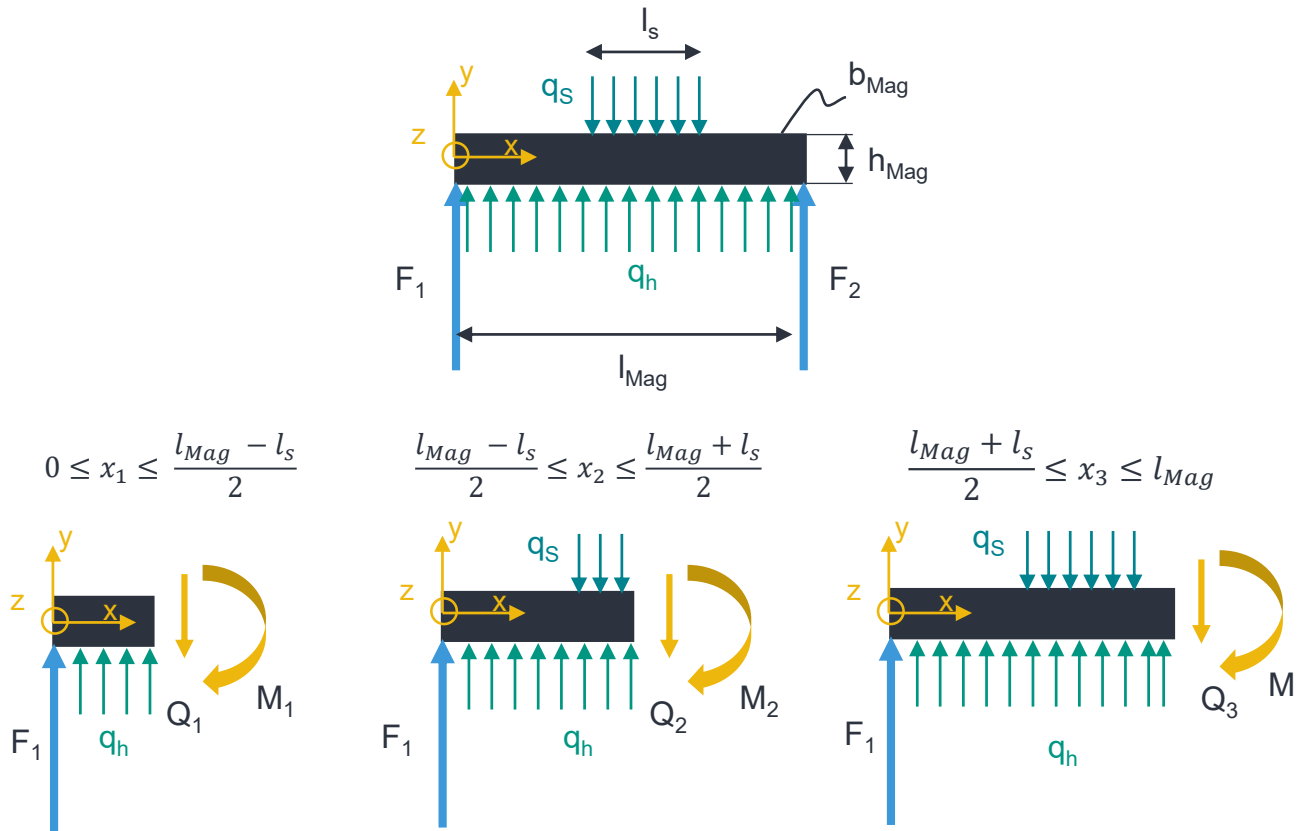


Abbildung 6-9: Analytisches Ersatzsystem eines Magneten unter Biegebeanspruchung.

Durch die Symmetrie können  $F_1$  und  $F_2$  mit Formel 6-4 berechnet werden.

$$F_1 = F_2 = \frac{q_s l_s - q_h l_{Mag}}{2} \tag{6-4}$$

Die Querkräfte und Biegemomente werden gemäß Abbildung 6-9 aus dem Freischnitt abgeleitet zu:

Abschnitt 1 mit  $0 \leq x \leq \frac{l_{Mag} - l_s}{2}$

$$Q_1 = F_1 + q_h x$$

$$M_1 = -F_1 x - \frac{1}{2} q_h x^2 + C_1$$

Abschnitt 2 mit  $\frac{l_{Mag} - l_s}{2} \leq x \leq \frac{l_{Mag} + l_s}{2}$

$$Q_2 = F_1 + q_h x - q_s \left( x - \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right) \quad 6-5$$

$$M_2 = -F_1 x - \frac{1}{2} q_h x^2 + \frac{1}{2} q_s \left( x - \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right)^2 + C_2$$

Abschnitt 3 mit  $\frac{l_{Mag} + l_s}{2} \leq x \leq l_{Mag}$

$$Q_3 = F_1 + q_h x - q_s l_s$$

$$M_3 = -F_1 x - \frac{1}{2} q_h x^2 + q_s l_s \left( x - \frac{l_{Mag}}{2} \right) + C_3$$

Die Konstante C des Biegemoments wird mit der Randbedingung der momentenfreien Einspannungen  $M_1(0) = 0$  und  $M_3(l_{Mag}) = 0$  bestimmt.

Damit ergibt sich für Bereich 1:

$$M_1(0) = 0 = C_1 \quad 6-6$$

Mit der Übergangsbedingung eines stetigen Momentenverlaufs gilt für Bereich 2:

$$M_1 \left( \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right) = M_2 \left( \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right)$$

$$-F_1 \frac{l_{Mag} - l_s}{2} - \frac{1}{2} q_h \left( \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right)^2 = -F_1 \left( \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right) - \frac{1}{2} q_h \left( \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right)^2 + C_2 \quad 6-7$$

$$0 = C_2$$

Für Bereich 3 ergibt sich:

$$M_3(l_{Mag}) = 0 = -F_1 l_{Mag} - \frac{1}{2} q_h l_{Mag}^2 + q_s l_s \left( l_{Mag} - \frac{l_{Mag}}{2} \right) + C_3 \quad 6-8$$

$$C_3 = F_1 l_{Mag} + \frac{1}{2} q_h l_{Mag}^2 - \frac{1}{2} q_s l_s l_{Mag}$$

Die maximale Biegespannung liegt an der Unterseite des Magneten genau in der Mitte an. Hierfür wird das Biegemoment für  $x = l_{Mag}/2$  berechnet:

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -F_1 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) - \frac{1}{2} q_h \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} q_s \left( \frac{l_{Mag}}{2} - \frac{l_{Mag} - l_s}{2} \right)^2 \quad 6-9$$

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -F_1 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) - \frac{1}{8} (q_h l_{Mag}^2 - q_s l_s^2)$$

$F_1$  wird mit Formel 6-4 ersetzt:

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -F_1 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) - \frac{1}{8} (q_h l_{Mag}^2 - q_s l_s^2) \quad 6-10$$

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = l_{Mag} \frac{q_h l_{Mag} - q_s l_s}{4} - \frac{1}{8} (q_h l_{Mag}^2 - q_s l_s^2)$$

Es wird angenommen, dass die Klebewirkung gleichmäßig über den Umfang des Magneten verteilt ist. Hierdurch lässt sich die Haltekraft am Rand des Magneten  $F_1$  und  $F_2$  durch  $q_s$  und  $l_s$  sowie dem Verhältnis der langen Seite des Magneten  $l_{Mag}$  zur Breite  $b_{Mag}$  des Magneten darstellen mit:

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -F_1 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) - \frac{1}{8} (q_h l_{Mag}^2 - q_s l_s^2)$$

$$F_1 = \frac{1}{2} q_s l_s \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} \right) \quad 6-11$$

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -\frac{1}{4} q_s l_s l_{Mag} * \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} \right) - \frac{1}{8} (q_h l_{Mag}^2 - q_s l_s^2)$$

Mit der gleichen Annahme der gleichmäßigen Klebewirkung kann die Haltekraft  $q_H$  des Magneten ebenfalls durch  $q_s$  und  $l_s$  ersetzt werden:

$$q_h l_{Mag} = q_s l_s * \left( 1 - \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} \right)$$

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -\frac{1}{4} q_s l_s l_{Mag} * \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} \right) - \frac{1}{8} \left[ l_{Mag} q_s l_s * \left( 1 - \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} \right) - q_s l_s^2 \right] \quad 6-12$$

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -\frac{1}{8} q_s l_s * \left[ l_{Mag} \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} + 1 \right) - l_s \right]$$

Geht man von einer Demontagekraft  $F_{De}$  aus, die als  $q_s * l_s$  beschrieben wird und ersetzt damit  $q_s$  erhält man eine Formel für das maximale Biegemoment, die lediglich von der Demontagekraft sowie den Geometrieparametern abhängt:

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -\frac{1}{8} q_s l_s * \left[ l_{Mag} \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} + 1 \right) - l_s \right]$$

$$q_s = \frac{F_{De}}{l_s} \quad 6-13$$

$$M_2 \left( \frac{l_{Mag}}{2} \right) = -\frac{1}{8} F_{De} * \left[ l_{Mag} \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} + 1 \right) - l_s \right]$$

Berechnet man anschließend die auftretende Biegespannung an der Unterseite des Magneten mit  $y = -h_{Mag}/2$  von der Mitte des Magneten entfernt erhält man:

$$\sigma_{B,Mag} = M * \frac{y}{I_{Mag}}$$

$$I_{Mag} = \frac{b_{Mag} h_{Mag}^3}{12}$$

$$\sigma_{B,Mag} = -M * \frac{6}{b_{Mag} h_{Mag}^2} \quad 6-14$$

$$\sigma_{B,Mag} = -\frac{6}{b_{Mag} h_{Mag}^2} \left( -\frac{1}{8} F_{De} * \left[ l_{Mag} \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} + 1 \right) - l_s \right] \right)$$

$$\sigma_{B,Mag} = \frac{3 F_{De}}{4 b_{Mag} h_{Mag}^2} \left[ l_{Mag} \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag} + b_{Mag}} + 1 \right) - l_s \right]$$

Für die maximale Biegespannung besteht ein linearer Einfluss bezüglich Magnetlänge  $l_{Mag}$ , Stempellänge  $l_s$  und der Magnetbreite  $b_{Mag}$  sowie ein quadratischer bezüglich der Magnethöhe  $h_{Mag}$ .

Die produktseitigen Einflüsse mit quadratischer Höhe und linearer Breite und Länge sind dem prozessseitigen mit linearem Einfluss der Stempellänge stark überlegen.

Betrachtet man nun einen Demontageprozess mit den Parametern des Beispielmagneten von Tabelle 6-4 ergibt sich die Biegespannung zu:

$$\sigma_{B,Mag} = \frac{3F_{De}}{4b_{Mag}h_{Mag}^2} \left[ l_{Mag} \left( \frac{b_{Mag}}{l_{Mag}+b_{Mag}} + 1 \right) - l_s \right]$$

$$\sigma_{B,Mag} = \frac{3 * 15 \text{ kN}}{4 * 4 \text{ mm} * 20^2 \text{ mm}^2} \left[ 20 \text{ mm} \left( \frac{4 \text{ mm}}{20 \text{ mm} + 4 \text{ mm}} + 1 \right) - 10 \text{ mm} \right] \quad 6-15$$

$$\sigma_{B,Mag} = 93,75 \text{ N/mm}^2$$

Mit einer typischen Biegespannung von NdFeB-Magneten von über 180 N/mm<sup>2</sup> aus Tabelle 2-2 ist die Belastung in diesem Fall nicht kritisch.

**Zusammenfassung:** Schadenskritische Beanspruchungen bei der Magnetdemontage stellen bei stoffschlüssigen Verbindungen Druckbeanspruchungen und Biegebeanspruchungen dar. Bei der Druckbeanspruchung ist der Spannungsüberhöhungsfaktor von großer Bedeutung. Dessen Wert gilt es empirisch zu bestimmen. Bei der Biegebeanspruchung geht die Höhe des Magneten im Nenner quadratisch ein. Daher sind insbesondere Magnete mit geringer Höhe für eine Biegebelastungen kritisch. Ein Stempel mit kürzerer Breite wirkt sich mit linearem Einfluss nachteilig auf Druck- sowie Biegebeanspruchung aus. In Abhängigkeit des empirischen Wertes der Spannungsüberhöhung kann dieser Faktor zusätzlich durch die Breite des Stempels beeinflusst werden. Es verbleibt der Zielkonflikt zwischen der Stempelgröße und Flexibilität des Magnetdemontageprozesses.

## 6.2 Kraftschlüssige Fixierung

### 6.2.1 Federnase

Die Fixierwirkung der Federnase und damit die zu erwartenden Demontagekräfte können analytisch mittels eines Biegebalkens abgeschätzt werden. Zur Abschätzung wird ein Biegebalken mit fester Einspannung betrachtet, der in Abbildung 6-10 dargestellt ist. Die feste Einspannung der Federnase befindet sich an der Position, an der die Federnase durch die darunterliegenden Blechschnitte abgestützt wird.

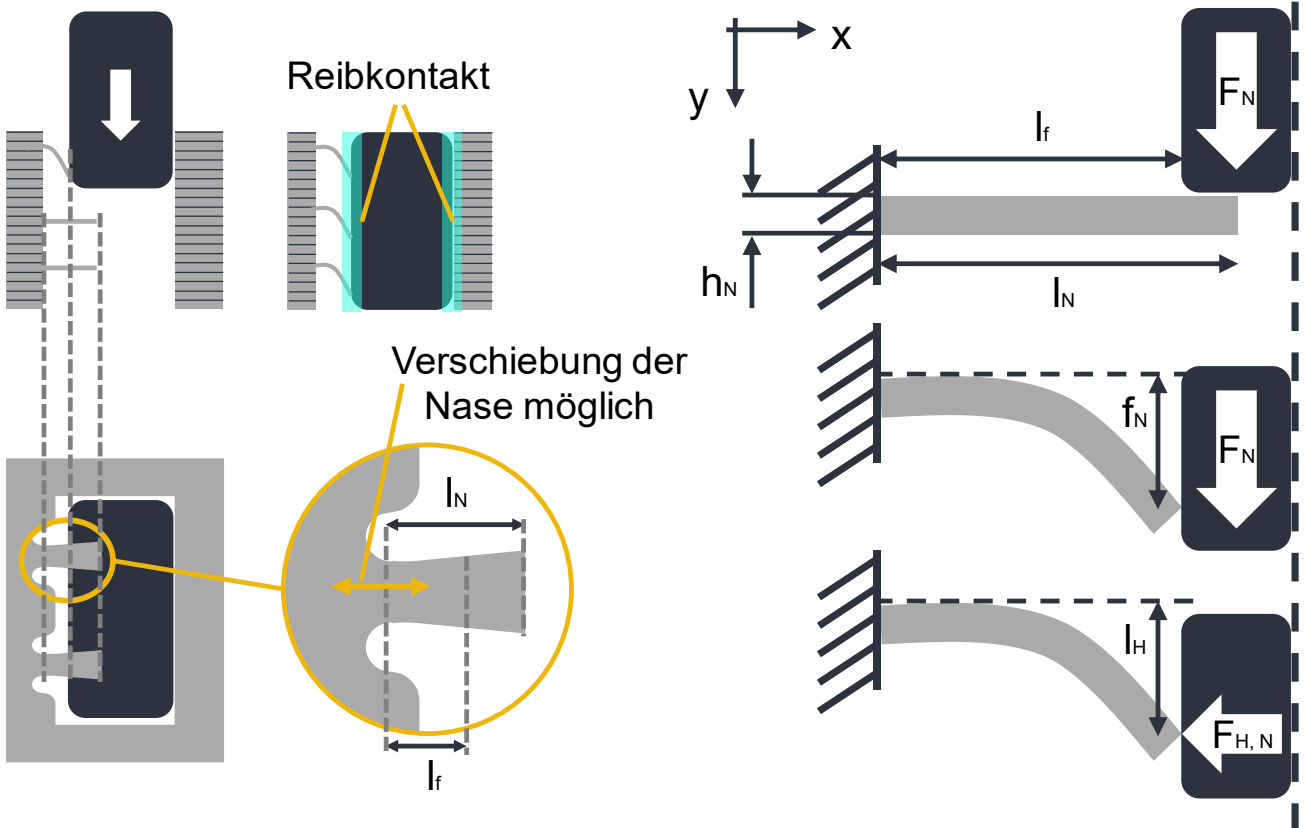


Abbildung 6-10: Analytische Abschätzung der Fixierwirkung von Federnasen Magnetfixierungen mittels Biegebalken.

Bei einer gegebenen Durchbiegung  $f_N$  lässt sich die Montagekraft einer Federnase  $F_N$  mit der Formel 6-16 für ideal elastisches Materialverhalten berechnen (Gross et al. 2014, S. 120).

$$F_N = \frac{3f_N E_N I_N}{l_f^3} \quad 6-16$$

Hierbei steht  $I_N$  für das Flächenträgheitsmoment,  $E_N$  für das E-Modul und  $l_f$  für die freie Nasenlänge, die den effektiven Hebelarm abbildet. Bei einem rechteckigen Balkenquerschnitt mit der Höhe  $h_N$  (Blechstärke) und Breite  $b_N$  ergibt sich die Kraft  $F_N$  zu:

$$F_N = \frac{f_N E_N b_N h_N^3}{4l_f^3} \quad 6-17$$

Da das Blechmaterial in der Regel basierend auf elektromagnetischen Eigenschaften des Rotors ausgewählt wird, sind lediglich die geometrischen Parameter einstellbar. Hierbei ist zu erkennen, dass die Biegelänge  $l_N$  sowie die Blechstärke  $b_N$  mit dritter Potenz in die Berechnung eingehen und somit den größten Einfluss aufweisen.

Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen stellt dies nur eine Annäherung dar. Bei den großen auftretenden Verformungen treten geometrische Nichtlinearitäten sowie elastisch-plastisches Materialverhalten auf. Die Federnase kann innerhalb des Blechpakets verschoben werden, dargestellt in Abbildung 6-10 unten links. So können die Gestaltungsmöglichkeiten durch die Wahl von  $l_N$  sowie  $l_f$  erweitert werden.

Bisher wurde die axiale Kraft zum Umformen der Federnasen während der Montage betrachtet. Die Fixierwirkung wird jedoch durch die Kraft  $F_{H,N}$  senkrecht zur Einpressrichtung erzielt. Zur Abschätzung der Fixierkräfte wird der plastische Anteil ignoriert und ein Biegebalken in anderer Orientierung in Abbildung 6-10 rechts unten betrachtet. Hier lässt sich ebenfalls Formel 6-17 anwenden, sodass die Blechstärke  $b_N$  und die Biege­länge  $l_H$  in dritter Potenz den größten Einfluss darstellen.

Die bisherigen Berechnungen wurden unter der Annahme einer Federnase mit konstantem Querschnitt durchgeführt. Durch beispielsweise eine konisch zulaufende Federnase kann die Materialausnutzung der Biegefeder gesteigert werden. Gleichzeitig wird dadurch die Kontaktfläche mit dem Magneten verringert, was zu Beschädigungen der Magnetbeschichtung durch eine höhere Flächenpressung führen kann.

Die Berechnung der Gesamthalte­kraft der Federnasen  $F_{N,ges}$  erfolgt durch die Multiplikation der Halte­kraft der einzelnen Federnase  $F_N$  mit der Anzahl  $n_N$  der Federnasen im Blechpaket. Aufgrund von zwei Reibkontakten zwischen Federnase und Magnet sowie Magnet und Blechpaket wird dieser Wert mit den beiden Reibkoeffizienten multipliziert. Bei gleichem Reibkoeffizienten  $\mu_N$  der beiden Kontakte ergibt sich dadurch:

$$F_{N,ges} = 2 * F_N * n_N * \mu_N \quad 6-18$$

In Abbildung 6-11 wird ersichtlich, dass eine große Federnasenlänge  $l_N$  zu einer großen Länge von  $l_H$  führt, was einem großen Hebelarm in Halterichtung entspricht. Dies führt zu einer geringen Halte­kraft. Bei einer geringen freien Länge drückt der Magnet die Federnase weiter nach unten, was ebenfalls zu einem größeren Hebelarm und damit zu einer verringerten Halte­kraft führt. Gleichzeitig wird durch einen großen Hebelarm  $l_H$  die Anzahl der Nasen auf dem gegebenen Bauraum begrenzt. Zusätzlich muss beachtet werden, dass größere Umformungen zu einer Schädigung des Materials führen können, wodurch die Halte­kraft verringert wird.

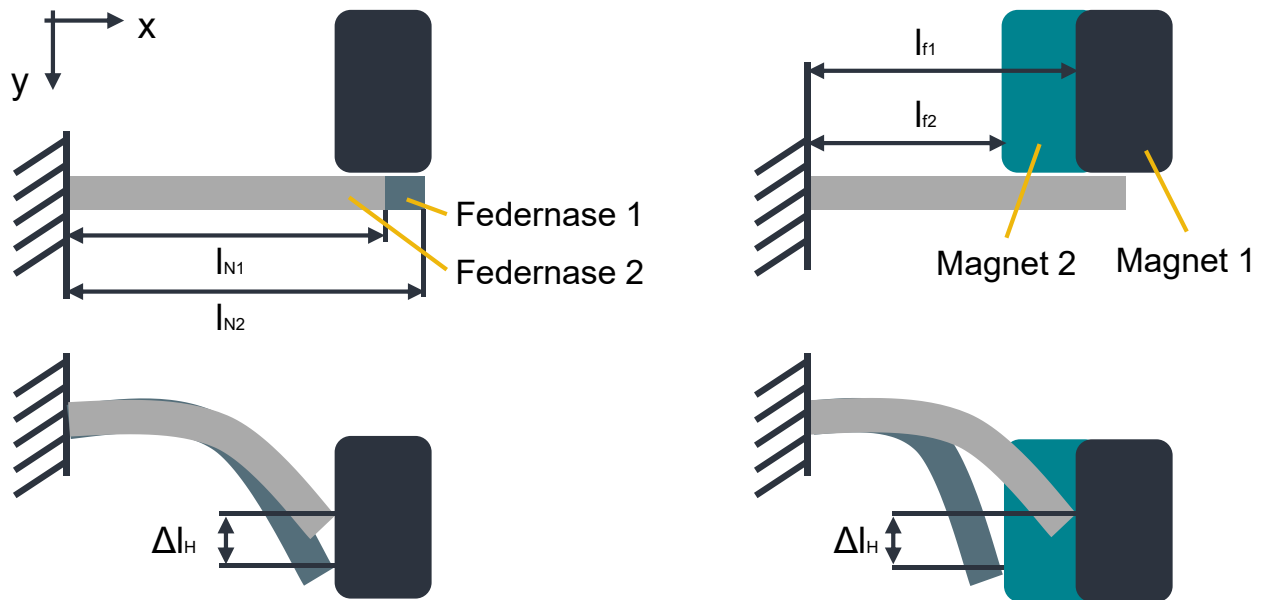


Abbildung 6-11: Qualitativer Einfluss der Geometrieparameter für die Magnetfixierung mittels Federnase.

### 6.2.1.1 Simulation Federnase

Die im vorausgehenden Kapitel betrachteten Einflussparameter der Federnasen und deren Analyse stellen lediglich eine Abschätzung dar. In einer Finiten-Elemente-Simulation werden die Einflüsse detailliert betrachtet, um eine quantitative Bewertung zu ermöglichen. Zudem können Toleranzen der Verbindung berücksichtigt werden.

### 6.2.1.2 Modellaufbau

Zunächst werden für das Finite-Elemente-Modell Vereinfachungen vorgenommen. Es wird ein 3D-Modell erstellt, da die dreidimensionale Gestalt der Federnase nur so hinreichend genau abgebildet werden kann. Die im Vergleich zum Magneten filigranen Federnasen werden als deformierbare Körper und der Magnet als Starrkörper modelliert. Alle Federnasen weisen die gleiche Funktionsweise auf, weshalb lediglich eine modelliert wird. Aufgrund der Symmetrie wird zur Steigerung der Recheneffizienz die Hälfte der Nase modelliert. Die Geometrie der Federnase ist in Abbildung 6-12 rechts dargestellt. Die Federnase ist an deren Ende am Blechpaket an ihrer Querschnittsfläche fest eingespannt gemäß Abbildung 6-12.

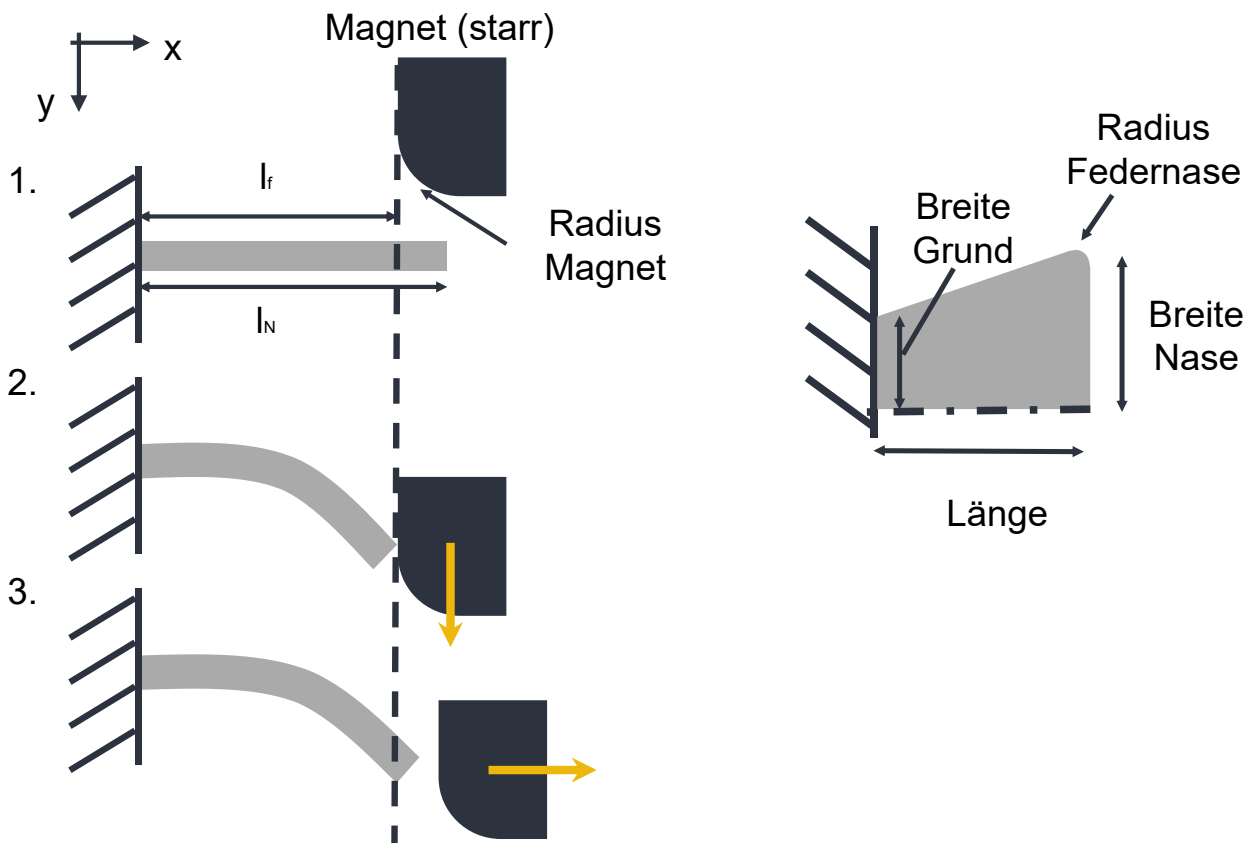


Abbildung 6-12: Schematische Darstellung der Simulation der Federnase.

Die Demontagekräfte werden basierend auf den Anpresskräften des Magneten in  $x$ -Richtung berechnet. Hierfür wird die Montage simuliert, indem bei Schritt 2 der Magnet in  $y$ -Richtung eingeschoben wird. Anschließend wird der Magnet in Schritt 3 in positive  $x$ -Richtung verschoben, für die Analyse der Auswirkung von Toleranzen in  $x$ -Richtung. Die Reaktionskräfte am Magneten in  $x$ - und  $y$ -Richtung werden ausgewertet. Die Reibung zwischen Magnet und Federblech wird in der Simulation vernachlässigt.

Die Magnetfixierung mittels Federnase nutzt das Blechmaterial als Feder. In der Regel werden von Elektroblechherstellern lediglich Mindestwerte der Werkstoffeigenschaften angegeben, welche aufgrund des Walzprozesses anisotrop sind (Waelzholz 2023, S. 6). Die Federnasen sind in beliebiger Orientierung im Blechpaket angeordnet, was eine Streuung der Werkstoffeigenschaften der verschiedenen Federnasen zur Folge hat. Die Verdrehung der einzelnen Bleche während der Herstellung wirkt dem entgegen, weshalb für die einzelnen Taschen vergleichbare Kräfte zu erwarten sind. Für möglichst genaue Simulationsergebnisse werden die Mittelwerte der Werkstoffeigenschaften entlang und quer zur Walzrichtung verwendet. Die Werkstoffdaten sind in Tabelle 6-5 aufgelistet.

Tabelle 6-5: Werkstoffparameter für Elektroblech (Bode 2019, S. 56–57).

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
E-Modul	$E_{BP}$	190.512	MPa
Streckgrenze	$R_{e, BP}$	420,0	MPa
Zugfestigkeit	$R_{m, BP}$	534,7	MPa
Bruchdehnung	$A_{BP}$	18	%
Dehnung bei Bruch	$\epsilon_{B, BP}$	22	%
Querkontraktion	$V_{BP}$	0,30	-

Es wird ein elastisch-plastisches Materialmodell mit duktilem, linearem Versagensverhalten auf Basis einer angenäherten Fließkurve verwendet. Es werden C3D8R (engl. continuum 3D, 8 knots, reduced integration) Elemente sowie ein dynamisch impliziter Solver aufgrund der hohen zu erwartenden Nichtlinearitäten durch große Verformungen eingesetzt. Eine Konvergenzstudie mit Elementgrößen von 0,1 bis 0,015 mm zeigt, dass ab einer Elementgröße von 0,03 mm die maximale Montagekraft konvergiert und daher für die weiteren Untersuchungen genutzt wird.

### 6.2.1.3 Prozesscharakterisierung

Zunächst wird der Montage- und Demontageprozess anhand einer beispielhaften Simulation charakterisiert. Hierfür werden die Kraft-Weg-Verläufe in x- und y-Richtung betrachtet. Die Montagekräfte in Abbildung 6-13 in y-Richtung steigen zunächst steil an, bis das Maximum erreicht wird, anschließend nimmt die Kraft aufgrund der Materialschädigung ab. Sobald die Federnase an der Seite des Magneten anliegt, beträgt die Kraft bei b) in Abbildung 6-13 null, da keine Reibung modelliert ist. In x-Richtung steigt die Kraft an, bis es bei a) in Abbildung 6-13 zu einer kleinen Delle kommt. Hierbei kommt die Kante der Federnase mit dem Magneten in Kontakt und wird deformiert, dies ist auf der rechten Seite von Abbildung 6-13 dargestellt. Sobald die Federnase an der Kante des Magneten anliegt, bleibt die Kraft konstant. Durch die Montage kommt es zu hohen Dehnungen und einer sehr starken Beanspruchung des Materials insbesondere im Bereich an der Einspannung.

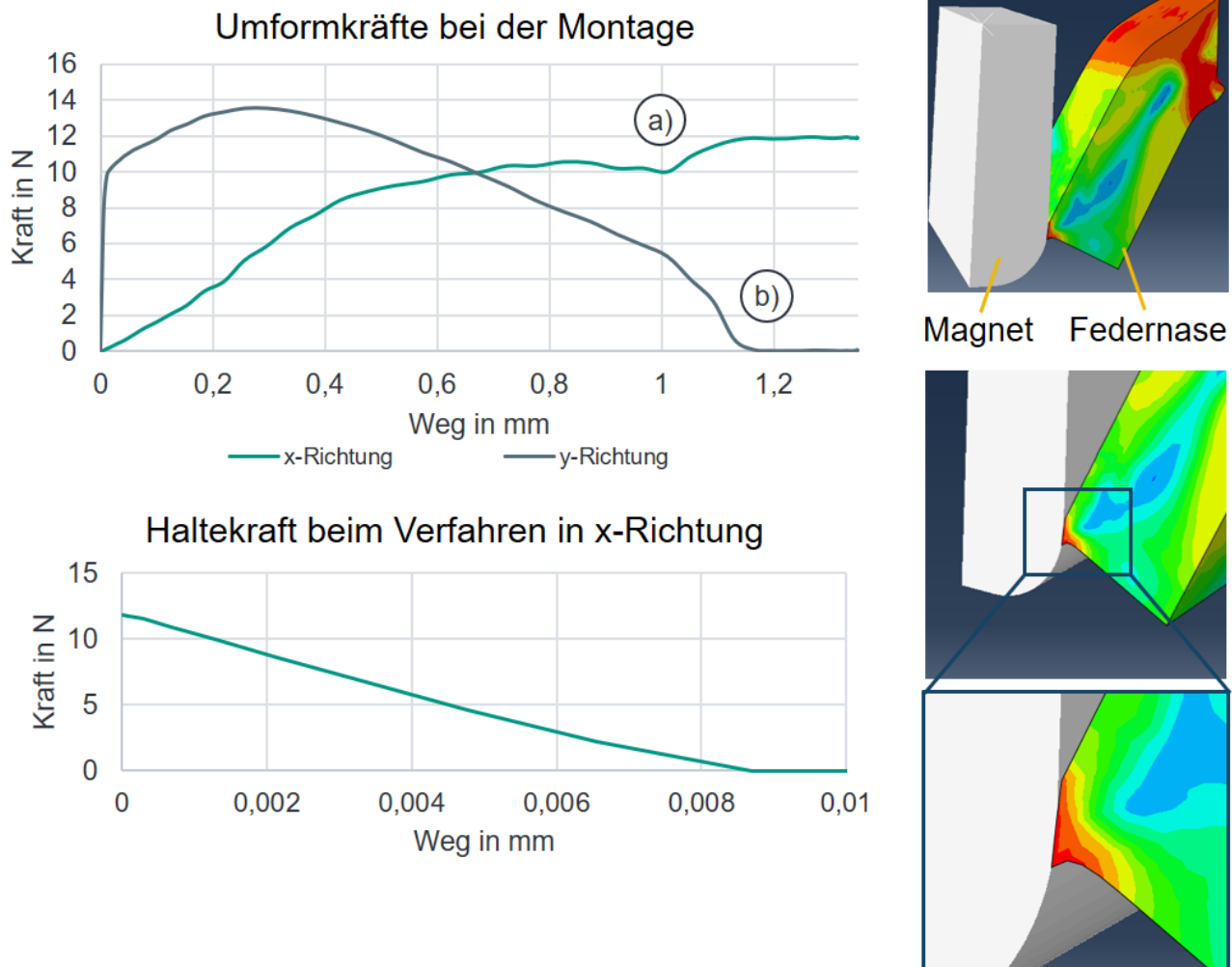


Abbildung 6-13: Kraft-Weg-Verlauf der Simulation einer beispielhaften Federnase.

Die Haltekraft beim Verfahren in x-Richtung nimmt linear mit dem Weg ab. Der Startwert ist identisch zur Haltekraft nach der Montage in x-Richtung. Bereits ab einer Verschiebung von unter 0,01 mm liegt keine Haltekraft mehr vor. Die Fixierung ist damit sehr sensitiv gegenüber Toleranzen in x-Richtung. In y-Richtung beträgt die Kraft in diesem Schritt konstant null.

#### 6.2.1.4 Parameterstudie

Die wichtigsten Einflussparameter der Magnetfixierung mittels Federnase stellen nach der bisherigen Betrachtung die geometrischen Abmessungen, die Anzahl und der Elektroblechwerkstoff dar. Da das Blechmaterial als gegeben betrachtet werden kann und die Anzahl der Federnasen einfach berechnet werden kann, beschränkt sich die Simulationsreihe auf die geometrischen Abmessungen der individuellen Nasen. Die Radien der Abmessungen sind in der Regel fertigungstechnisch bedingte

Mindestradien und werden nicht explizit untersucht. Die Verformung der Federnase beschränkt sich auf einen kleinen Bereich nahe der Einspannung. Daher werden lediglich Federnasen mit konstanter Breite untersucht, da die Breite nahe der Einspannung entscheidend ist. Für die Breite der Nasen kann eine annähernd lineare Skalierung zur Reduktion der zu untersuchenden Parameter angenommen werden. Die betrachteten Parameter sind daher die Länge der Federnase sowie die freie Länge. Das Minimum der freien Länge wird bei der Blechstärke von 0,35 mm auf 0,6 mm festgelegt, damit abzüglich der Blechstärke ein Minimum von 0,25 mm Luftspalt zwischen Magnet, Federnase und Blechpaket vorhanden ist. Das Maximum der freien Länge wird um 0,2 mm geringer als die Länge der Federnase definiert. Die Länge wird von 0,8 bis 1,3 mm festgelegt, wodurch die Parameterkombinationen in Tabelle 6-6 möglich sind.

Tabelle 6-6: Parameterkombinationen für die Simulationen mit Federnase.

		Länge in mm					
		0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
Freie Länge in mm	0,6	x	x	x	x	x	x
	0,7		x	x	x	x	x
	0,8			x	x	x	x
	0,9				x	x	x
	1,0					x	x
	1,1						x

Das zuvor erstellte Modell wird parametrisiert. Mit den Werkstoffparametern von Tabelle 6-5 und den Parameterkombinationen aus Tabelle 6-6 werden 21 Simulationen durchgeführt. Auszuwertende Parameter werden auf Basis der Prozesscharakterisierung ausgewählt:

1. Maximale Montagekraft
  - Maximal auftretende Reaktionskraft in Montagerichtung
2. Haltekraft Magnet
  - In y-Richtung wirkende Reaktionskraft nach der Montage des Magneten
3. Toleranz für 50% Haltekraft
  - Weg in y-Richtung, bei dem die Haltekraft des Magneten um 50% absinkt

Die maximale Montagekraft sowie die Haltekraft des Magneten können direkt aus dem Kraft-Weg-Verlauf extrahiert werden. Es werden 50 % der Haltekraft und nicht etwa 0 % der Haltekraft gewählt, da dieser Wert exakt aus den Simulationsergebnissen extrahiert werden kann. Der linear verlaufende Kraftabfall der Haltekraft bei einer Verschiebung

des Magneten in y-Richtung im letzten Simulationsschritt ermöglicht eine präzise Interpolation der Kraft-Weg-Kurve zur exakten Ermittlung des Toleranzwertes. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 6-14 dargestellt.

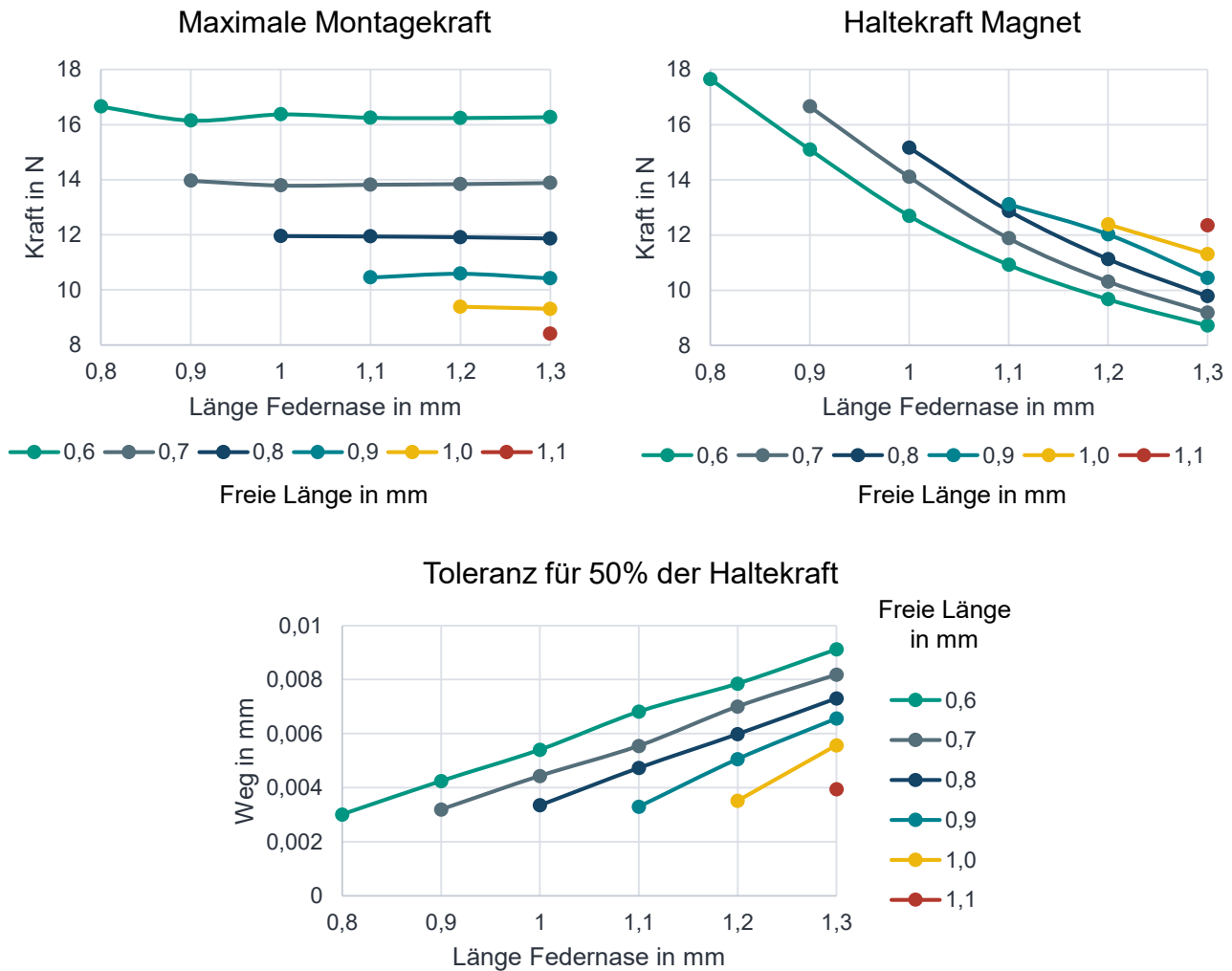


Abbildung 6-14: Ergebnisse der Simulation zu Parameterstudien der Federnasen.

Die maximale Montagekraft ist nahezu unabhängig von der Länge der Federnase und stark abhängig von der freien Länge. Mit der Annahme, dass das maximale Biegemoment aufgrund der auftretenden Plastifizierung bei allen Parameterkombinationen annähernd gleich ist, steigt die Montagekraft aufgrund des verringerten Hebelarms bei verringerter freier Länge während bei unterschiedlicher Länge die Kraft gleichbleibt.

Die Haltekraft nimmt mit zunehmender Nasenlänge und geringerer freier Länge ab. Eine größere Nasenlänge erhöht den Hebelarm gegenüber der Halterichtung, wodurch bei annähernd konstantem Biegemoment die Haltekraft reduziert wird. Eine verkürzte freie Länge verkürzt ebenfalls den Hebelarm, allerdings ist hier bereits von einer

Materialschädigung auszugehen, wodurch die Haltekraft abnimmt. Der Effekt ist weniger stark ausgeprägt im Vergleich zur Federlänge.

Die Toleranz für 50% der Haltekraft verhält sich linear bezüglich der Nasenlänge. Eine größere Länge steigert den Toleranzweg, da die Rückfederung durch den längeren Hebelarm einen größeren Weg zurücklegen kann. Eine erhöhte freie Länge reduziert die Rückfederung, da der Hebelarm der Nase reduziert wird. Die Untersuchungen zeigen, dass die Rückfederung lediglich eine sehr geringe Toleranz aufweist. Daher ist aufgrund der Fertigungstoleranzen eine Streuung der Haltekraft des Magneten zu erwarten. Zudem entsteht ein Zielkonflikt bezüglich der Haltekraft und der Toleranz. Ein toleranzfreundliches Design besitzt eine große Nasenlänge sowie eine geringe freie Länge. Ein solches Design limitiert die Haltekraft der einzelnen Federnasen sowie die Anzahl der Nasen übereinander in dem zur Verfügung stehenden Bauraum.

**Zusammenfassung:** Die Demontagekräfte werden maßgeblich von der freien Länge, Nasenlänge, Breite, Blechstärke und Anzahl der Nasen bestimmt. Die Fixierwirkung ist äußerst sensitiv gegenüber Toleranzen bezüglich der Magnettaschenbreite. Eine größere Nasenlänge und freie Länge bieten ein toleranzfreundlicheres Design, während gleichzeitig die Haltekraft reduziert ist.

## 6.2.2 Federblech

Analog zur Magnetfixierung mittels Federnase können beim Federblech die Fixierkräfte mittels eines Biegebalkens und Formel 6-17 abgeschätzt werden. Die Blechstärke und Biegelänge, welche der halben Wellenlänge entspricht, besitzen mit dritter Potenz den größten Einfluss. Da bei geringer Länge mehr Wellen auf dem gegebenen Bauraum untergebracht werden können, fließt die Wellenlänge in vierter Potenz in die Berechnung ein. Daneben muss die Amplitude eine ausreichende Höhe aufweisen, damit die Fixierwirkung aufgebracht werden kann. Bei der Breite sowie dem E-Modul des Federblechs kann ein linearer Einfluss angenommen werden. Eine detaillierte Untersuchung der Federblechfixierung ist analog zur Federnase lediglich in einem Finite-Elemente-Modell möglich. Ergebnisse zur simulativen Untersuchung des Federblechs sind bereits in (Heim et al. 2023a) veröffentlicht.

### 6.2.2.1 Modellaufbau

Die Simulation der Magnetfixierungskräfte erfolgt durch die Berechnung der statischen Haltekkräfte des Federblechs. Da bei dem Demontageprozess keine relevanten

dynamischen Kräfte zu erwarten sind, werden dynamische Effekte vernachlässigt. Die Demontagekräfte  $F_{De}$  werden als Produkt von Haltekräften  $F_{Fb,ges}$  und Reibkoeffizient  $\mu_{Fb}$  berechnet. Aufgrund der beiden Reibkontakte zwischen Federblech und Magneten sowie Magnet und Blechpaket werden analog zur Federnase zwei Reibkontakte ausgebildet. Es wird zweimal von einem identischen Reibkoeffizienten  $\mu_{Fb}$  ausgegangen. Damit ergibt sich Formel 6-19:

$$F_{De} = 2 * F_{Fb,ges} * \mu_{Fb} \quad 6-19$$

Aufgrund der gegebenen Symmetrie wird eine zweidimensionale, halbe Wellenlänge des Federblechs mit den in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Parametern Wellenlänge, Blechstärke und Amplitude implementiert. Aus Symmetriegründen wäre ebenfalls die Modellierung einer viertel Wellenlänge möglich, was allerdings eine komplexere Modellierung der Randbedingungen zur Folge hätte. Zur Bestimmung der Haltekraft des realen Bauteils kann Formel 6-20 genutzt werden:

$$F_{Fb,ges} = 2 * F_{\lambda} * n_{\lambda} * b_{Fb} \quad 6-20$$

$F_{\lambda}$  steht für die Haltekraft einer Wellenlänge,  $n_{\lambda}$  für die Anzahl der Wellenlängen und  $b_{Fb}$  für die Breite des Federblechs.

Abbildung 6-15 zeigt das schematische Modell sowie das Finite-Elemente-Modell.

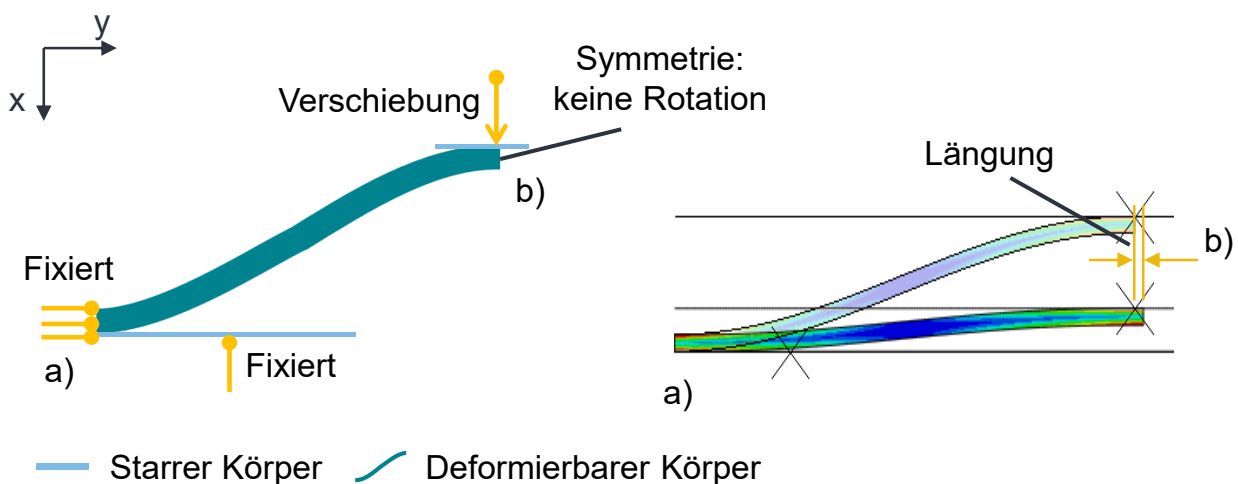


Abbildung 6-15: Finite-Elemente-Simulation des Federblechs; schematisch (links), Modell (rechts) (Heim et al. 2023a, S. 3).

An Punkt a) in Abbildung 6-15 ist das Federblech fixiert und im Kontakt mit einem ebenfalls fixierten Starrkörper, der das Blechpaket oder den Magneten abbildet. Ein weiterer Starrkörper ist parallel bei Punkt b) angeordnet. Durch dessen Verschiebung in x-Richtung wird der komprimierte Zustand des Federblechs erzielt. Dabei ist am offenen Ende am Punkt b) eine Symmetriebedingung angewandt, sodass der Rotationsfreiheitsgrad unterdrückt wird. Zwischen Federblech und Starrkörper wird ein Reibkoeffizient von 0,1 gewählt. Eine Variation des Reibwerts in der Simulation zeigt, dass dessen Einfluss in Bezug auf die Haltekraft aufgrund von Kompression vernachlässigbar gering ist. Während der Kompression kommt es zu einer Längung des Blechpakets in y-Richtung. Diese muss berücksichtigt werden, damit die Gesamtlänge des Federblechs im komprimierten Zustand nicht die Länge des Blechpakets übersteigt, was zu Problemen während der Montage führen würde. Die Kompression des Federblechs ist auf 95 % des Luftspalts zwischen Blechpaket, Magnet und Federblech begrenzt, um numerische Konvergenzprobleme zu vermeiden. Die Vernetzungsgröße wird anhand einer Konvergenzstudie bestimmt. Mit mindestens sechs Elementen über die Blechstärke konvergiert die Haltekraft. Es wird ein elastisch-plastisches Materialmodell verwendet. Für die Durchführung von Parameterstudien ist der gesamte Modellaufbau sowie die Modellauswertung parametrisch aufgebaut.

Die Auswertung der Simulationen erfolgt durch die Extraktion des Kraft-Weg-Verlaufs in x-Richtung. Zudem wird die Längung in y-Richtung sowie die auftretende von-Mises-Vergleichsspannung analysiert.

### **6.2.2.2 Modellvalidierung**

Vor der Durchführung von Parameterstudien erfolgt aufgrund der getroffenen Annahmen die Validierung des Finiten-Elemente-Modells der Magnetfixierung mittels Federblech durch den Abgleich der Simulation mit einem Prototyp. Zunächst wird die Skalierbarkeit der Anzahl der Wellenlängen validiert. Es werden Proben von einer bis acht Wellenlängen in dem Versuchsaufbau gemäß Abbildung 6-16 komprimiert und der Kraft-Weg-Verlauf ausgewertet. Es wird eine Zwick Roell Universalprüfmaschine genutzt, die eine Druckkraft in Höhe von 1,0 kN ausübt. Es ist festzustellen, dass die notwendige Kompressionskraft linear mit der Anzahl der Wellen ansteigt. Somit ist die Modellierung einer halben Wellenlänge ausreichend.

Die Validierung der Federkennlinie des Federblechs erfolgt durch den Abgleich mit einem Probenkörper, dessen Parameter in Tabelle 6-7 aufgeführt sind. Die Geometrie-

und Werkstoffdaten der Proben werden mittels geometrischer Vermessung sowie mittels Zugprüfmaschine ermittelt.

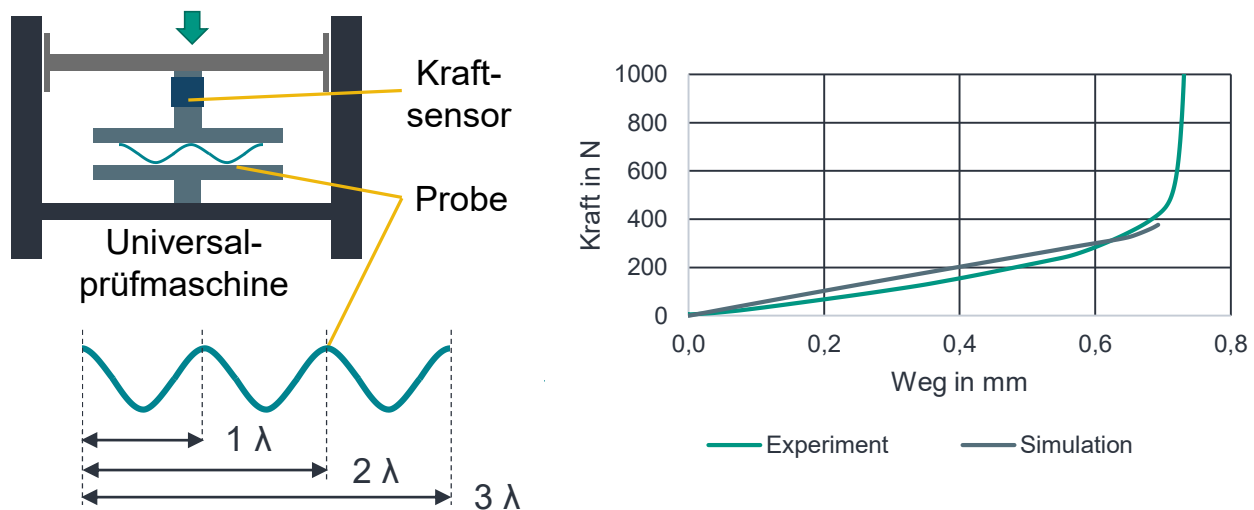


Abbildung 6-16: Vergleich Simulation und Experiment; Versuchsaufbau (links), Kraft-Weg-Verlauf (rechts) (Heim et al. 2023a, S. 4).

Tabelle 6-7: Parameter des Federblechs für die Validierung (Heim et al. 2023a, S. 4).

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Blechstärke	$D_{Fb}$	0,1	mm
Amplitude	$a_{Fb}$	0,35	mm
Wellenlänge	$\lambda_{Fb}$	7,86	mm
Breite	$b_{Fb}$	15,5	mm
Anzahl Wellen	$n_{\lambda}$	5	-
E-Modul	$E_{Fb}$	210.000	MPa
Querkontraktion	$\nu_{Fb}$	0,3	-
Streckgrenze	$R_{e,Fb}$	1.793	MPa
Zugfestigkeit	$R_{m, Fb}$	1.897	MPa
Bruchdehnung	$A_{Fb}$	2,254	%
Dichte	$\rho_{Fb}$	7,874	$g/cm^3$
Reibkoeffizient	$\mu_{Fb}$	0,1	-

Der Vergleich von Modell und Experiment ist in Abbildung 6-16 rechts dargestellt. Es besteht eine hohe Übereinstimmung. Die Simulation weist eine geringfügig erhöhte Steigung der Kraft-Weg-Kurve auf. Bei einem Weg von ca. 0,7 mm kommt es bei dem Experiment zur vollständigen Kompression des Federblechs, was einen steilen Anstieg der Kraft bis zu den definierten 1,0 kN des Testprogramms zur Folge hat. Die im Modell getroffenen Vereinfachungen konnten somit validiert werden.

### 6.2.2.3 Simulative Parameterstudie

Basierend auf dem validierten Modell wird eine Parameterstudie zum besseren Verständnis der Magnetfixierung mittels Federblech durchgeführt. Zu diesem Zweck werden die Parameter Blechstärke, Amplitude und Wellenlänge in Tabelle 6-8 variiert. Die Werkstoffparameter sind identisch zu Tabelle 6-7.

Tabelle 6-8: Faktoren und Faktorstufen für die Federblech Parameterstudie (Heim et al. 2023a, S. 4).

Faktor	Anzahl Faktorstufen	Faktorstufen in mm
Blechstärke	4	0,05; 0,1; 0,15; 0,2
Amplitude	8	0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55; 0,6
Wellenlänge	8	2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0

Die Faktoren und Faktorstufen ergeben mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan 256 Simulationen. Die Zielgrößen der Simulation sind die auftretenden Spannungen, die Längung des Federblechs sowie die Fixierkraft des Federblechs. Die maximal auftretende Spannung wird bei maximaler Kompression ermittelt. Die maximale Fixierkraft und die dabei auftretende Längung wird als die maximale Reaktionskraft bei der Kompression der Feder definiert, während die maximal auftretende Spannung 95 % der Streckgrenze nicht überschreitet. Vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse für den gegebenen Bauraum wird die maximale Fixierkraft über die Wellenlänge  $F_{Fb,nor}$  normiert:

$$F_{Fb,nor} = \frac{F_{\lambda}}{\lambda_g} \quad 6-21$$

$F_{\lambda}$  beschreibt die Haltekraft der betrachteten Wellenlänge und  $\lambda_g$  die gestauchte Wellenlänge bei der vorliegenden Haltekraft. Bei kürzeren Wellenlängen können zur Steigerung der Haltekraft mehr Wellen in den gegebenen Bauraum integriert werden.

Die Ergebnisse der Parameterstudie werden in Form von Haupteffektediagrammen ausgewertet. Zunächst wird die maximale Haltekraft unabhängig der auftretenden Spannungen in Abbildung 6-17 betrachtet.

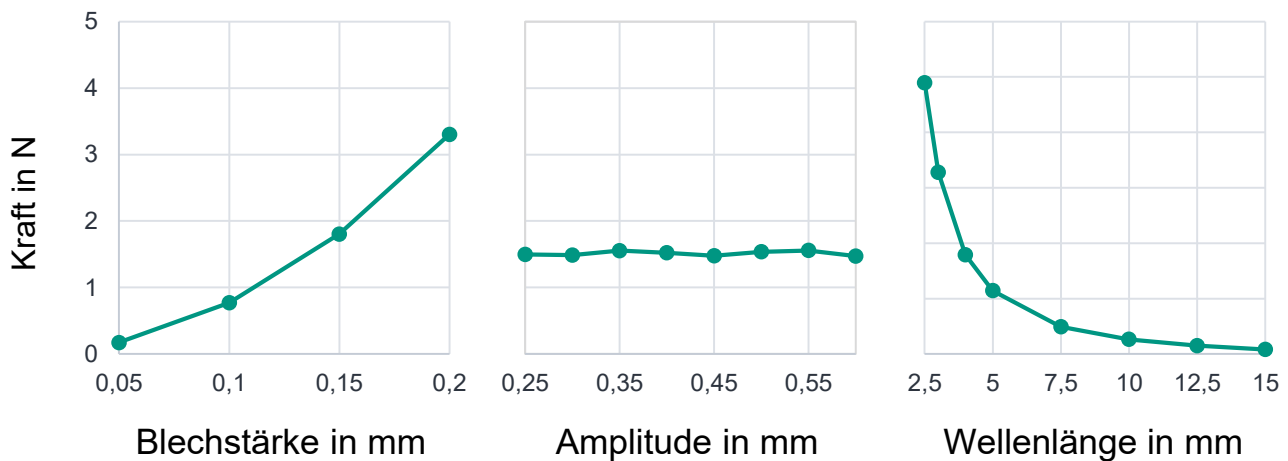


Abbildung 6-17: Haupteffektdiagramm für die maximale Haltekraft des Federblechs (eigene Darstellung (Heim et al. 2023a, S. 5)).

Die maximale Haltekraft nimmt, wie bereits anhand der theoretischen Überlegung dieses Kapitels betrachtet, stark mit der Blechstärke zu und stark mit der Wellenlänge ab. Der Einfluss der Amplitude ist vernachlässigbar gering. Die dabei auftretenden von-Mises Vergleichsspannungen werden in Abbildung 6-18 betrachtet.

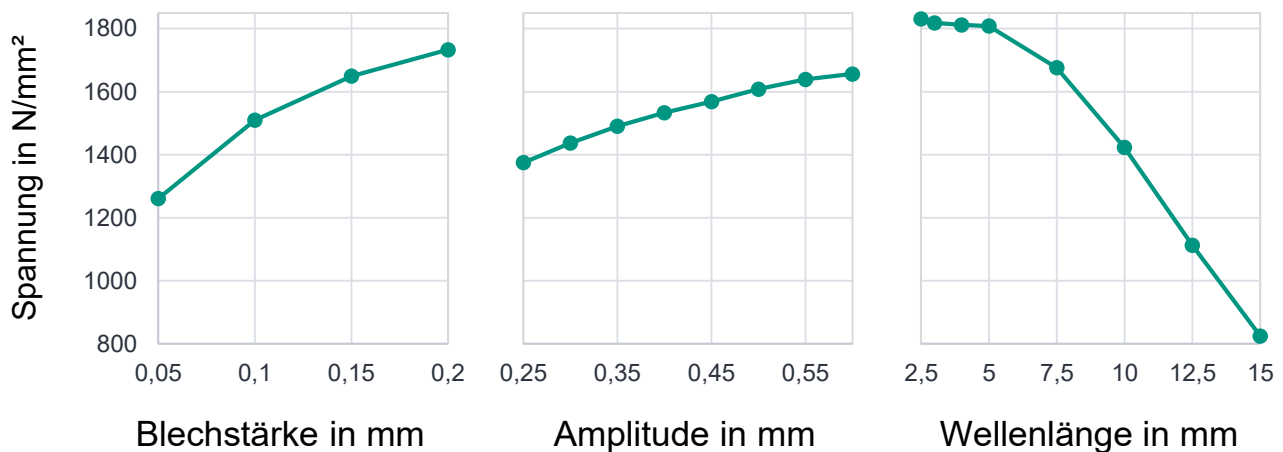


Abbildung 6-18: Haupteffektdiagramm für die von-Mises-Vergleichsspannung des Federblechs (eigene Darstellung (Heim et al. 2023a, S. 5)).

Eine dickere Blechstärke führt aufgrund des gesteigerten Flächenträgheitsmomentes zu höheren Spannungen. Eine gesteigerte Amplitude ermöglicht einen größeren Einfederungsweg, was ebenfalls zu höheren Spannungen führt. Kürzere Wellenlängen führen zu größeren Spannungen. Für Wellenlängen mit weniger als 5 mm bildet sich ein

Plateau für die maximale Spannung aus, was durch das plastische Materialverhalten zu erklären ist und auf eine Überschreitung der Streckgrenze rückschließen lässt.

Zur Berücksichtigung von Materialversagen und notwendigen Toleranzen wird die maximale Haltekraft für Spannungen unterhalb 95 % der Streckgrenze des Materials betrachtet. Ausgehend von der maximalen Haltekraft wird die Haltekraft bei einer um 0,1 mm reduzierten Kompression analysiert. Die 0,1 mm stellen den Worstcase der Toleranz zwischen Magnet und Magnetasche dar. Die realen Demontagekräfte können somit im Bereich zwischen den beiden Simulationen liegen. Die Ergebnisse sind in Form eines Haupteffektdiagramms in Abbildung 6-19 dargestellt.

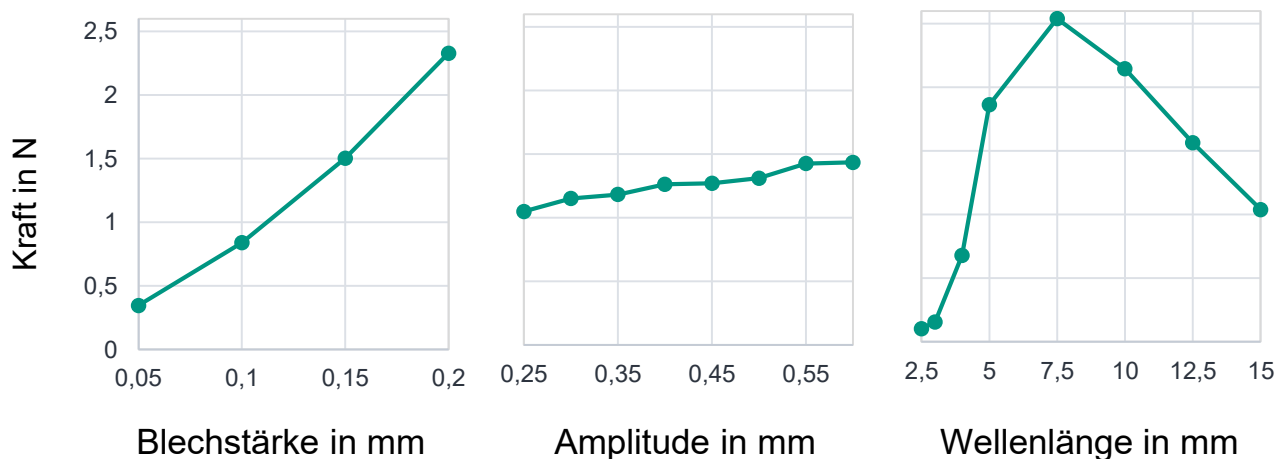


Abbildung 6-19: Haupteffektdiagramm des Federblechs für die Haltekraft bei 0,1 mm Toleranz (eigene Darstellung (Heim et al. 2023a, S. 5)).

Aufgrund der 0,1 mm Toleranz ist das Niveau der Haltekraft verringert. Im Vergleich zur Federnase liegt der Kraftverlust auf einem geringen Niveau. Die Fixierkraft des Federblechs steigt mit zunehmender Blechstärke und Amplitude aufgrund des gesteigerten Flächenträgheitsmoments sowie des möglichen Kompressionswegs. Die maximale Haltekraft steigt von einer Wellenlänge von 15 mm bis zu 7,5 mm. Dies ist bedingt durch den verkürzten Hebelarm, der eine gesteigerte Kraft für die Verformung erfordert. Unterhalb der Wellenlänge von 7,5 mm fällt die Fixierkraft wieder ab. Dies ist darin begründet, dass bei einer zu geringen Wellenlänge die Spannungen zu hoch sind und die 0,1 mm Toleranz bei der kurzen Hebellänge nicht erreicht werden kann. Daher nähert sich der Wert null an. Da die Toleranzen für geringere Wellenlängen kritischer sind, ist bei geringen Wellenlängen mit einer größeren Streuung der Demontagekraft zu rechnen.

**Zusammenfassung:** Die Demontagekräfte sind maßgeblich von Wellenlänge, Blechstärke, Federwerkstoff und zur Verfügung stehendem Bauraum abhängig. Dabei besitzt die Wellenlänge den größten Einfluss. Es besteht ein Zielkonflikt zwischen Haltekraft und Auswirkung der Toleranzen, wobei die Toleranzen beim Federblech weniger sensitiv sind als die Toleranzen der Federnase.

### 6.3 Berechnung kritischer Knickspannungen des Stempels

Die Demontagekräfte können bei einem schlanken Stempel zum Versagen durch Knicken führen. Daher müssen kritische Knickspannungen untersucht werden. Die Berechnung kritischer Knickspannungen des Stempels der Magnetdemontage sind bereits in (Heim et al. 2025) veröffentlicht. Es folgt die Knickkraftberechnung anhand des beispielhaften Stempels von Kapitel 6.1.5 mit den Daten in Tabelle 6-4. Diese Daten werden in Tabelle 6-9 um eine beispielhafte Stempellänge von 30 mm sowie der Streckgrenze von 750 MPa ergänzt.

Tabelle 6-9: Parameter des Stempels für einen beispielhaften Magnetdemontageprozess.

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Demontagekraft	$F_{De}$	15	kN
Breite Stempel	$b_S$	3	mm
Länge Stempel	$l_S$	10	mm
Höhe Stempel	$h_S$	30	mm
Streckgrenze Stempel	$R_{e,S}$	750	MPa
E-Modul	$E_S$	210.000	N/mm <sup>2</sup>

Zunächst erfolgt die Berechnung für das elastische Knicken nach Euler für hohe Schlankheitsgrade. Es wird aufgrund der Einspannung des Stempels in einer Vorrichtung und mit der Annahme, dass der Stempel beim Kontakt mit dem Magneten nicht zur Seite rutscht, der Euler-Fall 3 identifiziert. Zunächst wird der Schlankheitsgrad des Stempels  $\lambda_k$  berechnet mit (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2021, S. 226):

$$\lambda_k = \frac{l_k}{\sqrt{\frac{I_S}{A_S}}}$$

$$\lambda_k = \frac{0,7 * h_S}{\sqrt{\frac{b_S^2}{12}}}$$

6-22

$$\lambda_k = \frac{0,7 * 30mm}{\sqrt{\frac{(3mm)^2}{12}}} = 24,25$$

Die Berechnung erfolgt mit der Knicklänge  $l_k$ , dem konstanten Stempelquerschnitt  $A_S$  und dem Flächenträgheitsmoment  $I_S$ . Es wird lediglich das Knicken über die kurze Seite des Magneten berücksichtigt, da dieser Fall kritischer ist. Die Knicklänge im Eulerfall 3 entspricht dem 0,7-fachen der realen Länge.

Mit dem minimalen Schlankheitsgrad wird überprüft, ob elastisches Knicken vorliegt. Es handelt sich um elastisches Knicken, wenn der vorliegende Schlankheitsgrad den minimalen Schlankheitsgrad, welcher der Proportionalitätsgrenze entspricht, übersteigt. Der minimale Schlankheitsgrad  $\lambda_{min}$  eines Bauteils kann mit folgender Formel berechnet werden (Assmann & Selke 2013, S. 244):

$$\lambda_{min} = \pi \sqrt{\frac{E_S}{\sigma_{dP}}}$$

6-23

$$\lambda_{min} = \pi \sqrt{\frac{210000N/mm^2}{0,8 * 750N/mm^2}} = 58,77$$

Dabei steht  $\sigma_{dP}$  für die Spannung der Proportionalitätsgrenze des Knickens. Das Ermitteln der Proportionalitätsgrenze von Werkstoffen ist mit hohem Aufwand verbunden, daher wird die Proportionalitätsgrenze mit 80 % der Streckgrenze angenähert (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2021, S. 227). Die vorliegende Knicklänge liegt unterhalb der Proportionalitätsgrenze, daher liegt elastisch-plastisches Knicken vor. Für das elastisch-plastische Knicken ist die Euler-Theorie nicht mehr anwendbar, die Tetmayer-Theorie kann stattdessen angewandt werden. Kritisch bei der Tetmayer-Theorie stellt sich die Verfügbarkeit von Werkstoffdaten dar. Für Werkzeugstähle, wie der vorliegende Werkstoff, sind keine Daten vorhanden. Um die Knickkraft dennoch

abzuschätzen, kann die kritische Knickspannung der Proportionalitätsgrenze berechnet werden mit (Assmann & Selke 2013, S. 243):

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 * E_S}{\lambda_{min}^2} = 600,1 \text{ MPa} \quad 6-24$$

Die vorliegende Spannung aufgrund der Demontagekraft beträgt:

$$\sigma = \frac{F_{De}}{A_S} = 500 \text{ MPa} \quad 6-25$$

Die Spannung liegt damit unterhalb der kritischen Spannung für den minimalen Schlankheitsgrad. Der berechnete Sicherheitsfaktor gegen Knicken beträgt 1,2. In der Realität liegt dieser höher, da sich der vorliegende Schlankheitsgrad unterhalb des minimalen Schlankheitsgrads befindet.

**Zusammenfassung:** Kritische Knicklasten des Stempels müssen bei der Parametrierung des Magnetdemontageprozesses berücksichtigt werden.

## **7 Demontage von Magneten in einer automatisierten Demontagezelle**

### **7.1 Aufbau der Demontagezelle**

Für die Realisierung der Magnetdemontage wird systematisch eine flexible und automatisierte Demontagezelle entwickelt. Entsprechend der in Kapitel 4 dargestellten Prozesskette stellt der Ausgangszustand für die Magnetdemontage einzelne, nicht magnetisierte Blechpakete mit stoffschlüssig oder kraftschlüssig fixierten Magneten dar. Die Demontagezelle dient zur Durchführung von experimentellen Versuchsreihen sowie als Beispielanlage zur zukünftigen Industrialisierung des Prozesses. Ergebnisse zur Demontagezelle sind bereits in (A\_Lalla 2024; Heim et al. 2025) veröffentlicht.

Wie bereits in Kapitel 4 identifiziert, stellt die Magnetdemontage mittels Stempel die beste Lösung dar. Zudem konnten Heim et al. aufzeigen, dass die mechanische Demontage von Magneten mittels eines Stempels möglich ist (Heim et al. 2023b, S. 71–76).

#### **7.1.1 Anforderungen**

Die Entwicklung der Demontagezelle erfolgt in Anlehnung an die VDI Richtlinie 2221 zur Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Hierfür werden verschiedene Anforderungen definiert, insbesondere mit dem Ziel, eine flexible und automatisierte Magnetdemontage von Rotoren verschiedenster Hersteller zu ermöglichen. Zu diesem Zweck werden die zu erfüllenden Funktionen der Magnetdemontage im Folgenden abgeleitet.

##### **Blechpaket spannen**

Die Blechpakete mit unterschiedlichen Geometrien müssen sicher gespannt werden. Dabei darf die Zugänglichkeit für den Demontageprozess nicht eingeschränkt werden.

##### **Stempelwerkzeug**

Das Stempelwerkzeug überträgt die Kraft zwischen der Demontagezelle und dem Blechpaket. Für unterschiedliche Magnetgrößen ist eine hohe Flexibilität gefordert.

##### **Positionierung**

Das Stempelwerkzeug muss bezüglich dem zu demontierenden Blechpaket ausgerichtet werden. Für das 2,5-dimensionale Blechpaket sind drei Freiheitsgrade erforderlich.

## Aufbringen der Demontagekraft

Die Demontagekraft muss von der Demontagezelle aufgebracht und wieder aufgenommen werden. Für die Prozessdurchführung ist es zudem notwendig, eine genaue Steuerung und Erfassung von Kraft und Weg zu ermöglichen.

## Optische Sensorik

Für ein hohes Maß an Automatisierung sowie Robustheit des Prozesses wird ein optischer Sensor verwendet. Dieser kann für die Positionserkennung von Magneten und Blechpaket eingesetzt werden.

## Quantitative Anforderungen

Neben den funktionellen Anforderungen werden in Tabelle 7-1 weitere Anforderungen aufgelistet. Die Werte werden auf Basis verschiedener Publikationen gewählt, damit ein weites Spektrum an elektrischen Traktionsantrieben mit der Demontagezelle demonstriert werden kann (Albrecht 2014, S. 42–134; Bast et al. 2014, S. 40; Bhuiyan et al. 2023, S. 304; Du et al. 2016, S. 1; Ihne et al. 2024a, S. 6; Ihne et al. 2023b, S. 464; Krings & Monissen 2020, S. 1808–1811; Nerg et al. 2014, S. 4288; Nerg et al. 2014, S. 3).

Tabelle 7-1: Anforderungsliste an die Magnetdemontage.

Nr.	Bezeichnung	Wert		Einheit
		Min.	Max.	
1.	Zerstörungsfreie Magnetdemontage			-
<b>Magnet Abmessungen</b>				
2.	Höhe	10	60	mm
3.	Länge	9,3	30	mm
4.	Breite	3,9	7	mm
<b>Blechpaket Abmessungen</b>				
5.	Außendurchmesser	80	180	mm
6.	Innendurchmesser	35	65	mm
7.	Höhe	10	60	mm
<b>Blechpaketgestaltung</b>				
8.	Nabengeometrie	Zylindrisch, Passfeder, Zahnwelle		
9.	Anzahl der Magnettaschen	12	40	-
10.	Distanz Magnettasche – Mittelpunkt	18	90	mm
<b>Auspressprozess</b>				

11.	Auspresskraft	0	20	kN
12.	Auspressgeschwindigkeit	1	150	mm/s
13.	Hub	1	100	mm
14.	Kraft-Weg-Überwachung			-
<b>Auspresswerkzeug</b>				
15.	Modular bzw. Flexibel			-
<b>Optische Sensorik</b>				
16	Integrierter optischer Sensor			-

### 7.1.2 Konstruktion

Mit der zugrundeliegenden iterativen Systematik der VDI-Richtlinie 2221 wird eine Demontagezelle entwickelt, deren Ergebnis in Abbildung 7-1 dargestellt ist. Die Magnete des Blechpaketes werden einzeln demontiert. Dies ermöglicht ein Maximum an Flexibilität, zudem kann der Demontageprozess detailliert untersucht werden.

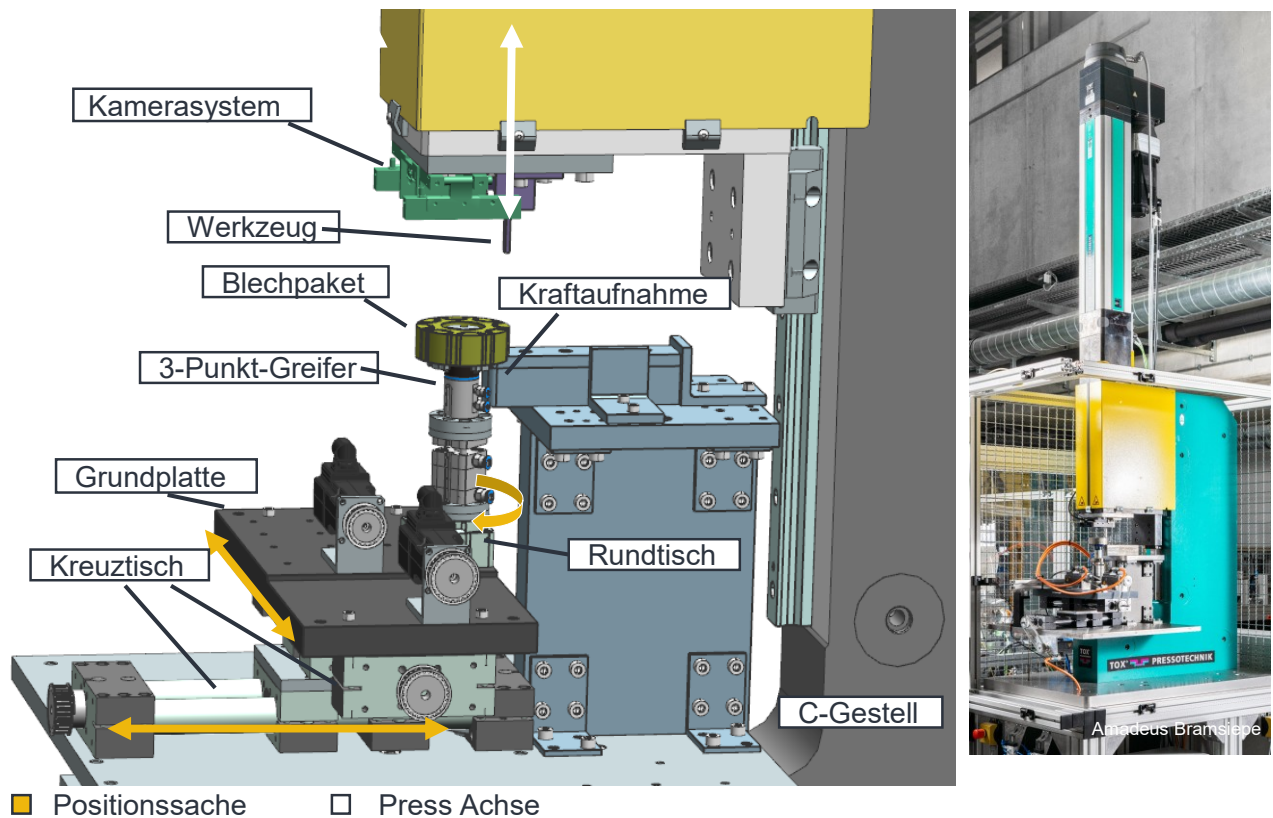


Abbildung 7-1: CAD-Modell und Bild der Demontagezelle (Heim et al. 2025, S. 5).

Die Basis der Zelle stellt eine 60 kN Presse mit C-Gestell dar. Der servomechanische Antrieb mit integriertem Kraftsensor und Drehgeber ermöglicht eine präzise Kraft-Weg-Steuerung und -Erfassung.

Die Pressachse ist stationär, sodass die Positionierung über das Verschieben des Blechpaketes erfolgt. Der Kraftfluss wird dabei ausgehend vom Demontagewerkzeug über eine Kraftaufnahme geleitet, was die Gestaltung der Positioniervorrichtung aufgrund der geringen anliegenden Belastungen vereinfacht. Die Geometrie des Blechpaketes erfordert drei Achsen für die eindeutige Positionierung des Blechpaketes in beliebiger Orientierung. Die Positionierung erfolgt gemäß Abbildung 7-2 translatorisch mit einem Kreuztisch, welcher für die rotatorische Positionierung über eine Grundplatte mit einem Rundtisch verbunden ist. Die Steuerung der Achsen erfolgt mittels Servomotoren. Aufgrund der Symmetrie der Magnete und des Blechpaketes kann der Bewegungsraum auf einen Halbring eingegrenzt werden. Die Positionen können auf Basis von CAD- und Bilddaten angefahren werden.

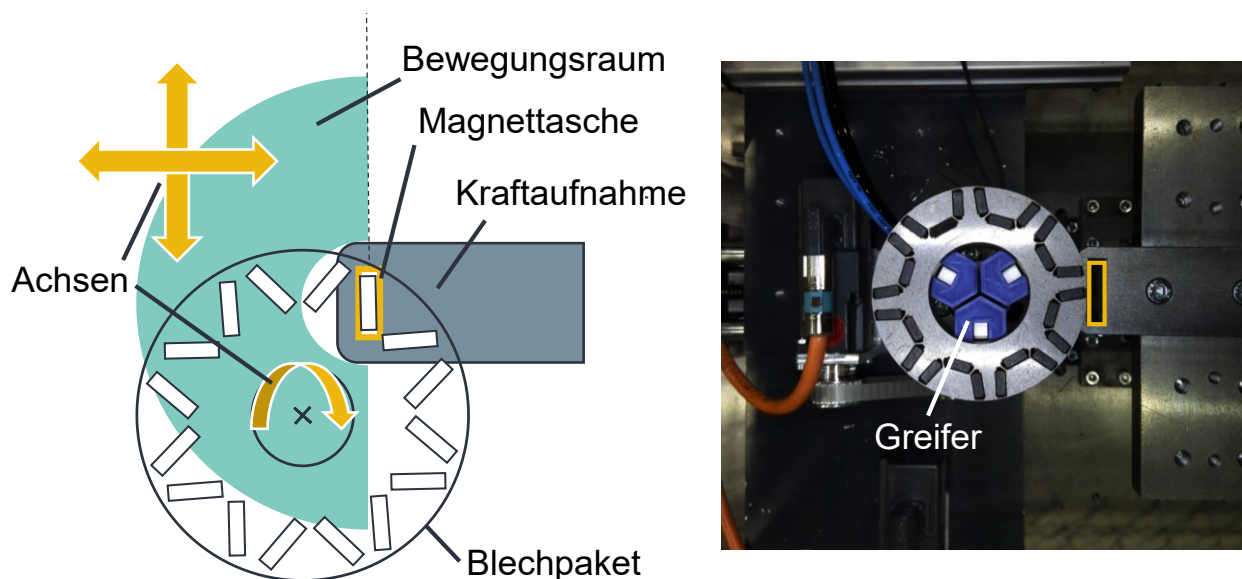


Abbildung 7-2: Positioniersystem (links) und Kameraperspektive des Kamerasystems (rechts) nach (Heim et al. 2025, S. 7).

Das Blechpaket wird über einen pneumatischen 3-Punkt-Innengreifer gegriffen. Dieser ist zum möglichen Höhenausgleich bei verformten oder verschmutzten Blechpaketen auf einem Pneumatikzylinder montiert.

An der Pressachse sind eine modulare Werkzeugaufnahme sowie ein Kamerasystem montiert. Das Presswerkzeug wird aufgrund der hohen zu erwartenden Auspresskräfte

und den damit einhergehenden Druck- und Knickspannungen, die zum Knicken des Stempels führen können, aus gehärtetem Werkzeugstahl gefertigt. Das Kamerasystem besteht aus einer digitalen Kamera, zwei LED Linienbeleuchtungen und einem Polarisationsfilter zur Vermeidung von Reflexionen. Die Perspektive des Kamerasystems ist in Abbildung 7-2 rechts dargestellt.

Die Dimensionierung der Kinematik der Positioniereinheit sowie des Stempelwerkzeuges gegen Knicken ist in (A\_Lalla 2024; Heim et al. 2025) präzise beschrieben. Um die exakte Aufzeichnung der Kraft-Weg-Verläufe zu ermöglichen, wird eine Aufweitungskompensation zur Berücksichtigung der Nachgiebigkeit der Presse, des Kraftaufnahmesystems sowie des verwendeten Werkzeugs umgesetzt. Die Kompensation erfolgt individuell für jedes Werkzeug. Für die Kompensation wird ein massives Stahlteil mit sehr hoher Steifigkeit auf die Kraftaufnahme gelegt. Anschließend wird mit der maximalen zulässigen Demontagekraft des Stempels auf Block gefahren und der Kraft-Weg-Verlauf gemessen. Der Verlauf ist linear, wodurch eine einfache Kompensation ermöglicht wird. Die Messung wird jeweils dreimal wiederholt, wobei eine präzise Übereinstimmung festzustellen ist. Aufgrund des linearen Verlaufs wird für den gemessenen Kraft-Weg-Verlauf eine lineare Regression zur Ermittlung der Steifigkeit gebildet. Diese Steifigkeit wird bei den Auspressversuchen integriert, indem bei jeder Auspresskraft die entsprechende Aufbiegung subtrahiert wird.

## **7.2 Herstellung von Versuchsträgern**

Zur gezielten Untersuchung verschiedener Einflussparameter werden eigene Blechpakete entwickelt und Magnete darin fixiert. Es werden lasergeschnittene und vollflächig verklebte Blechpakete mit einer Blechstärke von 0,35 mm beschafft und NdFeB-Magnete eingesetzt. Diese sind nicht magnetisiert, sodass der Zustand der Blechpakete nach dem Entmagnetisierungsprozess abgebildet wird.

### **7.2.1 Stoffschlüssige Magnetfixierungen**

Stoffschlüssige Magnetfixierungen werden mittels eines Klebprozesses hergestellt, der in Abbildung 7-3 dargestellt ist. Diese stellen Verbindungen aus dem Klebprozess, Transfermoldingprozess oder Spritzgussprozess dar. Die Blechpakete werden zum Abdichten sowie zum einfachen Lösen auf eine Platte mit Teflonfolie gespannt. Der Ein- oder Zwei-Komponentenklebstoff wird zunächst durch Erwärmen oder Mischen präpariert. Zur Dosierung wird eine pneumatisch aktuierte Kartusche eingesetzt. Der

Klebstoff wird im ersten Schritt in die Magnettasche gefüllt und anschließend der Magnet eingeschoben, um Luftpfeinschlüsse zu vermeiden. Der Klebstoff wird entsprechend der Spezifikationen des Datenblatts bei Raumtemperatur oder thermisch unterstützt in einem Ofen ausgehärtet. Nach dem Aushärtprozess kann das Blechpaket aus der Vorrichtung gelöst werden.

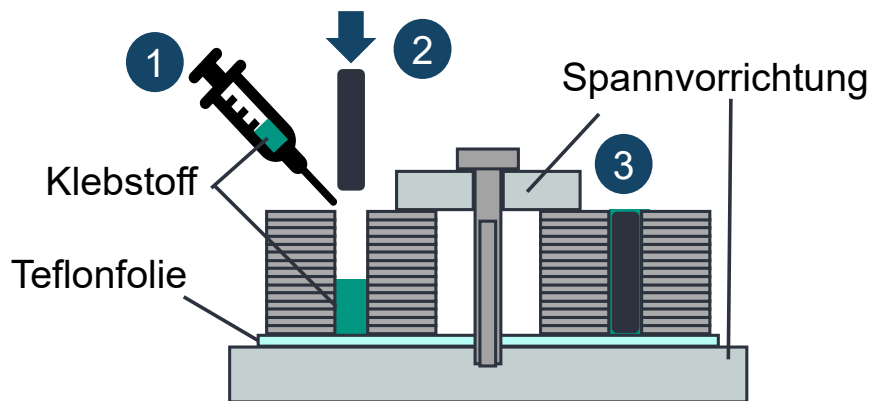


Abbildung 7-3: Vorrichtung zum Verkleben von Magneten.

### 7.2.2 Federnase

Für Magnetfixierungen mittels Federnasen werden die Federnasen durch iterierende Blechschnitte umgesetzt. Die Montage der Magnete erfolgt mit einem Stempel über die elektromechanische Achse der Demontagezelle. Der Prozess erfolgt weggesteuert. Die Kraft-Weg-Verläufe werden dabei erfasst und aufgezeichnet.

### 7.2.3 Federblech

Die Montage des Federblechs stellt durch die Nutzung eines Zusatzbauteils einen komplexeren Prozess als die Montage der Federnase dar. Zudem handelt es sich dabei um einen neuartigen Prozess, der sich in der Entwicklung befindet. Daher wird ein eigener Montageprozess entwickelt. Dieser ist in (A\_Cassiani 2024) detailliert beschrieben und in Abbildung 7-4 abgebildet.

Die Montage erfolgt in vier Schritten, die jeweils an verschiedenen Stationen umgesetzt werden. In diesem Beispiel befinden sich vier Magnete in der Magnettasche, eine andere Anzahl ist auf gleiche Weise umsetzbar. Im ersten Schritt werden die Magnete in ein Magazin eingeführt, in das im nächsten Schritt das Federblech eingeschoben wird. Anschließend wird das Magazin zusammengefahren, um das Federblech zu

komprimieren bis die Breite geringer ist als die Magnetasche im Blechpaket. Zuletzt werden Federblech und Magnete mit einem Stempel in das Blechpaket gedrückt.

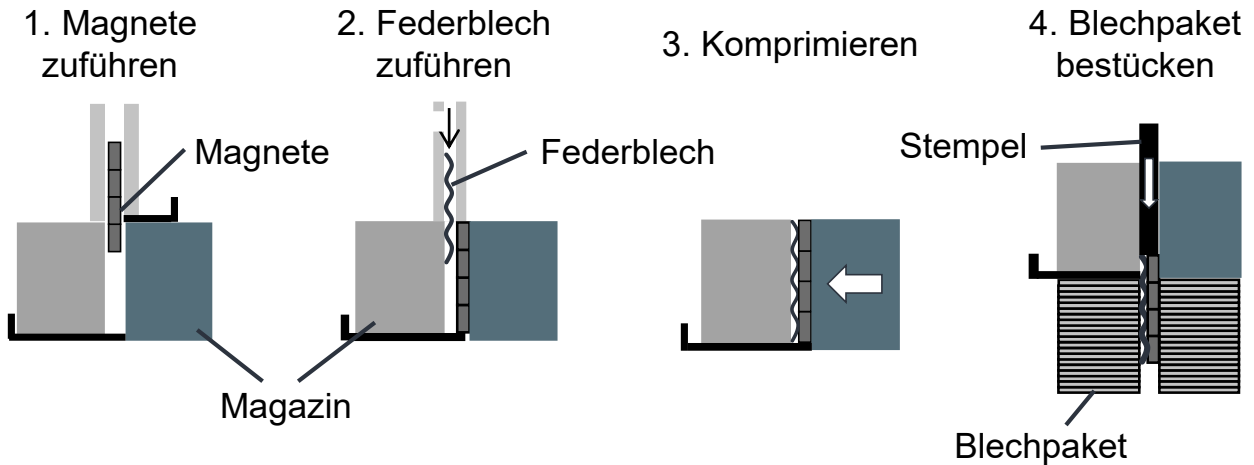


Abbildung 7-4: Montageprozess der federnden Magnetfixierung (A\_Cassiani 2024, S. 26).

## 7.3 Experimentelle Versuchsreihen

Die in Kapitel 5 identifizierten und teilweise in Kapitel 6 untersuchten Einflussparameter auf die Magnetdemontage werden in diesem Kapitel experimentell untersucht. Die statistische Signifikanz wird bei allen Versuchen auf 5 % festgelegt. Falls nicht anderweitig spezifiziert, wird der Stempel mit dem Querschnitt  $11,0 \times 3,0$  mm eingesetzt. Der Stempel wird stets mittig auf dem Magneten ausgerichtet.

### 7.3.1 Stoffschlüssige Magnetfixierungen

Die Ergebnisse für stoffschlüssige Magnetfixierungen sind bereits teilweise in (A\_Claassen 2024; A\_Dengel 2024; Heim et al. 2024) veröffentlicht.

Um die Anzahl der Versuche in einem vertretbaren Rahmen zu halten, werden die Parameter mit dem größten Einflusspotenzial basierend auf den Berechnungen von Kapitel 6 ausgewählt und in Tabelle 7-2 klassifiziert. Dabei lassen sich Parameter mit bestimmtem und unbestimmtem Einfluss auf die Demontage unterscheiden. Parametern mit bestimmtem Einfluss werden basierend auf der simulativen Betrachtung ein relevanter Einfluss auf die Magnetdemontage zugeschrieben. Parameter besitzen einen unbestimmten Einfluss, wenn deren Einfluss schwer abzuschätzen ist. Daher werden diese Parameter zur Bestimmung ihrer Relevanz mit einem Screening Versuchsplan untersucht.

Tabelle 7-2: Einflussparameter stoffschlüssiger Magnetfixierungen (Heim et al. 2024, S. 2).

	Parameter	System
Bestimmter Einfluss	Klebstoff	Produkt
	Magnetgeometrie	
	Magnetausführung	
	Stempel Größe	
Unbestimmter Einfluss	Demontagesequenz	Prozess
	Auspressgeschwindigkeit	
	Auspressrichtung	
	Verunreinigung	
	Magnetabstand	Produkt
	Fügespiel	
	Magnetbeschichtung	
	Flussbarriere	
	Alterungszustand	

### 7.3.1.1 Experimentelle Parameterklassifizierung mittels Screening

Die zuvor identifizierten Einflussparameter mit unbestimmtem Einfluss werden mit einem Screening Versuchsplan untersucht. Auf diese Weise kann mit verhältnismäßig geringem Versuchsaufwand der Einfluss effektiv festgestellt werden. Für den Screening Versuchsplan werden für jeden zu untersuchenden Parameter zwei Faktorstufen in Tabelle 7-3 definiert.

Die Demontagesequenz wird in der Versuchsdurchführung betrachtet und benötigt daher keine Faktorstufen. Zur Untersuchung der Verunreinigung werden Magnete und Blechpaket mit Aceton gereinigt bzw. mit einem minimalen Ölfilm beschichtet. Der Alterungszustand wird durch mechanische und thermische Last erzeugt. Da die Versuchsträger speziell angefertigt wurden und keine Alteile verfügbar sind, muss der Alterungszustand künstlich erzeugt werden. Hierfür wird das Blechpaket in einem Ofen dreimal für 60 Minuten auf 160°C, 5°C über der empfohlenen Einsatztemperatur des Klebstoffs, erhitzt. Die erhöhte Temperatur beschleunigt die Alterung und stellt Hotspots mit hoher Wärmekonzentration innerhalb des Rotors dar. Die mechanische Belastung erfolgt in einem Schleuderprüfstand bei 11.000 U/min für 60 Minuten, dargestellt in Abbildung 7-5 rechts. Eine definierte Betriebs- oder Schleuderdrehzahl ist für

den Versuchsträger nicht bekannt. Aus Sicherheitsgründen wird diese daher auf 11.000 U/min limitiert.

Tabelle 7-3: Faktorstufen und konstante Parameter des Screening Versuchsplans (Heim et al. 2024, S. 3).

Faktor	Faktorstufe	
	-	+
Demontagesequenz	(Versuchsreihenfolge)	
Auspressgeschwindigkeit	2 mm/s	10 mm/s
Auspressrichtung	Oben	Unten
Verunreinigung	Nicht gereinigt	Gereinigt
Magnetabstand	3 mm	6 mm
Fügespiel	0,1 mm	0,3 mm
Magnetbeschichtung	Epoxid	Phosphatierung
Flussbarriere	Klein	Groß
Alterungszustand	Gealtert	Nicht gealtert
Konstante Parameter	Wert	
Blechstärke	0,35 mm	
Klebstoff	Elan-tron EC5000/W5690	
Rotor Innendurchmesser	52 mm	
Rotor Außendurchmesser	160 mm	
Anzahl Magnetpole	6	
Magnete pro Pol	4	
Magnethöhe	21,3 mm	
Magnetbreite	4,8 mm	
Magnetlänge	21,6 mm	

Für die Untersuchung der 9 Parameter werden 18 Parameterkombinationen benötigt. Mit drei Replikationen pro Kombination ergeben sich 54 Versuche.

Zur Untersuchung wurden spezielle Blechpakete designt, die unterschiedliche Pole aufweisen. So können alle Parameter mit lediglich einer Blechpaketgeometrie untersucht werden. Die Blechpaketgeometrie ist in Abbildung 7-5 dargestellt. Die Magnettaschen besitzen unterschiedliche Flussbarrieren, Fügespiele und Abstände zu den anderen Magnettaschen. Am Innendurchmesser befinden sich zwei rechteckige Orientierungshilfen zur eindeutigen Zuordnung der Parameter während der Versuchsdurchführung.

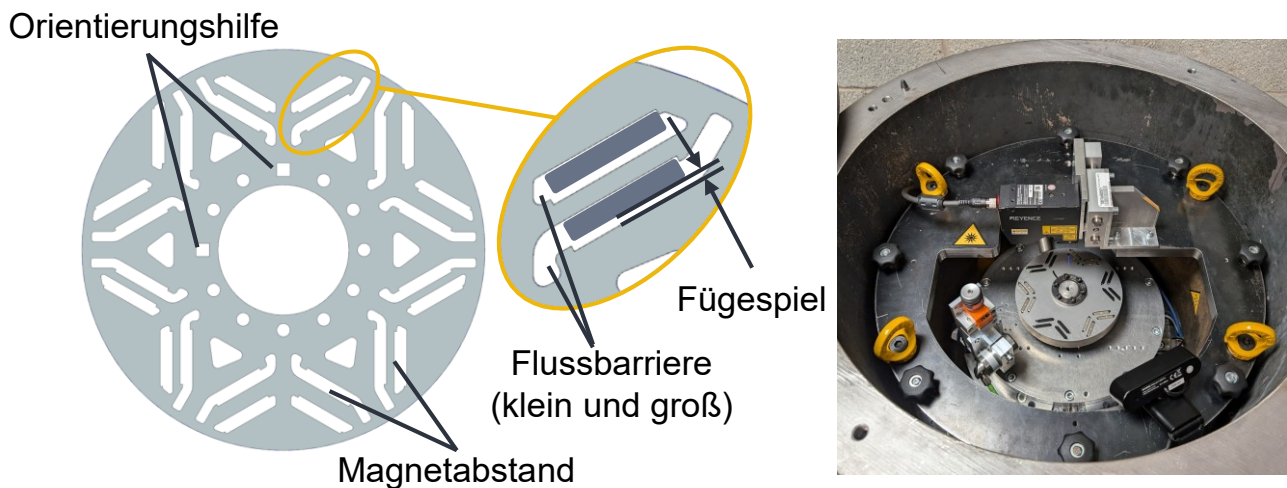


Abbildung 7-5: Blechpaketdesign für die Screening Versuchsreihe (links) (Heim et al. 2024, S. 3), mechanische Alterung im Schleuderprüfstand (rechts).

Für die Auswertung der Ergebnisse werden die abhängigen Variablen definiert:

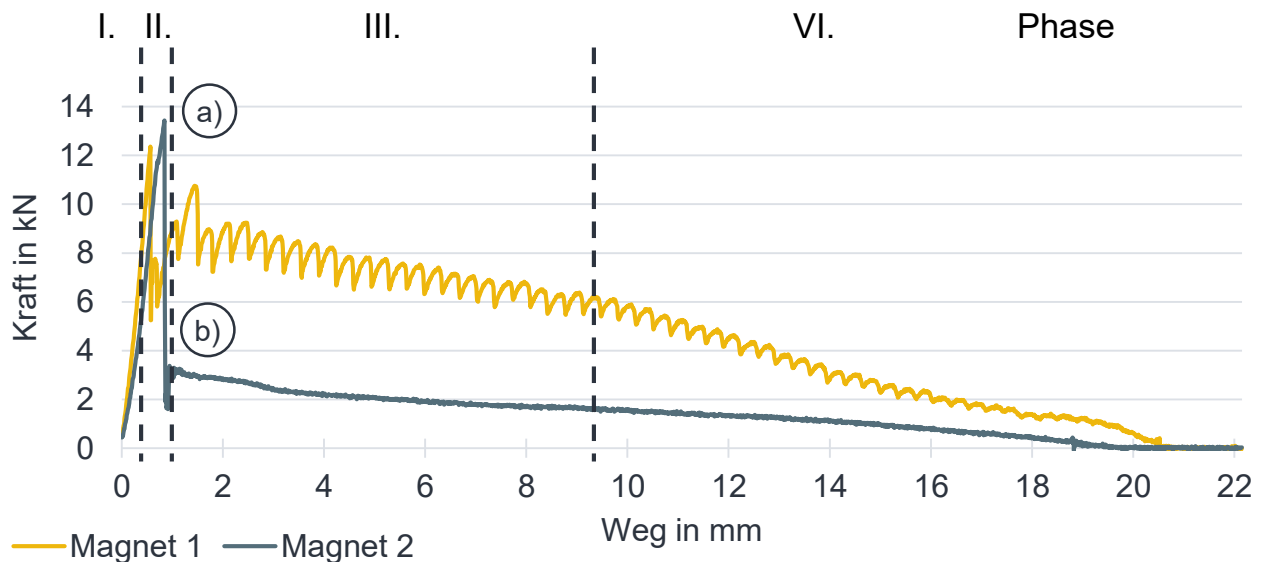
1. Maximale Demontagekraft
  - Höchste während der Demontage auftretende Kraft
2. Durchschnittliche Demontagekraft
  - Durchschnittswert der Demontagekraft über den Auspressweg
3. Magnetbeschädigung
  - Gibt an, ob der Magnet in einem Stück ohne sichtbare Beschädigungen demontiert wurde oder nicht
4. Kleberückstände
  - Gibt an, in wie weit Kleberückstände am Magneten vorhanden sind.

Die maximale Demontagekraft sowie die durchschnittliche Kraft werden in kN angegeben. Die Magnetbeschädigung besitzt den Wert null bei keiner Beschädigung und den Wert eins bei einer vorliegenden Beschädigung. Kleberückstände werden kontinuierlich im Bereich von null bei keinen Kleberückständen bis eins bei Anhaftung des gesamten Klebstoffs angegeben. Der Wert entspricht dem Prozentsatz der mit Klebstoff bedeckten Fläche des Magneten.

Die Demontage wird mit der Demontagezelle aus Kapitel 7.1 durchgeführt. Zunächst werden die Kraft-Weg-Verläufe der Auspresskurven anhand von zwei Beispielkurven diskutiert. In Abbildung 7-6 sind die Kraft-Weg-Verläufe dargestellt.

Zu Beginn verlaufen beide Kurven bis zum Maximum bei a) ähnlich. Der steile Anstieg kann durch die hohen Adhäsionskräfte zwischen Magnet, Magnetfixierung und

Blechpaket erklärt werden. Sobald die Verbindung durch die Adhäsions- und Kohäsionskräfte getrennt wird, fällt das Kraftniveau stark bis zum Punkt b) ab, wobei es für Magnet zwei einen deutlich größeren Abfall gibt. Im Anschluss sinkt die Auspresskraft nahezu linear bei beiden Magneten. Magnet eins zeigt eine überlagerte Wellenform, deren Wellenlänge der Blechstärke entspricht. Dies deutet auf einen Mikroformschluss zwischen Blechlamellen und Magnetfixierung hin.



Parameter	Magnet 1	Magnet 2
Auspressgeschwindigkeit	2 mm/s	2 mm/s
Auspressrichtung	Oben	Oben
Verunreinigung	Gereinigt	Nicht gereinigt
Magnetabstand	6 mm	6 mm
Fügespiel	0,3 mm	0,3 mm
Magnetbeschichtung	Phosphatierung	Epoxid
Flussbarriere	Klein	Groß
Alterungszustand	Gealtert	Keiner

Abbildung 7-6: Kraft-Weg-Verlauf der Magnetdemontage bei unterschiedlichen Parametern (Heim et al. 2024, S. 4).

Dem Kraft-Verlauf können die verschiedenen Phasen des Demontageprozesses nach (Heim et al. 2023b) zugeordnet werden:

**Phase I:** Linear elastische Deformation

**Phase II:** Klebstoffversagen

**Phase III:** Reibungsverhalten

**Phase IV:** Degradiertes Reibungsverhalten

In der ersten Phase besteht aufgrund des elastischen Verhaltens des Klebstoffs und der Fügepartner ein linearer Zusammenhang.

In Phase II kommt es beim Erreichen der maximal übertragbaren Kraft zum Versagen des Klebstoffs. Das Versagen geht mit einem starken Abfall der Kraft einher. Das Simulationsmodell aus Kapitel 6 kann lediglich Phase I und II abbilden.

Bei Phase III sinkt die Kraft annähernd linear mit dem Weg. Nach dem Versagen des Klebstoffs wird der Magnet von Reibkräften innerhalb der Magnettasche fixiert. Die Kraft sinkt linear, da ebenfalls die Kontaktfläche linear mit dem Weg abnimmt.

In Phase IV sinkt die Demontagekraft mit einer nichtlinearen Charakteristik. Der Übergang von Phase III und IV ist in Abbildung 7-6 nicht exakt trennbar und für die beiden Magnete unterschiedlich. Durch die Reibung von Phase III kommt es in Phase IV zu einer Schädigung der Magnetfixierung. Hierdurch verändern sich die Reibverhältnisse und es kommt zu einem stärkeren Absinken der Demontagekraft.

### Ergebnisse des Screenings

Alle Magnete konnten mit der Demontagezelle demontiert werden. In Abbildung 7-7 ist ein Blechpaket nach der Demontage dargestellt, wobei aufgrund des Versuchsplans nicht alle Magnettaschen bestückt waren.

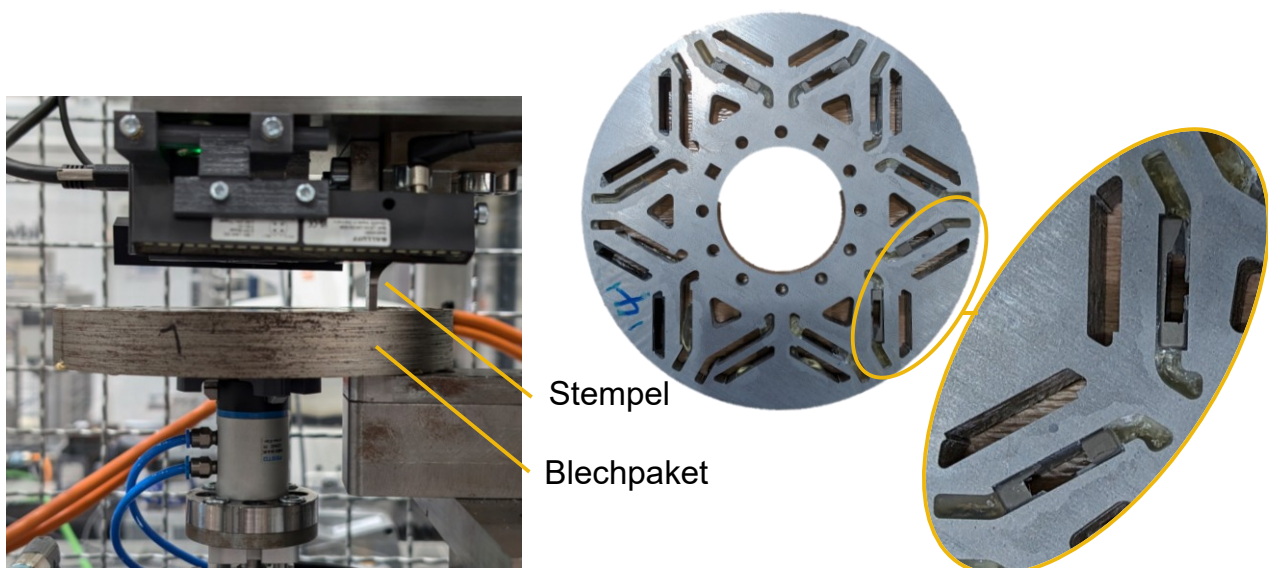


Abbildung 7-7: Demontageaufbau (links), Blechpaket nach der Demontage (rechts).

Die Auswertung der statistischen Versuchsplanung erfolgt mit der Software Minitab©. Es wird die Standardabweichung der Replikationen innerhalb jeder Parameterkombination ermittelt. Der Mittelwert der Standardabweichung der Maximalkraft beträgt 1,37

kN und der Median 1,26 kN. Für die durchschnittliche Demontagekraft ergeben sich ein Mittelwert der Standardabweichung von 0,27 kN und ein Median von 0,20 kN. Für eine verbesserte statistische Auswertung wird die Anzahl der Replikationen für alle weiteren Versuche auf fünf erhöht.

Die Variation der Demontagesequenz zeigt keinen signifikanten Einfluss. Zur Visualisierung der anderen Faktoren werden Haupteffektediagramme genutzt. Abbildung 7-8 zeigt das Haupteffektediagramm für die maximale Demontagekraft.

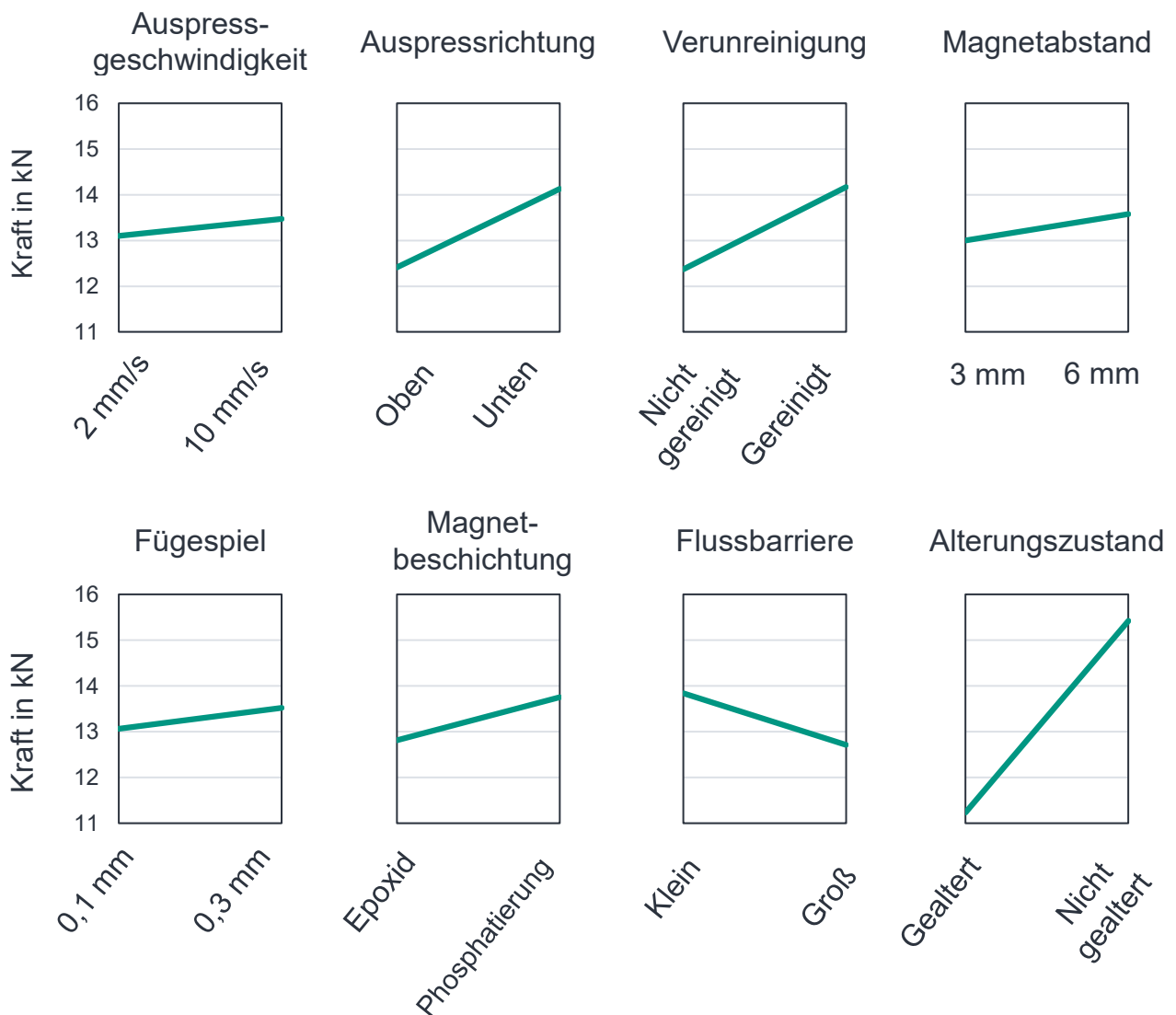


Abbildung 7-8: Haupteffektediagramm für die maximale Demontagekraft beim Screening Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 5)).

Den größten Einfluss auf die Demontagekraft besitzt der Alterungszustand. Die erhöhte Temperatur kann eine Degradation des Klebstoffs verursachen. Zudem können mechanische Lasten zu Mikrorissen führen. Verunreinigungen während der Montage führen ebenfalls zu einer reduzierten Maximalkraft aufgrund verringerter Adhäsion. Das Auspressen von oben reduziert ebenfalls die Demontagekraft. Kleine Flussbarrieren haben eine größere Auspresskraft zur Folge. Alle weiteren Effekte liegen unterhalb des standardisierten Effekts und sind daher im Vergleich zur Streuung zu gering.

Das Haupteffektediagramm der Magnetbeschädigung ist in Abbildung 7-9 abgebildet.

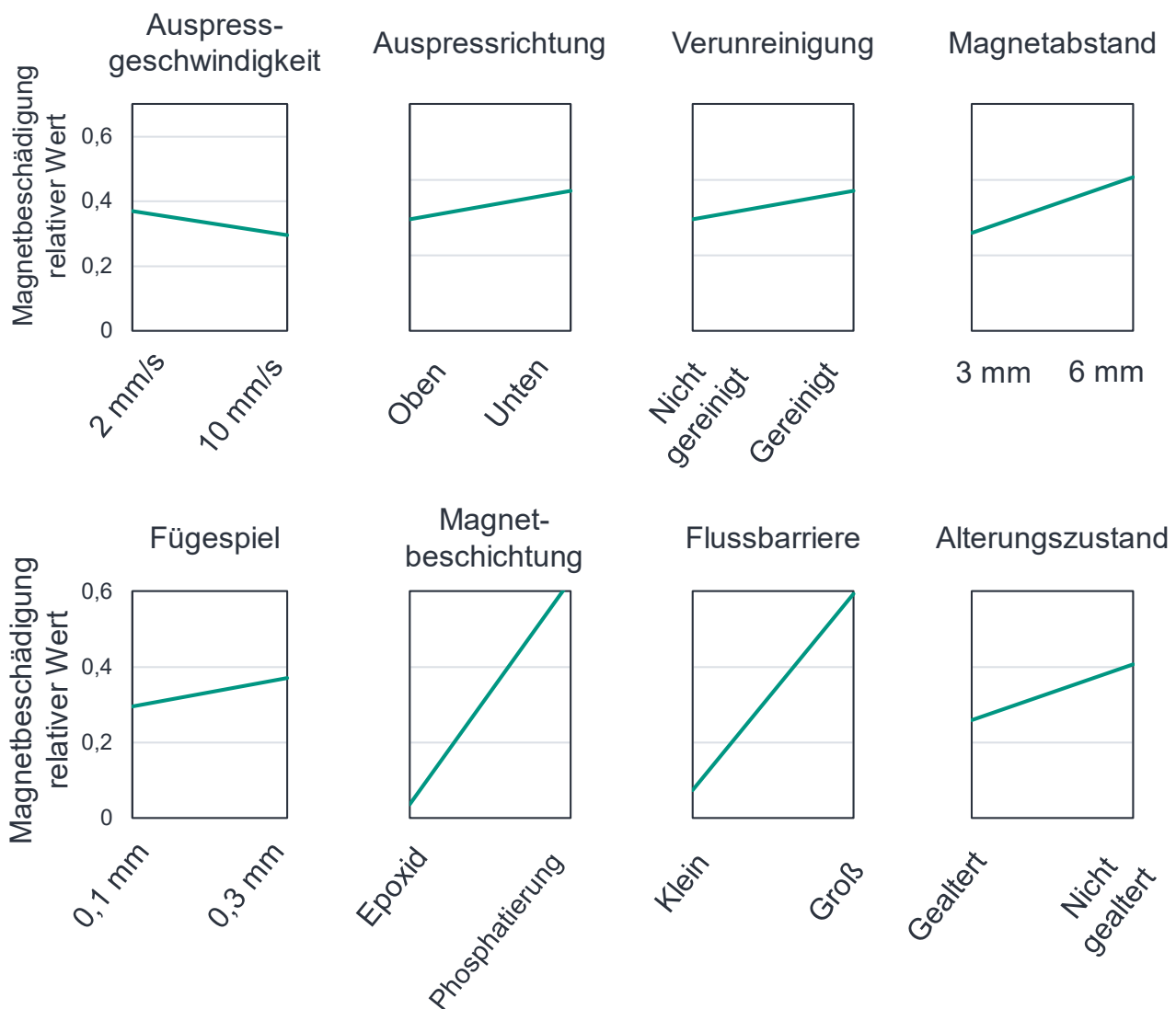


Abbildung 7-9: Haupteffektediagramm für die Magnetbeschädigung beim Screening  
Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 5)).

Es ist zu erkennen, dass die Effekte für die Magnetbeschädigung und maximale Demontagekraft nicht korrelieren. Somit ist die maximale Demontagekraft allein nicht ausschlaggebend für die Magnetbeschädigung. Den größten Einfluss auf die Magnetbeschädigung besitzt die Magnetbeschichtung. Bei einer Epoxidbeschichtung treten kaum Magnetbeschädigungen auf. Die Epoxidbeschichtung stellt im Vergleich zur Phosphatierung eine zusätzliche Schicht für den Magneten dar und kann die auf den Magneten wirkenden Kräfte gleichmäßiger einleiten. Das gleiche Prinzip gilt für die Klebstoffschicht beim Auspressen von der Oberseite, jedoch in geringerem Maß. Die Gestaltung der Flussbarriere weist ebenfalls einen großen Einfluss auf. Obwohl bei der kleinen Flussbarriere die maximale Auspresskraft größer ist, treten dort deutlich weniger Beschädigungen auf. Das Ergebnis legt nahe, dass unterschiedliche Spannungsverteilungen vorliegen, die eine Beschädigung begünstigen oder vermeiden. Alle weiteren Faktoren weisen einen geringen Einfluss unterhalb des standardisierten Effekts auf.

Das Haupteffektediagramm für Kleberückstände am Magneten ist in Abbildung 7-10 dargestellt. Der einzige signifikante Einfluss ist die Beschichtung. Dies lässt darauf schließen, dass die Adhäsion zwischen den Beschichtungen stark unterschiedlich ist. Dies steht im Widerspruch zu den ähnlich hohen maximalen Auspresskräften bei unterschiedlichen Beschichtungen. Eine unterschiedliche Anhaftung von Magnet und Magnetfixierung bei ähnlichen maximalen Auspresskräften legt nahe, dass die Adhäsion zwischen Magnetfixierung und Magnet und Blechpaket ähnlich ist, sodass beide Verbindungen bei Erreichen eines ähnlich hohen Kraftniveaus versagen.

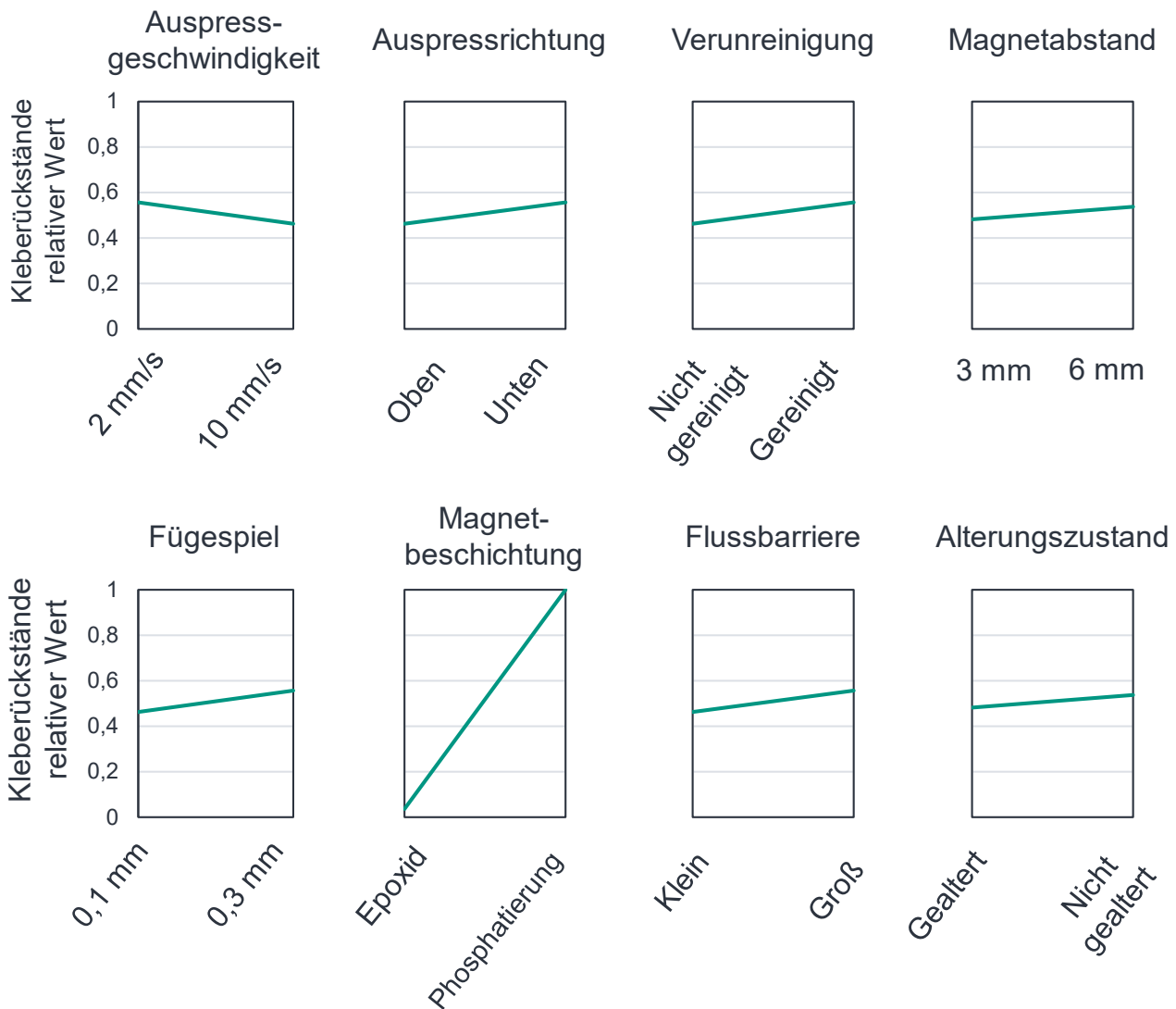


Abbildung 7-10: Haupteffektediagramm für Kleberückstände beim Screening Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 5)).

Das Haupteffektediagramm für die durchschnittliche Demontekraft ist in Abbildung 7-11 dargestellt. Die durchschnittliche Kraft kann Aufschluss über den charakteristischen Kraft-Weg-Verlauf gemäß Abbildung 7-6 geben. Den größten Einfluss auf die durchschnittliche Kraft besitzt die Beschichtung. In Abhängigkeit der Beschichtung kann entweder die Adhäsion zwischen Magnetfixierung und Magnet oder zwischen Magnetfixierung und Blechpaket versagen. Hierdurch entsteht unterschiedliches Reibverhalten und damit unterschiedliche Durchschnittskräfte während der Demontage.

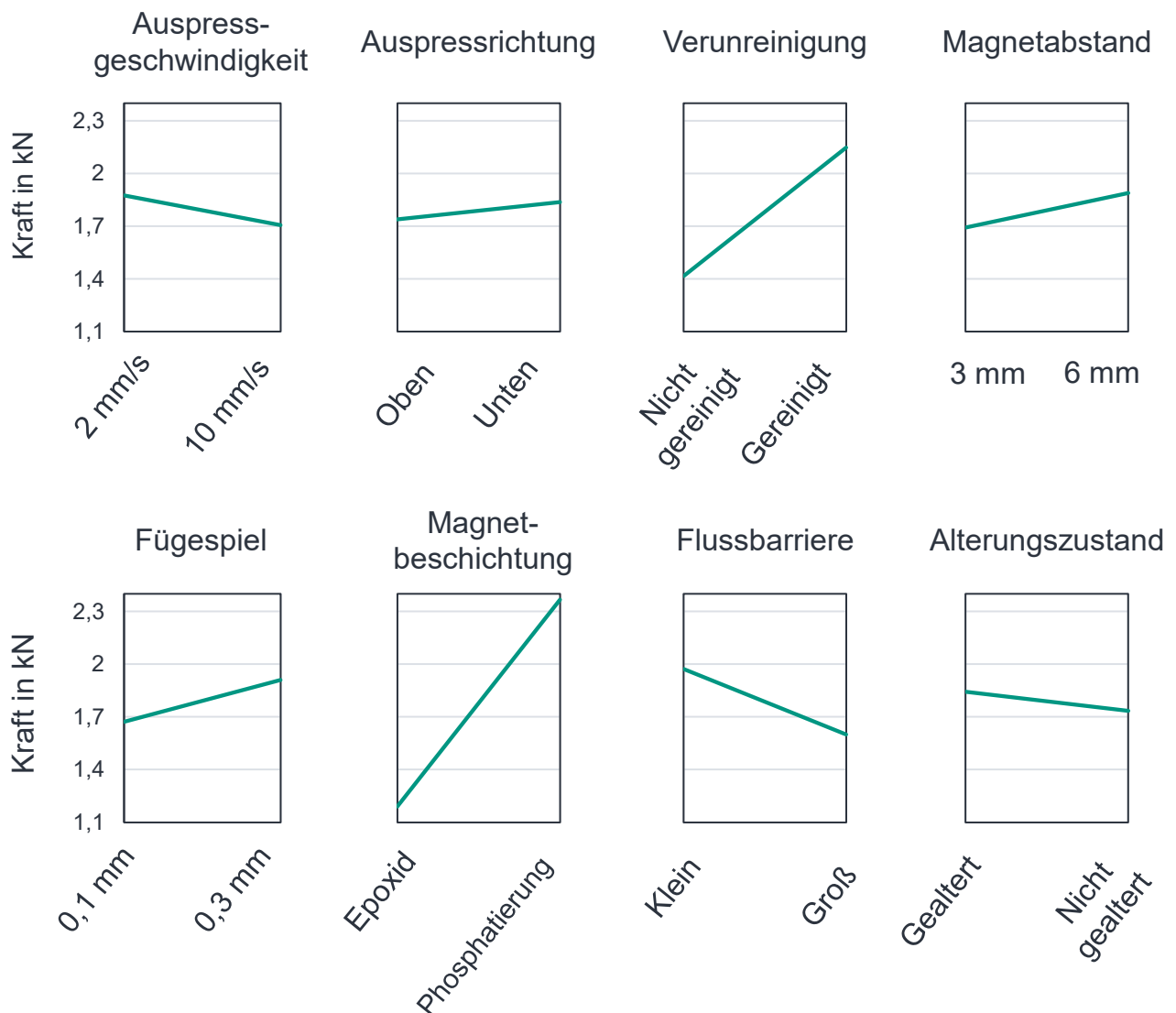


Abbildung 7-11: Haupteffektediagramm für die durchschnittliche Demontagekraft beim Screening Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 6)).

Den zweitgrößten Einfluss stellt die Verunreinigung dar. Durch die Verunreinigungen wird ebenfalls die Adhäsion zwischen der Magnetfixierung und den anderen Komponenten beeinflusst. Dadurch werden die Reibverhältnisse innerhalb der Tasche verändert. Die weiteren Effekte sind statistisch nicht signifikant.

Nach der Betrachtung der Haupteffektediagramme werden die demontierten Magnete optisch untersucht. Eine Auswahl von typischen Magnetzuständen nach der Demontage ist in Abbildung 7-12 dargestellt. Magnet a) mit Epoxidbeschichtung weist einen symmetrischen dreieckförmigen Rückstand der Magnetfixierung im unteren Bereich auf. Diese Form ist auf die Spannungsverteilung innerhalb der Magnetfixierung

zurückzuführen und konnte bereits bei der simulativen Betrachtung der Magnetdemontage in Abbildung 6-3 beobachtet werden. Magnet b) besitzt keine Magnetfixierungsrückstände. An den oberen Ecken ist sogar die Beschichtung vom Magneten abgetragen, was zur Oxidation des Magnetwerkstoffs führt. Zudem zeigt es, dass nicht nur die Adhäsion zwischen Magnetfixierung und Magnet oder Blechpaket, sondern auch zwischen Magnetbeschichtung und Magnet versagen kann.

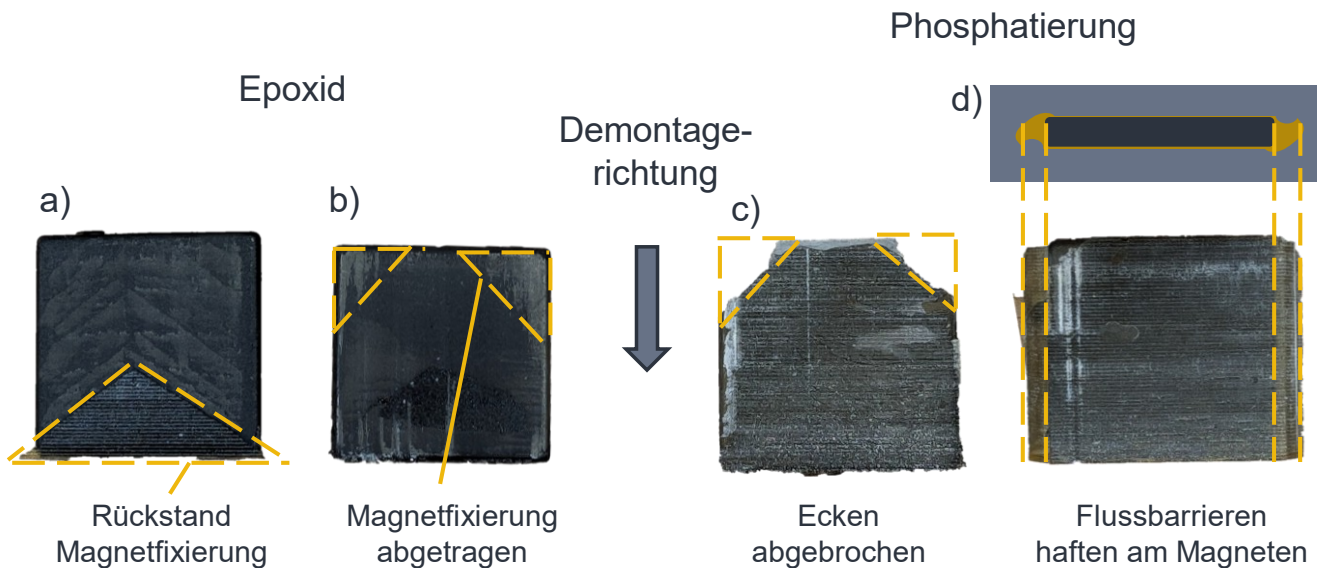


Abbildung 7-12: Magnetzustand nach der Demontage (Heim et al. 2024, S. 6).

Magnet c) mit Phosphatierung zeigt ein typisches Schadensbild der Magnete mit abgebrochenen Ecken. Bei den phosphatierten Magneten haftet die Magnetfixierung an den Magneten. Zudem ist in horizontaler Richtung eine lamellare Struktur zu erkennen, welche durch das Blechpaket entsteht. Diese Struktur kann den wellenförmigen Kraftverlauf von Abbildung 7-6 erklären, da bei jeder Welle ein Mikroformschluss zwischen Blechpaket und Magnetfixierung überwunden werden muss, was zudem zu hohen durchschnittlichen Demontagekräften führt. Magnet d) mit kleinen Flussbarrieren hat nach der Demontage die Flussbarrieren auf beiden Seiten am Magneten anhaften. Bei den großen Flussbarrieren konnte dies nicht beobachtet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der größeren Oberfläche die großen Flussbarrieren besser in der Magnettasche haften und nur die kleinen Flussbarrieren beim Auspressen vom Blechpaket abgeschert werden können.

Abschließend gilt, dass die größten Einflussfaktoren die Magnetbeschichtung sowie Alterungszustand sind. Verunreinigungen, Auspressrichtung, Magnetabstand und Füge-spiel werden nicht weiter betrachtet.

### 7.3.1.2 Faktorielle Versuchspläne

Basierend auf den Ergebnissen der Screening Versuchsreihe werden die weiteren Versuche in Abbildung 7-13 definiert und im Folgenden näher beschrieben. Für eine effiziente Untersuchung mit einer realisierbaren Anzahl an Versuchen werden faktorielle Versuchspläne verwendet.

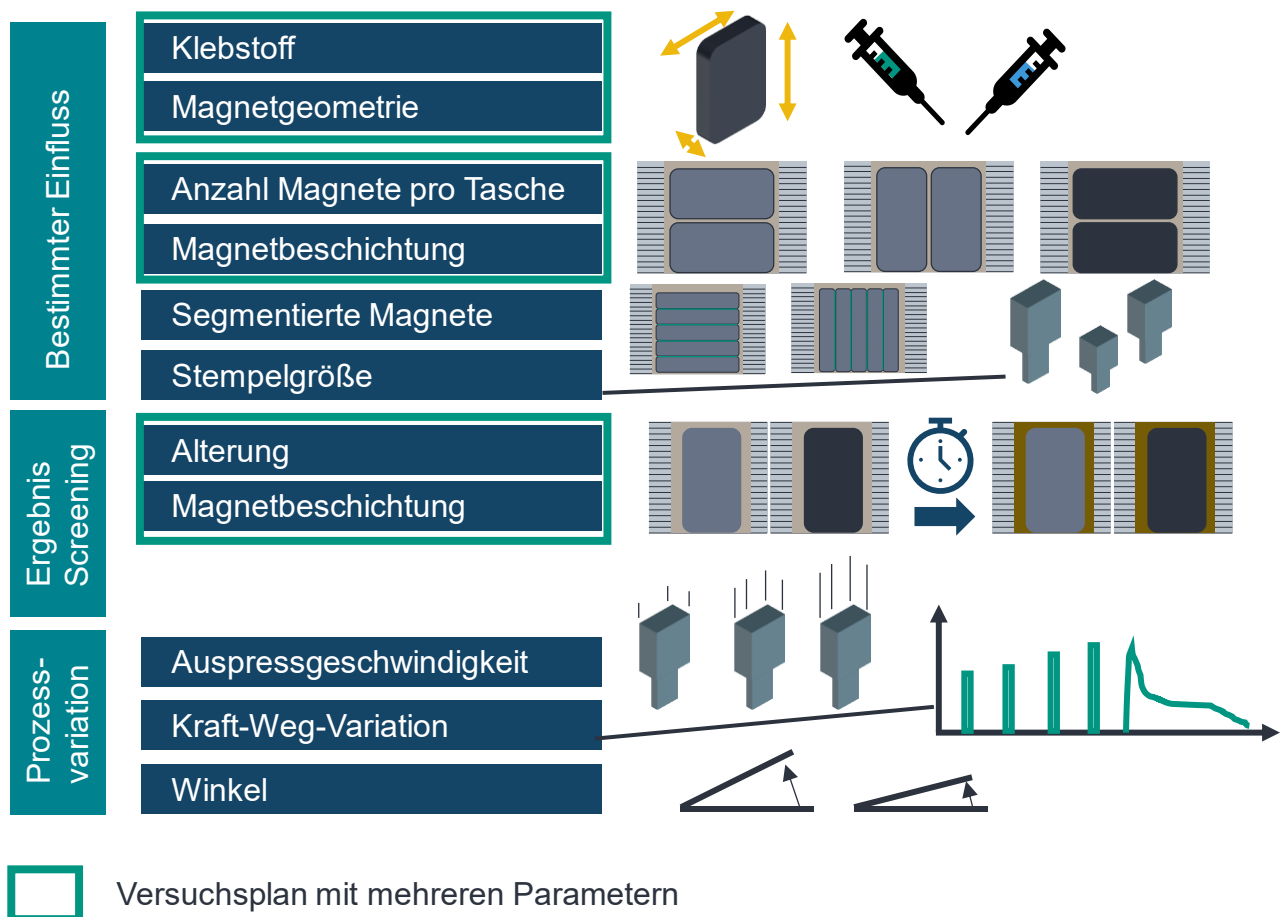


Abbildung 7-13: Definition von weiteren Versuchsreihen zur stoffschlüssigen Magnetfixierung.

Die zuvor mit bestimmtem Einfluss identifizierte Parameter Magnetgeometrie, Klebstoff, Magnetausführung und Stempelgröße werden untersucht. Dabei werden die Magnetgeometrie sowie der Klebstoff zusammen in einem vollfaktoriellen Versuchsplan analysiert, um mögliche Wechselwirkungen zu identifizieren. Die Anzahl der Magnete pro Tasche wird zusammen mit der im Screening als relevant identifizierte

Magnetbeschichtung untersucht. So können Magnetschäden mit den Screening Versuchsergebnissen verglichen werden. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der Magnete wird die Segmentierung als Einzelfaktor untersucht. Die Grenzen der Stempelgröße werden ebenfalls als Einzelfaktor mit der besonders widerstandsfähigen Epoxidbeschichtung untersucht. Der Alterungszustand aus dem Screening wird zusammen mit der Magnetbeschichtung untersucht. Insbesondere die Differenzierung zwischen thermischer und mechanischer Alterung wird betrachtet.

Zusätzlich werden Prozessvariationen betrachtet. Zum einen wird die Auspressgeschwindigkeit untersucht, da diese ausschlaggebend für die Produktivität des Prozesses ist. Im Screening konnte keine Abweichung bei Auspressgeschwindigkeiten von 2 mm/s und 10 mm/s festgestellt werden, daher wird die zu untersuchende Geschwindigkeit weiter erhöht. Es werden Kraft-Weg-Variationen definiert und erprobt, um zu untersuchen, ob unterschiedliche Demontagestrategien zielführend sind. Dies sind beispielsweise sich innerhalb des Prozesses anpassende Geschwindigkeiten und Demontagekräfte. Zuletzt werden Winkelabweichungen im Demontageprozess untersucht. Diese bilden mögliche Abweichungen der Idealgeometrie aufgrund des Alterungsprozesses während des Betriebs, vorhergehender Demontageprozessschritte oder Maschinentoleranzen ab. Aufgrund der im Screening beobachteten Streuung werden für die weiterführenden Versuche fünf Replikationen gewählt.

### **7.3.1.3 Klebstoff**

Klebstoff und Magnetgeometrie werden mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan untersucht. Es werden vier unterschiedliche Klebstoffe und Magnetgrößen getestet. Bei fünf Replikationen ergeben sich 80 Versuche. Da bei der Versuchsauswertung keine Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Magnetgeometrie festgestellt werden konnten, werden diese Einflussparameter im weiteren Verlauf unabhängig voneinander analysiert.

Es wurden die vier Klebstoffe von Tabelle 7-4 ausgewählt, die ein Spektrum an Eigenschaften abbilden und realistisch für den Einsatz als Magnetverklebung sind.

Tabelle 7-4: Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (Delo 2023; Delo 2024; Elantas 2009; Elantas 2013)

Nr.	Bezeichnung	Art	Max. Betriebstemperatur	Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung in %
1	Elan-tron EC5000/W5690	2-Komponenten Epoxid	155 °C	55 bis 65	3.500 bis 4.500	5 bis 8
2	Elan-tron EC5100/W5620	2-Komponenten Epoxid	155 °C	65 bis 75	3.000 bis 3.600	4 bis 6
3	DELO-ML DB140	UV- härtend	180 °C	30	900	30
4	DELO MONOPOX HT 2999	1-Komponenten warmhärtend	220 °C	54	4.400	1

Bei den Klebstoffen Elan-tron EC5000/W5690 und Elan-tron EC5100/W5620 des Herstellers Elantas handelt es sich jeweils um einen 2-Komponenten Epoxid Klebstoff. Der Klebstoff DELO-ML DB140 des Herstellers Delo ist ein UV-härtender Klebstoff, der im Vergleich einen geringen E-Modul und eine sehr hohe Bruchdehnung aufweist. Da nicht die gesamte Tasche für die UV-Bestrahlung zugänglich ist, erfolgt zunächst ein Aushärten durch UV-Bestrahlung gefolgt von einer thermischen Aushärtung. Der 1-Komponenten und wärmehärtender Klebstoff DELO MONOPOX HT 2999 weist ein sprödes Verhalten mit relativ hohem E-Modul und geringer Bruchdehnung auf.

Nach der Herstellung der Versuchsträger werden diese analog zum Screening Versuchsplan thermisch gealtert, um realitätsnahe Produktzustände zu schaffen.

Die Haupteffektediagramme für die maximale Demontagekraft und die Magnetbeschädigung sind in Abbildung 7-14 dargestellt. Die höchsten Demontagekräfte sind für den Klebstoff DELO MONOPOX HT 2999 erforderlich, der sich durch den höchsten E-Modul sowie eine hohe Zugfestigkeit auszeichnet. Obwohl die Klebstoffe von Elantas ähnliche Materialdaten aufweisen, sind deren Demontagekräfte geringer. Mögliche Gründe sind unterschiedliche Sicherheiten der Hersteller in Bezug auf die Betriebstemperatur, sodass die thermische Alterung unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Zudem erfolgt die Ermittlung der Materialkennwerte von Herstellern meist in Anlehnung an Normen, wobei nicht alle Versuchsparameter definiert sind. Außerdem ist die Erfassung der Adhäsionskräfte aufgrund der nahezu unbegrenzten Möglichkeiten an

Materialkombinationen schwierig umzusetzen. Die Anhaftung an Magnet und Blechpaket kann lediglich auf Basis ähnlicher Materialien abgeschätzt werden.

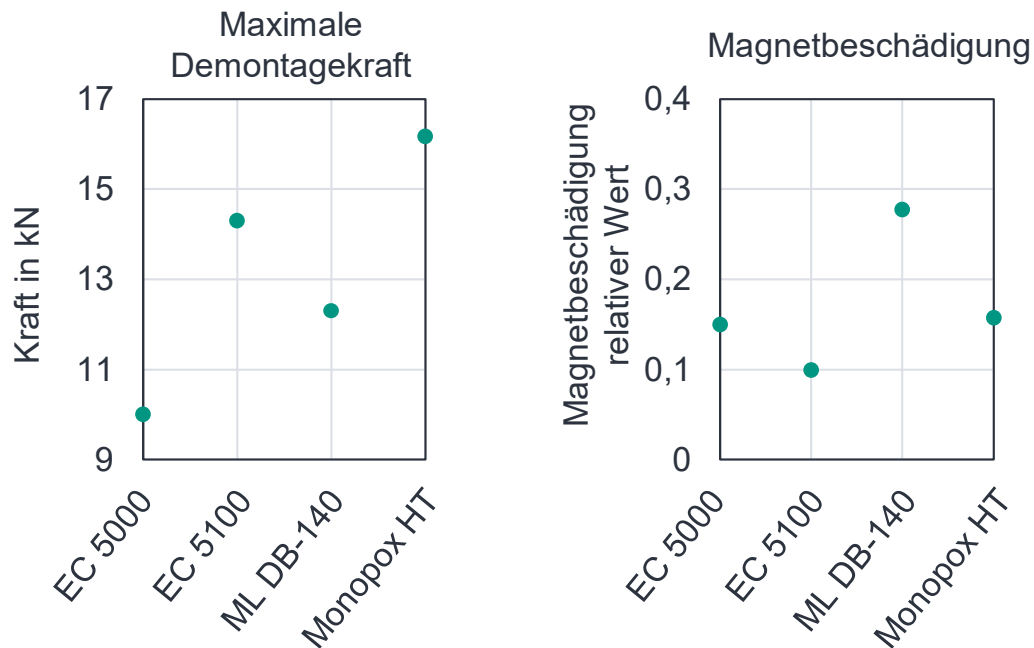


Abbildung 7-14: Haupteffektdiagramme für die maximale Demontagekraft und Magnetbeschädigung bei unterschiedlichen Klebstoffen (eigene Darstellung (A\_Claassen 2024, S. 72, 74)).

DELO MONOPOX HT 2999 erfordert eine 31 % höhere Demontagekraft im Vergleich zu DELO-ML DB140, während die Zugfestigkeit um 80 % und das E-Modul um 388 % erhöht sind und die Bruchdehnung deutlich verringert ist. Zwischen EC5000 und EC5100 besteht eine Steigerung der maximalen Auspresskraft von 10,01 kN auf 14,30 kN, was einem Anstieg von 43 % entspricht. Während die Zugfestigkeit um 14 % steigt, sinken der E-Modul um 17,5 % sowie die Bruchdehnung um 23 %.

Bei der Magnetbeschädigung für unterschiedliche Klebstoffe in Abbildung 7-15 links liegt im Gegensatz zur maximalen Demontagekraft keine statistische Signifikanz vor.

#### 7.3.1.4 Magnetgeometrie

Die vier verwendeten Magnete sind in Tabelle 7-5 eingetragen. Die Höhe der Magnete entspricht der axialen Höhe des Blechpakets und die Breite ist jeweils die schmale Seite des Magneten. Zur Reduktion der Teilevielfalt werden Magnet zwei und vier aus dem Bestand genutzt. Zusätzlich wird Magnet eins beschafft, der der halben Größe von Magnet vier entspricht. Magnet eins und drei sind identisch, werden aber in

unterschiedlicher Orientierung eingesetzt. Alle Magnete sind phosphatiert und besitzen die Magnetgrades 42UH und 44UH.

Tabelle 7-5: Verwendete Magnete für die Versuchsdurchführung.

Nr.	Höhe	Breite	Länge	Grade	Hersteller
1	10,6	4,8	21,3	44UH	Fujian Golden Dragon
2	21,3	4,0	14,0	42UH	Ningbo Yunsheng
3	21,3	4,8	10,6	44UH	Fujian Golden Dragon
4	21,3	4,8	21,6	44UH	Fujian Golden Dragon

Für die Demontage des Magneten Nummer drei wird ein Stempel mit der Querschnittsfläche  $8,0 \times 3,0$  mm verwendet, für die anderen wird ein Stempel mit der Querschnittsfläche  $11,0 \times 8,0$  mm eingesetzt. Magnet eins wird in ein Blechpaket mit einer Höhe von 10,6 mm fixiert. Für die anderen Magnete werden Blechpakete der Höhe 21,6 mm verwendet.

Das Haupteffektediagramm für die maximale Demontagekraft ist in Abbildung 7-15 dargestellt.

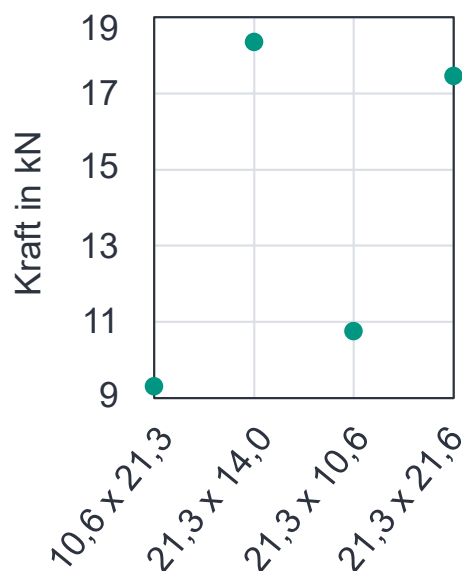


Abbildung 7-15: Haupteffektediagramm für die maximale Demontagekraft bei unterschiedlichen Magnetgeometrien (eigene Darstellung (A\_Claassen 2024, S. 72)).

Die Magnetgrößen  $10,6 \times 21,3$  mm und  $21,3 \times 10,6$  mm erfordern in beiden Orientierungen ähnliche Demontagekräfte, wobei höhere Kräfte in der vertikalen Einbausituation zu beobachten sind. Die Magnete mit  $21,3 \times 14,0$  mm und  $21,3 \times 21,6$  mm weisen ähnlich hohe maximale Demontagekräfte auf, obwohl der kleinere Magnet eine 46 %

geringere Klebefläche besitzt. Die kleinen Magnete mit den halben Abmessungen benötigen im Vergleich zu den großen Magneten deutlich geringere Demontagekräfte. Der Kraftabfall beträgt weniger als 50 %. Bei den vertikalen Magneten mit  $21,3 \times 10,6$  mm und  $10,77$  kN ist der Abfall im Vergleich zu  $17,48$  kN bei 38 %. Die horizontal orientierten Magnete weisen mit  $9,31$  kN einen Abfall von 47% auf.

Die Magnete mit den Abmessungen  $21,3 \times 14,0$  mm erfordern die höchsten Demontagekräfte. Auffällig dabei ist, dass diese Magnete von einem anderen Hersteller gefertigt wurden. Im direkten optischen Vergleich fällt auf, dass die Magnete mit  $21,3 \times 14,0$  mm im Vergleich zu den beiden anderen Magnetgeometrien einen unterschiedlichen Farbton aufweisen. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Phosphatierung bei den Herstellern unterschiedlich umgesetzt wird, was zu einer stark abweichenden Adhäsion führt.

Die Auswertung der Durchschnittskraft innerhalb dieser Versuchsreihe zeigt einen Verlauf analog zur maximalen Demontagekraft, es sind keine weiteren Auffälligkeiten zu erkennen. Bei den Kleberückständen an den Magneten treten keine Besonderheiten auf.

Das Haupteffektediagramm für die Beschädigung der Magnete sowie Schadensbilder sind in Abbildung 7-16 abgebildet.

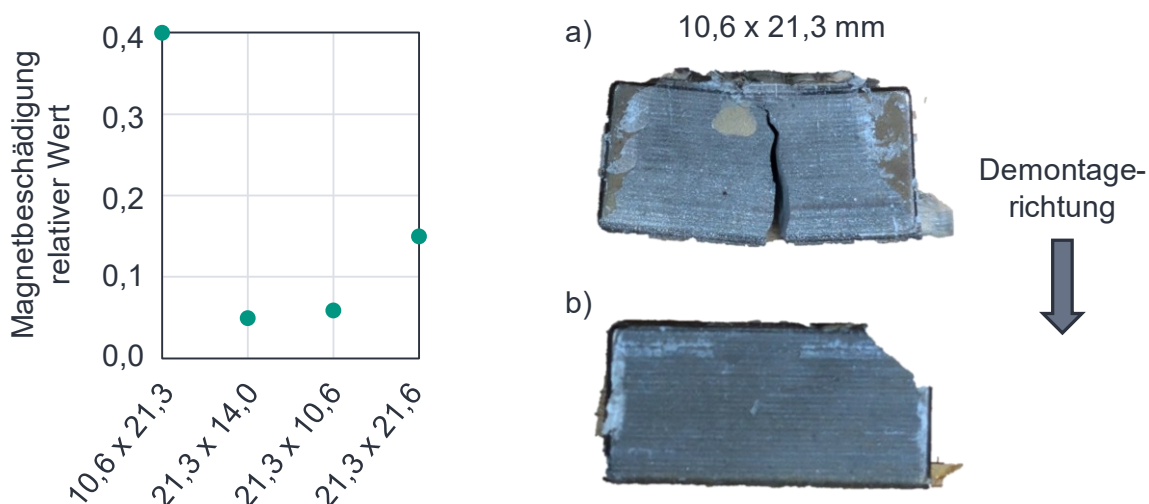


Abbildung 7-16: Haupteffektediagramm für die Magnetbeschädigung bei unterschiedlichen Magnetgeometrien (links), Schadensbilder (rechts) (eigene Darstellung (A\_Claassen 2024, S. 74)).

Die Magnetgeometrie mit  $10,6 \times 21,3$  mm weist die höchste Schadensquote auf, obwohl diese die geringste Demontagekraft besitzt. Da der gleiche Magnet in anderer Orientierung nicht beschädigt wird, spielt das Seitenverhältnis eine entscheidende Rolle. In Abbildung 7-16 ist zusätzlich zu erkennen, dass neben dem typischen Schadensbild mit abgebrochener oberer Ecke bei b) ein Bruch des Magneten in der Mitte bei a) auftritt. Kritische Spannungen aus den Versuchsergebnissen werden im Kapitel 7.3.1.11 im Detail analysiert und mit dem entwickelten Schadensmodell abgeglichen.

### 7.3.1.5 Magnetausführung

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Magnetausführungen untersucht, dargestellt in Abbildung 7-17. Diese umfassen mehrere Magnete innerhalb einer Tasche sowie die Verwendung von segmentierten Magneten, welche aus mehreren kleineren Magneten bestehen, die vor der Montage in das Blechpaket miteinander verklebt wurden.

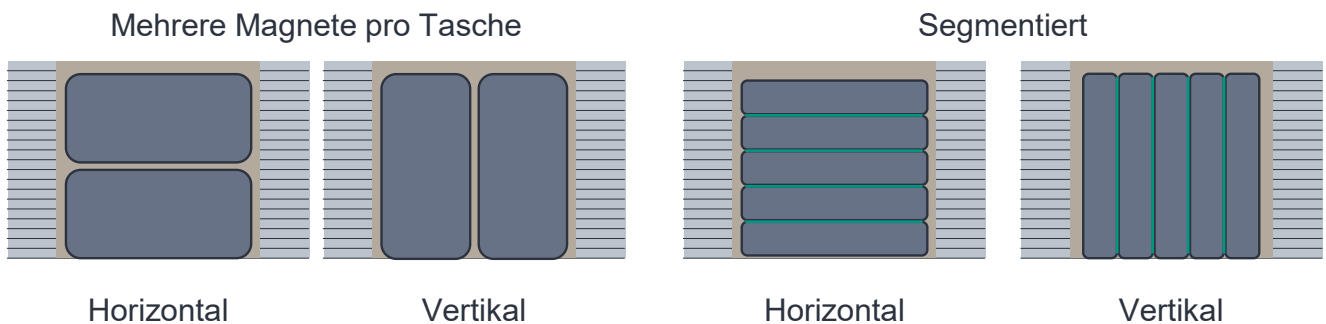


Abbildung 7-17: Unterschiedliche Magnetausführungen.

#### 7.3.1.5.1 Mehrere Magnete pro Tasche

Es wird die vertikale sowie die horizontale Anordnung mit jeweils den gleichen Magneten untersucht. Da das Seitenverhältnis der Magnete bei 1:2 liegt, ist dies mit nur einer Magnettaschengeometrie umsetzbar. Neben der Orientierung der Magnete wird ebenfalls die Beschichtung mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan untersucht, da diese einen großen Einfluss auf die Schädigung der Magnete aufweist. Es wird der Klebstoff EC5000 verwendet und fünf Replikationen durchgeführt.

Die Auswertung der maximalen Demontagekräfte zeigt weder für die Orientierung noch für die Beschichtung statistische Signifikanz auf. Für die durchschnittliche Demontagekraft besteht bezüglich der Orientierung keine statistische Signifikanz. Magnete mit Epoxidbeschichtung weisen analog zum Screening Versuchsplan höhere

durchschnittliche Demontagekräfte und weniger Kleberückstände auf. Klebereste am Magneten werden durch die Magnetorientierung nicht beeinflusst. Die Beschädigung der Magnete wird von der Beschichtung beeinflusst. Die Phosphatierung begünstigt auftretende Beschädigungen.

Bilder von demontierten Magneten sind in Abbildung 7-18 dargestellt. Die Magnete in a) konnten in gutem Zustand mit nahezu keinen Kleberückständen demontiert werden. In b) mit der horizontalen Magnetanordnung sind ebenfalls keine Kleberückstände vorhanden, allerdings ist die Epoxidbeschichtung am oberen Magneten fast vollständig abgetragen. Dieser Effekt tritt ausschließlich bei der horizontalen Anordnung auf. Vermutlich führt ein minimaler Versatz zwischen den Magneten zu diesem Effekt.

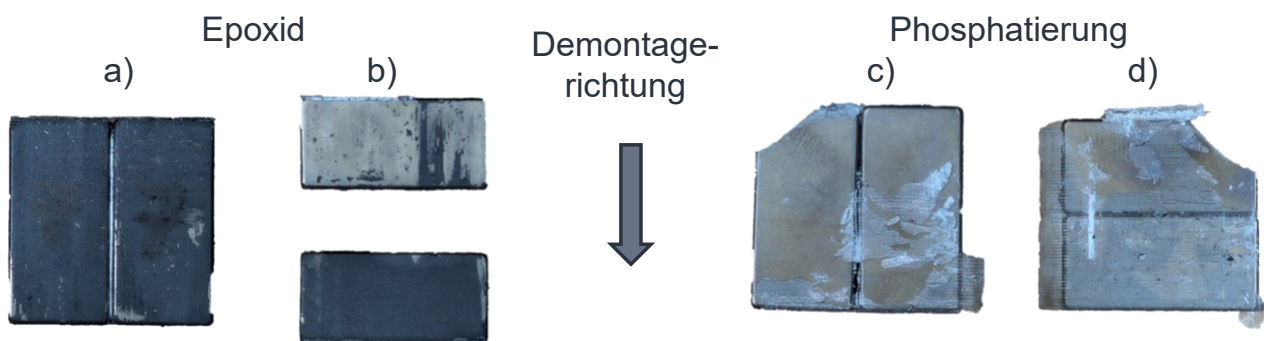


Abbildung 7-18: Magnetzustand nach der Demontage bei mehreren Magneten pro Tasche.

Die Magnete mit Phosphatierung weisen distinktive Schadensbilder auf. Es kommt zum Bruch an der oberen Ecke des Magneten. Bei horizontal angeordneten Magneten kommt es viermal zum Bruch während bei vertikal angeordneten Magneten zwei Magnete brechen. Die Demontagekraft bei beiden Anordnungen befindet sich dabei auf dem gleichen Niveau.

Die Quantifizierung der Biegespannung stellt sich als herausfordernd dar, da die Einzelmagnete durch die Magnetfixierung miteinander verbunden sind, weshalb sie weder als zwei unabhängige noch als ein einziges Bauteil betrachtet werden können. Zudem ist die Belastbarkeit durch die Magnetverbindung mittels Magnetfixierung schwer zu quantifizieren.

Bei den Versuchsreihen kommt es zu keinem Bruch bedingt durch Biegespannungen. Im Gegensatz dazu traten beim vorhergehenden Versuchsplan bezüglich Magnetgeometrie bei den gleichen Magneten biegespannungsinduzierten Brüche auf, wenn sie

als Einzelmagnet eingebaut wurden. Daher muss davon ausgegangen werden, dass bei der Berechnung der Biegespannung nicht der einzelne Magnet betrachtet werden kann. Bei den gegebenen Demontagekräften von ca. 17 kN ergibt sich bei der Betrachtung des Einzelmagneten eine Biegespannung von 343,43 N/mm<sup>2</sup>. Dieser Wert würde zu einem Versagen aufgrund von Biegespannung führen. Die berechnete Biegespannung mit der Höhe der beiden Magneten als ein einzelnes Bauteil beträgt 85,05 N/mm<sup>2</sup>. Dies ist ebenfalls unrealistisch, da es sich um zwei unterschiedliche Magnete handelt. In der Realität wird sich der Wert, in Abhängigkeit der Verklebung, im Bereich dazwischen befinden.

### **7.3.1.5.2 Segmentierte Magnete**

In diesem Abschnitt werden segmentierte Magnete in vertikaler sowie horizontaler Anordnung demontiert. Die epoxidbeschichteten Magnete mit den Abmaßen 21,3 × 21,6 × 4,8 mm bestehen aus fünf miteinander verklebten Segmenten, dargestellt in Abbildung 7-17 rechts.

Vor den Demontageversuchen wird zunächst die Klebeverbindung zwischen den Magnetsegmenten untersucht. In einer Zwick Roell Universalprüfmaschine werden drei der fünf Segmente zur Bestimmung der Scherfestigkeit vertikal fest eingespannt und mit einem Stempel auf die anderen beiden Segmente gepresst. Der Versuch wird fünfmal wiederholt. Die Scherkräfte liegen zwischen 4,0 und 5,1 kN. Dieser Wert liegt unterhalb der typischen Demontagekräfte.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe zeigen, dass im Vergleich von horizontaler sowie vertikaler Orientierung keine statistisch signifikanten Effekte bezüglich der maximalen und durchschnittlichen Demontagekraft auftreten. Der Vergleich zwischen beiden Segmentierungen und regulären Magneten zeigt eine stark gesteigerte Magnetbeschädigung bei der Segmentierung. Bei den gleichen Demontageparametern in Kapitel 7.3.1.3 sind bei nicht segmentierten Magneten der gleichen Größe keine Beschädigungen aufgetreten. Die Schadensbilder für die segmentierten Magnete sind in Abbildung 7-19 abgebildet.

Die vertikal segmentierten Magnete brechen vertikal entlang der Segmentierung. Dies geschieht entweder entlang der gesamten Segmentierung oder mit einem vorherigen Einriss. Die horizontal segmentierten Magnete weisen analog zu regulären Magneten eine abgebrochene obere Ecke auf, wobei der Bruch nach unten bis zur ersten Segmentierung verläuft und sich anschließend horizontal fortsetzt. Die zuvor in Kapitel 6

getroffene Annahme, dass ein Versagen des Magneten rein aufgrund von Scherkräften nicht auftritt, gilt für segmentierte Magnete nicht mehr, da die Scherfestigkeit der Klebeverbindung in der gleichen Größenordnung mit der Scherfestigkeit der Magnetfixierung liegt.



Abbildung 7-19: Magnetzustand nach der Demontage segmentierter Magnete.

Des Weiteren werden Versuche mit unterschiedlichen Stempelgrößen bei der Demontage von segmentierten Magneten ergänzt. Da in den vorherigen Versuchen bereits viele Magneten zerstört wurden, wird ein Stempel mit der Querschnittsfläche  $17,5 \times 3,15$  mm anstatt  $11,0 \times 3,0$  mm verwendet. Bei der horizontalen Segmentierung werden 80 % der Magnete zerstört, wobei die abgebrochenen Ecken kleiner sind, als bei den vorherigen Demontageversuchen. Bei vertikaler Segmentierung versagen lediglich 20 % der Magnete. Bei der vertikalen Segmentierung beträgt die Segmentbreite 4,26 mm. Bei einer Stempelseite von 17,5 mm und 21,3 mm Magnetlänge ergeben sich lediglich 1,9 mm Abstand vom Stempel zum Rand, was geringer ist, als die Segmentbreite. Daher sollte sichergestellt sein, dass bei vertikaler Segmentierung der Stempel im Eingriff mit allen Segmenten ist, um eine zerstörungsfreie Demontage zu ermöglichen. Gleichzeitig zeigt es, dass eine vertikale Anordnung zu bevorzugen ist.

### 7.3.1.6 Stempelgröße

Die Stempelgröße besitzt einen großen Einfluss auf die Flächenpressung. Ein kleiner Stempel ermöglicht allerdings eine Anwendung auf verschiedenste Magnetgeometrien ohne Werkzeugwechsel. Indirekt konnte der Einfluss der Stempelgröße bereits bei vorherigen Versuchen analysiert werden. In diesem Abschnitt wird ein Stempel mit verringerter Querschnittsfläche eingesetzt, um dessen Einfluss zu untersuchen. Es werden

Magnete mit Epoxidbeschichtung genutzt, da phosphatierte Magnete bereits mit dem bisherigen Stempel beschädigt wurden. Ein zu geringer Querschnitt des Stempels kann unter Belastung zum Knicken führen, weshalb das Design in Abbildung 7-20 genutzt wird. Die Querschnittsfläche des Stempels ist um ca. 25 % reduziert.

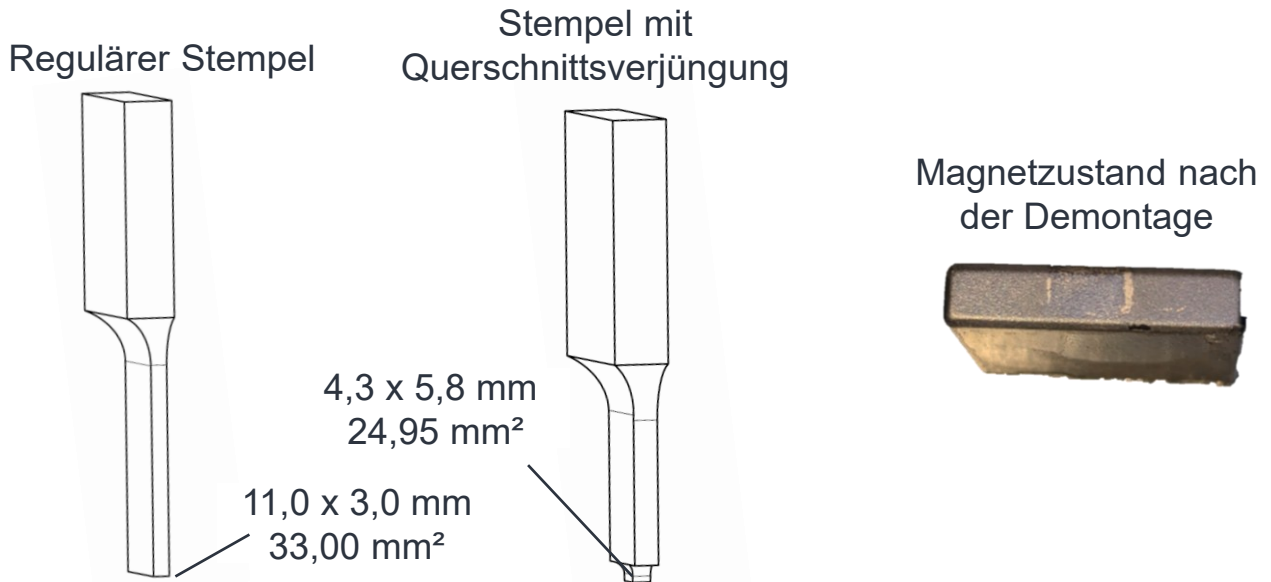


Abbildung 7-20: Stempelgeometrie (links), Magnetzustand nach der Demontage (rechts).

Die Ergebnisse der Versuchsreihe zeigen, dass es trotz der geringen Stempelgröße zu keiner Zerstörung der Magnete kommt. An der Oberseite des Magneten ist aufgrund des Kontakts mit dem Stempel lediglich eine leichte Abnutzung der Epoxidbeschichtung festzustellen. Bei der maximal auftretenden Demontagekraft von 18,56 kN und dem Querschnitt von 24,95 mm<sup>2</sup> erreicht die Flächenpressung einen Wert von 743,89 N/mm<sup>2</sup>. Der Spannungsüberhöhungsfaktor der Magneten mit Epoxidbeschichtung ist daher nahe 1,0 anzunehmen. Die Biegespannung bei 18,56 kN Auspresskraft beträgt 126,1 N/mm<sup>2</sup> und ist damit deutlich weniger kritisch als die Druckspannung.

### 7.3.1.7 Mechanische und thermische Alterung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Alterungszustandes mechanisch und thermisch differenziert voneinander untersucht. Aufgrund des ebenfalls hohen Einflusses der Beschichtung wird diese in den Versuchsplan integriert, um mögliche Wechselwirkungen zu ermitteln. Es wird der Klebstoff EC5000 verwendet. Im Screening hatte der Alterungszustand den größten Einfluss auf die Maximalkraft. Die thermische Alterung

erfolgt analog zu Kapitel 7.3.1.1 mit 5 °C über der Betriebstemperatur und die mechanische Alterung bei 11.000 U/min. Der Einfluss auf die Maximalkraft ist in Abbildung 7-21 dargestellt.

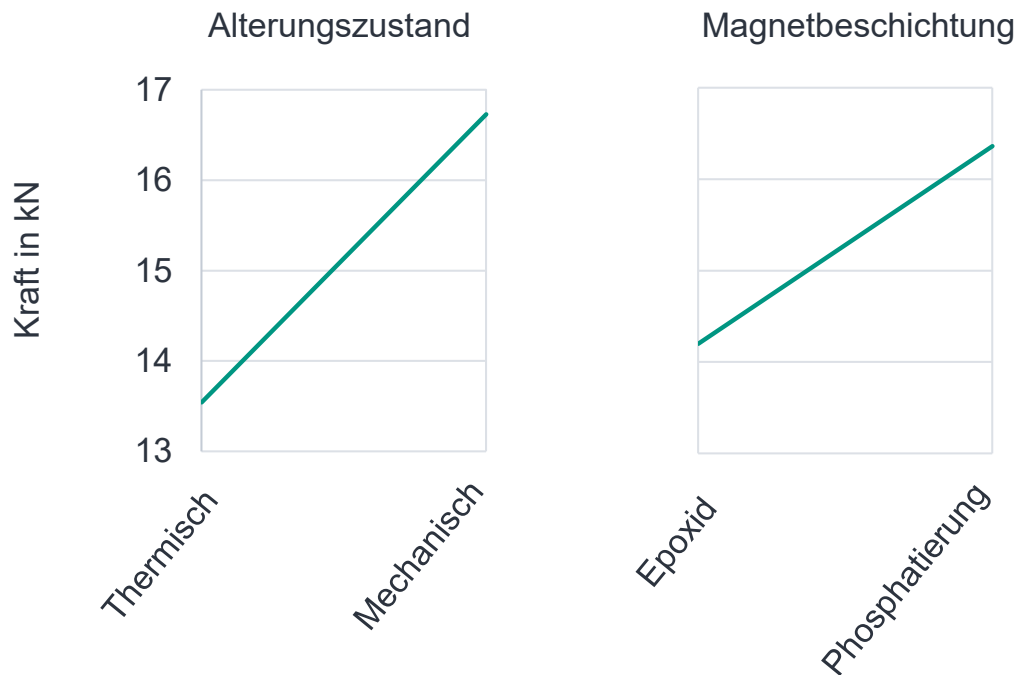


Abbildung 7-21: Haupteffektediagramme für die maximale Demontagekraft bei unterschiedlichem Alterungszustand und unterschiedlichen Magnetbeschichtung (eigene Darstellung (A\_Claassen 2024, S. 63)).

Die Demontagekraft nach thermischer Alterung ist geringer im Vergleich zur mechanischen Alterung. Somit weist die thermische Alterung einen größeren Effekt als die mechanische Alterung auf. Bei der Beschichtung liegt das gleiche Verhalten zu vorherigen Versuchen vor mit geringerer Demontagekraft bei Epoxidbeschichtung. Es konnten keine Wechselwirkungen in Form einer erhöhten Anfälligkeit einer Beschichtung gegenüber mechanischer oder thermischer Alterung festgestellt werden. Für die durchschnittliche Kraft, die Magnetbeschädigung sowie die Klebereste am Magneten konnten keine relevanten Effekte der Alterung beobachtet werden.

Zudem ist die Alterung in Bezug auf den Magnetdemontageprozess nicht als kritisch anzusehen, da durch die Alterung die bei der Demontage auftretenden Kräfte reduziert werden, was die Demontage begünstigt.

### 7.3.1.8 Auspressgeschwindigkeit

Die Auspressgeschwindigkeit besitzt einen besonders hohen Einfluss auf die Produktivität des Demontageprozesses. Obwohl im Screening kein Einfluss bei den Geschwindigkeiten 2 und 10 mm/s identifiziert werden konnte, werden zusätzliche Versuche mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s durchgeführt. Dies entspricht einer Demontagezeit pro Magnet von ca. einer Sekunde bei 21 mm axialer Länge von Magnet und Blechpaket. Die Ergebnisse zeigen, dass hier ebenfalls keine statistisch signifikanten Effekte für die abhängigen Variablen maximale Demontagekraft, durchschnittliche Demontagekraft, Magnetbeschädigung und Kleberückstände am Magneten auftreten. Auffällig ist jedoch, dass die Streuung bei 20 mm/s bei allen abhängigen Variablen erhöht ist.

### 7.3.1.9 Kraft-Weg-Variation als Demontagestrategie

In den bisherigen Versuchen wurde jeweils eine konstante Geschwindigkeit für den gesamten Demontageprozess vorgegeben. Nun werden unterschiedliche Kraft-Weg-Profile definiert, um deren Einfluss zu untersuchen. Eine mögliche Schwächung der Magnetfixierung kann beispielsweise die maximal notwendige Demontagekraft verringern und damit die im Magneten auftretenden Spannungen reduzieren. Die definierten Profile sind in Abbildung 7-22 dargestellt.

Profil 1 beschreibt einen Auspressprozess identisch zu den bisherigen Versuchen. Während sich der Stempel mit konstanter Geschwindigkeit von 10 mm/s bewegt, steigt die Kraft zu Beginn des Auspressprozess stark an und sinkt anschließend wieder ab.

Profil 2 erhöht über den Auspressweg stufenweise die Geschwindigkeit, beginnend mit 10 mm/s für 5 mm über 25 mm/s für 10 mm zu 40 mm/s für den restlichen Weg. Hierdurch wird die Auspressgeschwindigkeit über den Weg und damit bei abnehmender Auspresskraft erhöht.

Profil 3 bis 5 sind Kraftprofile mit zyklischer Belastung. Es wird eine Kraft bis zu einem definierten Schwellwert aufgebracht. Dabei bewegt sich der Stempel nur minimal. Anschließend wird die Kraft auf null reduziert und anschließend eine neue Kraft aufgebracht. Wenn die vorgegebene Kraft nicht erreicht wird, löst sich der Magnet und er wird mit konstanter Geschwindigkeit von 10 mm/s ausgepresst. In Profil 3 wird die Kraft beginnend mit 5 kN in Schritten von 5 kN gesteigert. Profil 4 besitzt eine feinere Abstufung im Vergleich zu Profil 3. Bei Profil 5 wird das gleiche Kraftniveau, beginnend mit

15 kN je 10 mal angefahren bevor die Kraft erhöht wird. So kann untersucht werden, wie sich die wiederholten Kräfteinträge auf den Demontageprozess auswirken.

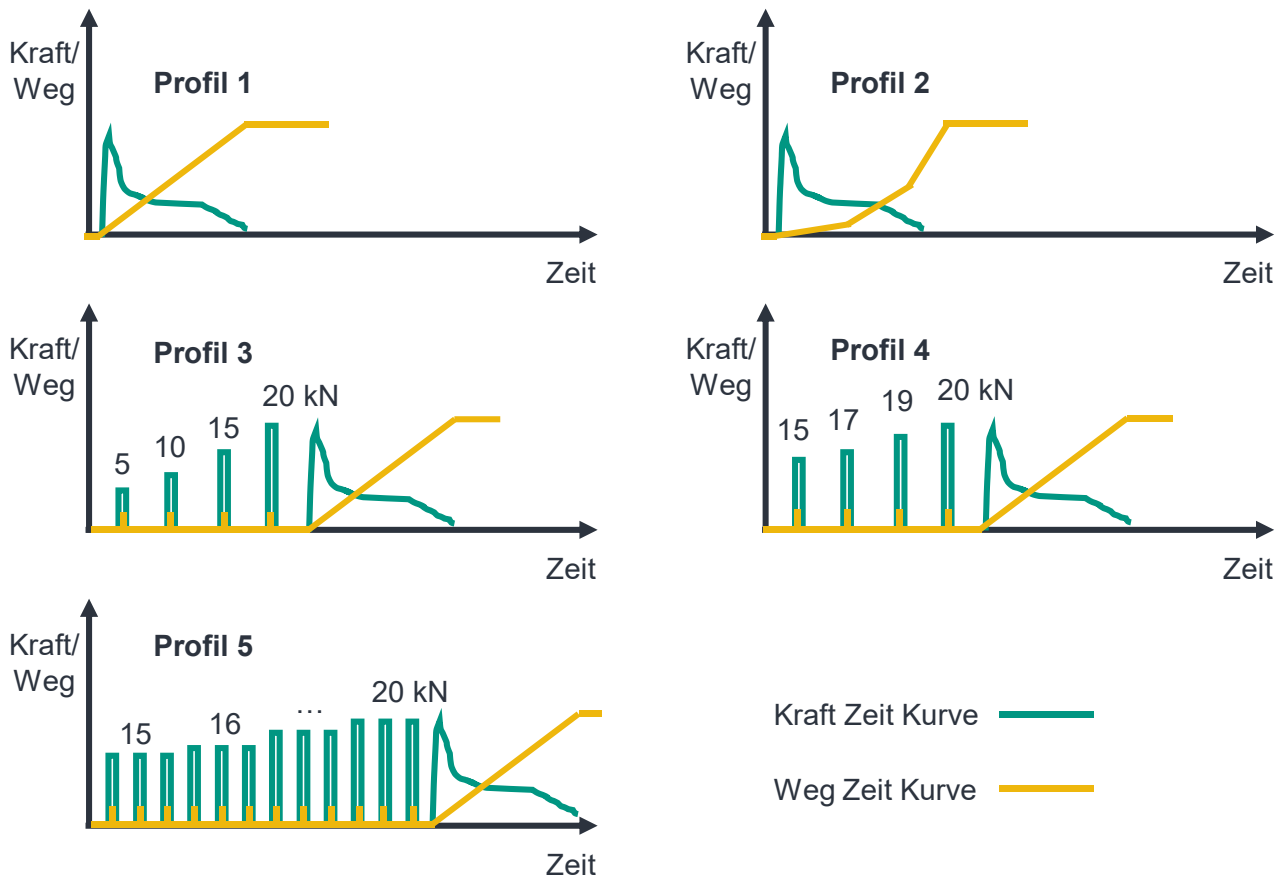


Abbildung 7-22: Eingesetzte Kraft-Weg-Profile für die Demontage.

Die Ergebnisse der maximalen Demontagekraft sind in Abbildung 7-23 dargestellt.

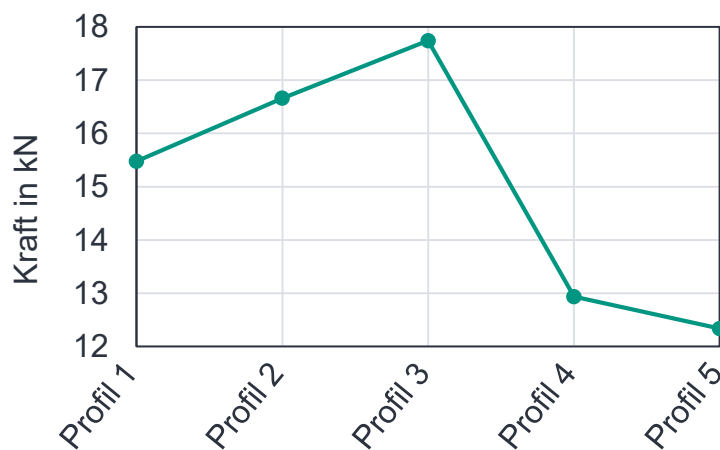


Abbildung 7-23: Maximale Demontagekraft für Geschwindigkeits- und Kraftprofile (eigene Darstellung (A\_Dengel 2024, S. 54).

Profil 2 besitzt eine geringfügig höhere Auspresskraft im Vergleich zu Profil 1. Profil 3 weist die höchste maximale Auspresskraft auf. Die grob untergliederte Steigerung der Auspresskraft besitzt damit einen negativen Einfluss auf die Demontagekraft und die Taktzeit. Durch eine feinere Untergliederung der Kraftsteigerung von Profil 4 sowie dem mehrmaligen Pressen von Profil 5 kann die maximal auftretende Demontagekraft reduziert werden. Die hierfür benötigte Demontagezeit steigt dabei sehr stark an. Die erzielbare Reduktion der Demontagekraft steht gemessen an deren Aufwand in einem schlechten Verhältnis. Daher bietet im Normalfall der reguläre Prozess mit konstanter Geschwindigkeit das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis.

#### **7.3.1.10 Winkelfehler**

Anhand künstlich erzeugten Winkelfehlern wird die Robustheit des Prozesses bezüglich geometrischer Abweichungen des Blechpakets untersucht. Insbesondere undefinierte Produktzustände von End-of-Life Produkten können zu diesen Abweichungen führen. Es werden mögliche Winkelabweichungen von  $0^\circ$ ,  $2^\circ$  und  $4^\circ$  durch Unterlegen einer Vorrichtung realisiert. Der erzeugte Winkelfehler und demontierte Magnete sind in Abbildung 7-24 dargestellt.

Bezogen auf den Magneten können Winkelfehler unterschiedlicher Achsen auftreten. Ein Winkelfehler bezüglich der langen Seite des Magneten ist am kritischsten einzuordnen, da ein relativ geringer Winkelfehler bereits in einem großen absoluten Fehler resultiert. Die Untersuchungen werden auf den kritischen Fall beschränkt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Winkelfehlern keine signifikanten Effekte bezüglich aller abhängigen Variablen auftreten. Der demontierte Magnet in Abbildung 7-24 zeigt, dass beim Auftreffen des Stempels auf der durch den Winkelfehler erzeugten Erhöhung die Magnetbeschichtung in Form des Stempels abgetragen wird. Selbst bei einem Winkelfehler von  $4^\circ$  kommt es nicht zu einem Bruch der Magnete. Der Prozess ist damit in seiner aktuellen Ausführung relativ robust.

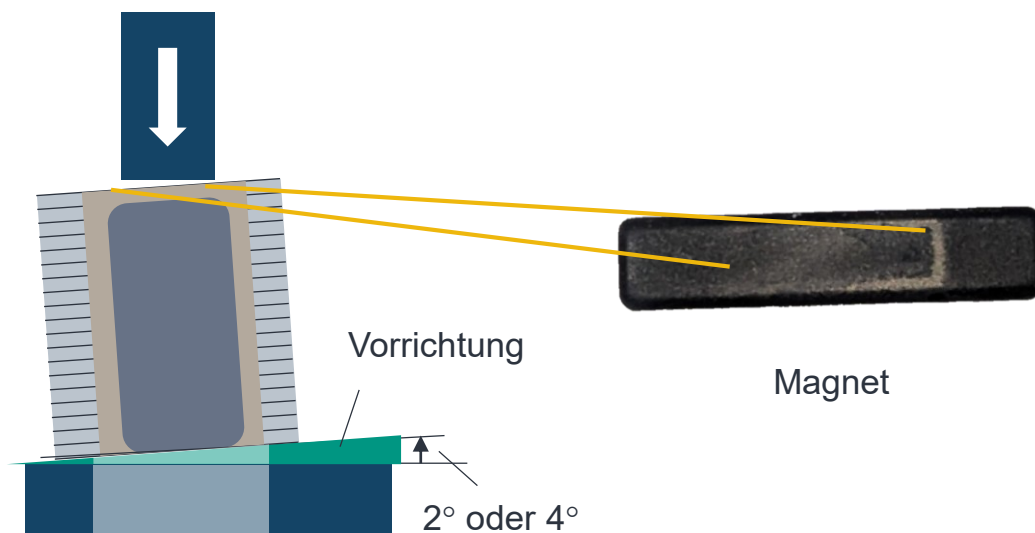


Abbildung 7-24: Versuchsaufbau zum Erzeugen eines Winkelfehlers (links), Magnetzustand nach der Demontage mit Winkelfehler (rechts) (eigene Darstellung (A\_Dengel 2024, S. 53)).

### 7.3.1.11 Kritische Spannungen

Die experimentellen Versuchsergebnisse werden zusammen mit den theoretischen Untersuchungen aus Kapitel 6 zur Abschätzung zulässiger Belastungen im Magnetdemontageprozess verwendet. Hierfür werden kritische Biege- und Druckspannungen sowie der Spannungsüberhöhungsfaktor untersucht.

Zunächst wird der Screening Versuchsplan zur Abschätzung herangezogen, auch wenn aufgrund des Screening Versuchsplans nicht alle Zusammenhänge eindeutig aufgezeigt werden können. Während der Screening Versuche sind keine Magnetbeschädigung aufgrund von Biegung, sondern lediglich abgebrochene Ecken festzustellen. Die deutlich erhöhte Anzahl an zerstörten Magneten mit Phosphatierung zeigt, dass der Spannungsüberhöhungsfaktor durch die Magnetbeschichtung beeinflusst wird. Zudem hat die Gestaltung der Flussbarriere ebenfalls einen Einfluss. Dieser lässt sich aufgrund der vielen möglichen Designs der Flussbarriere schwer quantifizieren, wobei größere Flussbarrieren als kritischer einzustufen sind.

Mit einer durchschnittlichen Demontekraft von 13,5 kN bei den Screening Ergebnissen und dem verwendeten Stempel mit einer Querschnittsfläche von 33 mm<sup>2</sup> ergibt sich eine Flächenpressung von 409,1 N/mm<sup>2</sup>. Da es sich um die gemittelte Demontekraft handelt, sind die Ergebnisse nur bedingt aussagefähig. Es lässt sich dennoch

abschätzen, dass der Faktor für phosphatierte Magnete bei ca. zwei liegt, der von Magneten mit Epoxidbeschichtung liegt darunter.

Es werden die Versuche bezüglich Magnetgeometrie und Klebstoff herangezogen. Bei der Demontage der Magnete mit der Höhe 10,6 mm und einer Länge von 21,6 mm kommt es häufig zum biegespannungsinduzierten Bruch des Magneten in der Mitte. Mit der Formel 6-14 für das maximale Biegemoment berechnet sich die auftretende Biegespannung bei einer mittleren Auspresskraft von 9,31 kN zu 188,1 N/mm<sup>2</sup>. Dieser Wert ist bereits relativ hoch für die Biegespannung von Magneten von 180 bis 270 N/mm<sup>2</sup> nach Kapitel 2. Gleichermaßen kommt es bei dem gleichen Magneten zum Abbrechen der Ecken. Hierfür wird die auftretende Druckbeanspruchung bei 9,31 kN Auspresskraft zu 282 N/mm<sup>2</sup> berechnet. Im Vergleich zur Druckfestigkeit der Magnete ist dies ein eher geringer Wert. Der Spannungsüberhöhungsfaktor ist hier mit ca. 3 als relativ hoch einzustufen.

Der Magnet mit 21,3 × 21,6 mm erfährt keine Beschädigungen, obwohl die Querschnittsflächen der beiden Magnete identisch sind, lediglich die Höhe unterscheidet sich. Die Flächenpressung bei der Demontage dieser Magnete ist stark erhöht, da bei der gleichen Stempelfläche eine Demontagekraft von 17,48 kN und damit eine Spannung von 530 N/mm<sup>2</sup> auftritt. Dennoch kommt es nur 3 mal anstatt 5 mal zu einem Abbrechen der Ecken der Magnete. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die erhöhte Durchbiegung des kleineren Magneten eine erhöhte Spannungskonzentration an den Kanten des Stempels erfolgt. Der Spannungsüberhöhungsfaktor ist damit auch von der Höhe des Magneten abhängig.

Bei der Demontage der Magnete mit Höhe 21,3 × 10,6 mm kommt es zu keiner Beschädigung der Magnete. Mit einer Demontagekraft von 10,77 kN und einer Querschnittsfläche von 24 mm<sup>2</sup> beträgt die Druckspannung 449 N/mm<sup>2</sup>. Der Spannungsüberhöhungsfaktor ist in diesem Fall gering. Der Stempel bedeckt zudem mit einer Magnetlänge von 10,6 mm und einer Stempellänge von 8,0 mm einen relativ großen Teil des Magneten. Die Biegespannung dieses Magneten ist mit 22,37 N/mm<sup>2</sup> unkritisch.

**Zusammenfassung:** Die größten Einflussfaktoren für die Demontage stoffschlüssiger Magnetfixierungen konnten mit den experimentellen Untersuchungen ermittelt werden:

**Maximale Demontagekraft:**

Die wichtigsten Einflüsse sind Klebstoff, Magnetgeometrie und Alterungszustand. Bei Klebstoff und Magnetgeometrie sind typisch für Klebeverbindungen die

Werkstoffeigenschaften und die Klebefläche ausschlaggebend. Die Degradation durch Alterung war auf thermische Einflüsse zurückzuführen.

### **Magnetbeschädigung:**

Die wichtigsten Einflüsse sind Magnetgeometrie, Beschichtung, Stempelgröße, Demontagekraft und Magnetanordnung. Für die Magnetgeometrie ist das Verhältnis von Magnethöhe zu -länge ausschlaggebend. Eine Epoxidbeschichtung reduziert die Magnetbeschädigung deutlich. Das Auspressen von der Oberseite bewirkt ebenfalls eine Verringerung der Magnetbeschädigung, jedoch nur in geringem Umfang. Die Stempelgröße ist zusammen mit der Demontagekraft und Magnetgeometrie ausschlaggebend für die Spannungsverteilungen innerhalb der Magnete. Von einem Einzelmagneten abweichende Magnetanordnungen wirken sich negativ hinsichtlich möglicher Beschädigungen aus. Falls diese genutzt werden, ist die vertikale Orientierung zu bevorzugen.

### **Durchschnittliche Demontagekraft & Kleberückstände:**

Die durchschnittliche Demontagekraft sowie Kleberückstände werden von der Magnetbeschichtung bestimmt. Phosphatierte Magnete weisen höhere Durchschnittskräfte und mehr Kleberückstände auf. Durch die Betrachtung der durchschnittlichen Demontagekräfte während des Demontageprozesses kann auf Kleberückstände der Magnete geschlossen werden.

## **7.3.2 Federnase**

In diesem Kapitel erfolgt die experimentelle Untersuchung der Magnetfixierung mittels Federnase. Im Gegensatz zu stoffschlüssigen Magnetfixierungen konnten alle relevanten Einflüsse bereits in der Simulation abgebildet werden, weshalb deutlich weniger experimentelle Untersuchungen erforderlich sind. Es werden Versuchsträger erstellt und der Prozess charakterisiert. Zur Eingrenzung des Versuchsaufwands wird in den Versuchen ausschließlich die freie Länge der Federnase variiert. Als Versuchsträger wird ein prototypisches Blechpaket mit drei verschiedenen Federnasen konstruiert und hergestellt. Das Design ist in Abbildung 7-25 dargestellt.

Das Blechpaket ist in drei Abschnitte untergliedert, welche jeweils durch die Anzahl der Aussparungen am Innendurchmesser gekennzeichnet sind. Die Nasen der drei Abschnitte unterscheiden sich ausschließlich in der freien Länge, was durch das Verschieben der Nase in Richtung Magnet bzw. von diesem weg realisiert wird. Somit gibt es drei verschiedene Magnettaschengeometrien mit je acht Taschen pro Blechpaket.

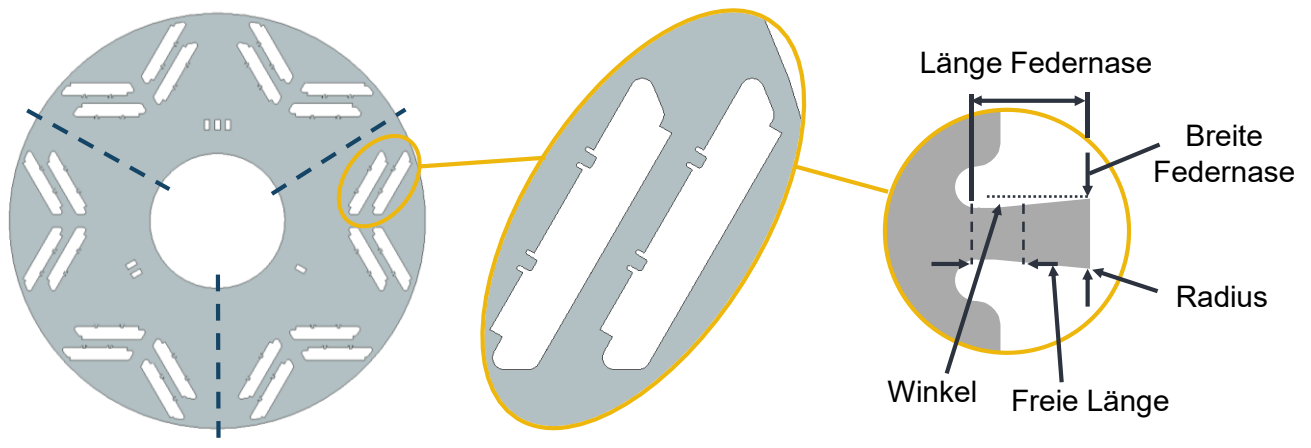


Abbildung 7-25: Blechschnittgeometrie für die Magnetfixierung mit Federnase.

Die Parameter der Blechgeometrie sind in Tabelle 7-6 aufgelistet. Es wird ein Winkel von  $0^\circ$  für die Federnase gewählt, wodurch sich eine Rechteckform ergibt. Mit der Blechstärke von 0,35 mm und einer Blechpakethöhe von 21,3 mm werden 17 Blechschnitte mit Federnase alternierend mit jeweils 3 Blechschnitten ohne Federnase eingesetzt.

Tabelle 7-6: Parameter der Federnasen Versuchsträger.

<b>Parameter Federnase</b>	<b>Wert</b>	<b>Einheit</b>
Länge Federnase	1,0	mm
Breite Federnase	1,1	mm
Winkel Federnase	0	$^\circ$
Radius	0,2	mm
Freie Länge	0,6; 0,7; 0,8	mm
Nasen pro Magnetasche	2	-
Anzahl Schichten mit Nasen	17	-
<b>Allgemeine Parameter</b>		
Blechstärke	0,35	mm
Höhe Blechpaket	21,3	mm
Paketierung	Backlack	-
Blechwerkstoff	M270-35	-

### 7.3.2.1 Prozesscharakterisierung

Für die Prozesscharakterisierung werden Montage- sowie Demontage-Kraft-Weg-Verläufe der Versuchsträger in Abbildung 7-26 analysiert.

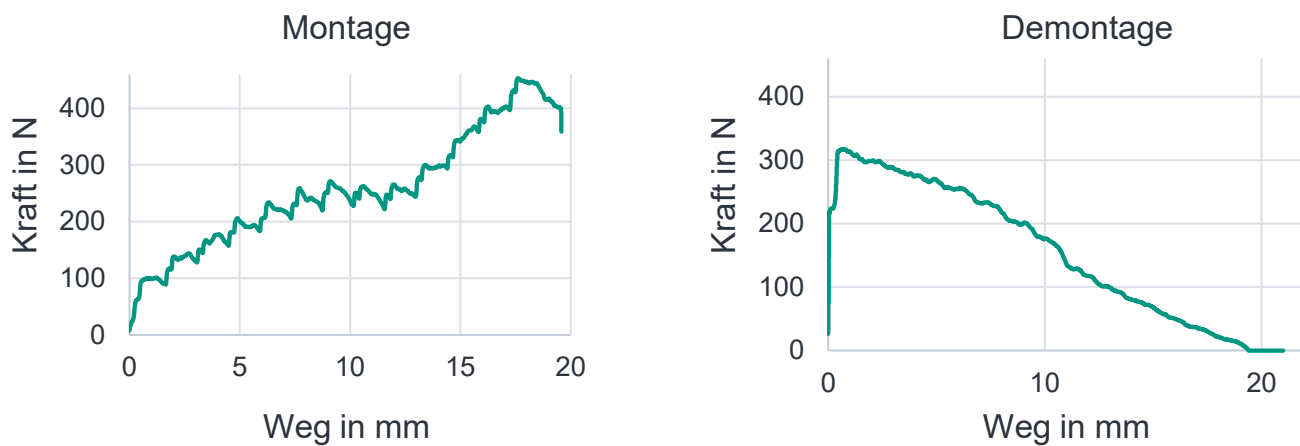


Abbildung 7-26: Kraft-Weg-Verlauf für die Montage und Demontage von Magneten mit Federnasenfixierung.

Die Montagekräfte ergeben sich aus der Kombination der Kraft zum Umformen der mit dem Magneten in Kontakt kommenden Nase sowie den Reibkräften der bereits umgeformten Federnasen. Die Montagekurve in Abbildung 7-26 links zeigt einen initialen Kraftanstieg, der sich annähernd linear fortsetzt. Gleichzeitig weist die Kurve eine Welligkeit auf, welche durch die einzelnen Federnasen zu erklären ist. Beim Umformen der Nasen steigt die Kraft an. Bis zum Auftreffen des Magneten auf die nächste Nase fällt die Kraft geringfügig ab. Dieser Abfall ist ebenfalls am Ende der Kurve zu erkennen. In den untersten Blechschichten sind keine Nase vorhanden, da diese sonst nach dem Umformen aus dem Blechpaket ragen würden.

Bei der Demontage steigt die Kraft zu Beginn steil an, bis ein Maximum erreicht wird. Anschließend fällt die Kraft linear mit dem Weg ab. Der Verlauf ist deutlich glatter, da keine Umformung stattfindet, lediglich eine elastische Rückfederung der Federnasen. Theoretisch gibt es zwischen dem Verlust des Kontakts mit einer Federnase bis zum nächsten einen konstanten Kraftbereich, dieser lässt sich in den Versuchen nicht erkennen.

Zum Abgleich von Montage- und Demontagekräften werden jeweils vier Magnete in die drei unterschiedlichen Magnettaschen mit unterschiedlicher freier Federnasenlänge montiert und anschließend demontiert und die auftretenden Maximalkräfte in Abbildung 7-27 miteinander verglichen. Die Demontagerichtung entspricht der Montagerichtung. Die erste Zahl bei der Nummerierung bezeichnet die freie Länge des Blechpakets 1, 2 und 3 mit jeweils 0,6; 0,7 und 0,8 mm. Die zweite Zahl dient zur Nummerierung der Magnete

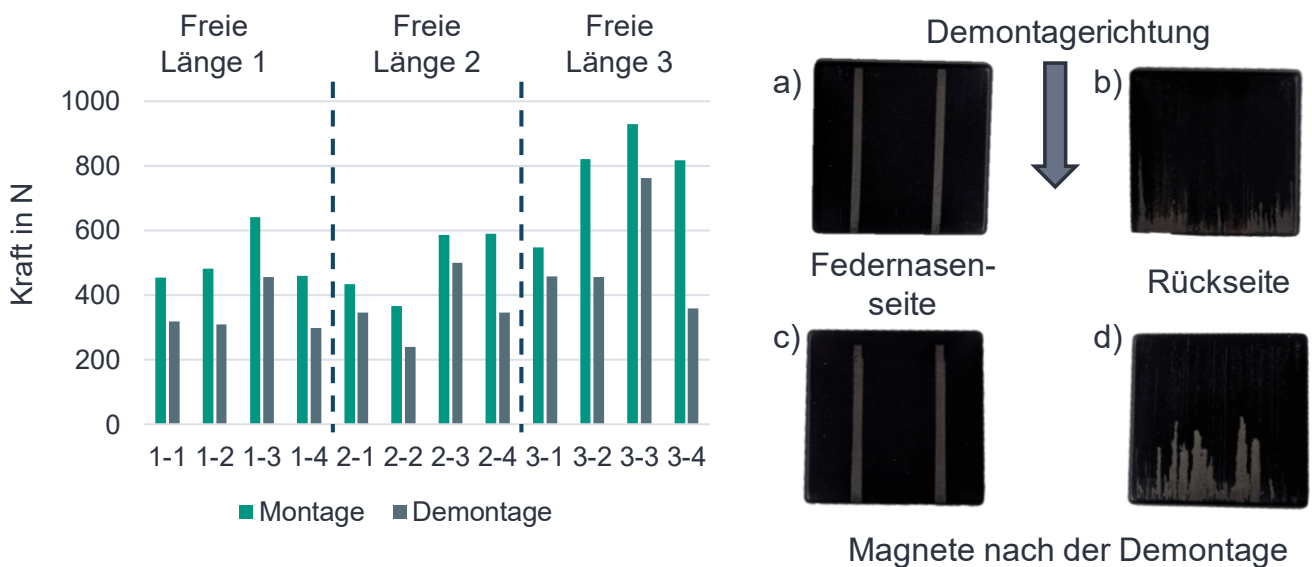


Abbildung 7-27: Vergleich von Montage- und Demontagekräften sowie Magnetzustand nach der Demontage bei Magnetfixierung Federnase.

Es besteht eine positiv lineare Korrelation zwischen Montage- und Demontagekräften. Die Montagekräfte sind stets höher als die Demontagekräfte. Dabei gilt es zu beachten, dass die Montagekräfte sich immer aus der Haltekraft der bereits umgeformten Federnasen und der Umformung der jeweils neu mit dem Magnet in Kontakt tretenden Federnase zusammensetzen. Die Federnasen mit der freien Länge 1 und 2 besitzen geringere Montage- und Demontagekräfte, während bei der freien Länge von 3 insbesondere die Montagekräfte erhöht sind.

Der Magnetzustand in Abbildung 7-27 zeigt jeweils die Federnasenseite und die Rückseite von zwei Magneten. Auf der Federnasenseite ist die Beschichtung an den Kontaktpunkten mit den Federnasen vollständig abgetragen, während die restliche Beschichtung unversehrt ist. Auf der Gegenseite des Magneten kommt es ebenfalls zum Abtragen der Magnetbeschichtung, insbesondere im unteren Bereich. Das Abtragen der Magnetbeschichtung in solchem Umfang ist für eine elektrische Maschine nicht zulässig, da bereits nach der Montage eine Oxidation des Magnetmaterials stattfindet. Es müsste eine kratzfestere Magnetbeschichtung oder sonstige Maßnahmen gegen das Abtragen der Beschichtung umgesetzt werden.

Nach der Demontage der Magnete werden die Magnetaschen aufgeschnitten und Mikroskopaufnahmen erstellt, die in Abbildung 7-28 dargestellt sind.

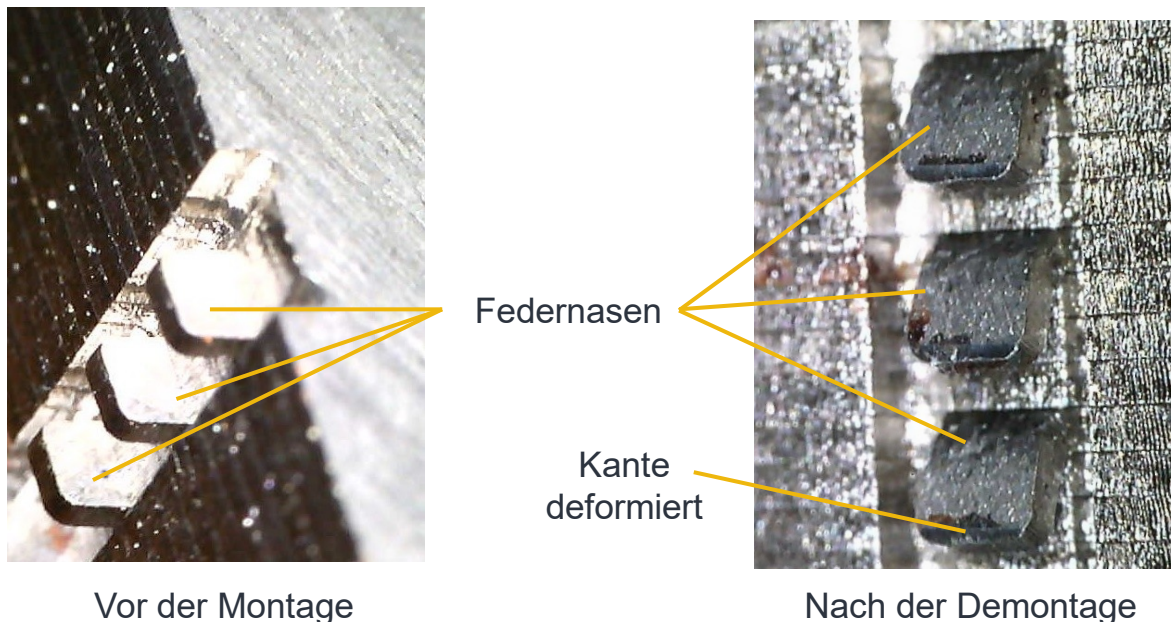


Abbildung 7-28: Federnasen vor der Montage und nach der Demontage.

Die Federnasen sind nach der Demontage stark umgeformt. Die größte Verformung tritt nahe des Blechpakets auf, an der Stelle des höchsten Biegemoments. Die restliche Nase ist weniger verformt, was für eine schlechte Materialausnutzung der Federnase spricht. Zudem fällt auf, dass die vordere Kante deformiert ist, wie es bereits in Abbildung 6-13 in der Simulation der Federnasenfixierung zu sehen war. Die ungleich verteilte Materialausnutzung der Feder und die starke Umformung des Elektroblechs haben zur Folge, dass dort eine sehr starke Plastifizierung stattfindet.

### 7.3.2.2 Validierung des Modells

Die Versuchsergebnisse werden zur Validierung des Modells aus Kapitel 6.2.1 genutzt. Simulationsergebnisse für die Geometrien der Versuche sind bereits in der Parameterstudie vorhanden. Ein effektiver Vergleich von simulativer und realer Montagekraft ist nicht möglich, da bei der Montage stets Kräfte zum Umformen der Nasen gleichzeitig mit den Haltekräften der bereits im Eingriff befindlichen Nasen wirken. Aus diesem Grund werden lediglich die Demontagekraft sowie die Toleranz betrachtet.

Aufgrund der Symmetrie, zwei Nasen pro Blechschnitt sowie 17 Nasen im Blechpaket ergibt sich der Faktor  $n_n$  zu 68 für die Simulation der Einzelnase. Basierend auf Formel 6-18 kann die Demontagekraft beispielhaft mit den Werten von Federnase 3 berechnet werden:

$$F_{N,ges} = 2 * F_N * n_N * \mu_N$$

7-1

$$F_{N,ges} = 2 * 15,17N * 68 * 0,2 = 412,6 N$$

Diese Ergebnisse werden in Abbildung 7-29 mit den Versuchsergebnissen verglichen.

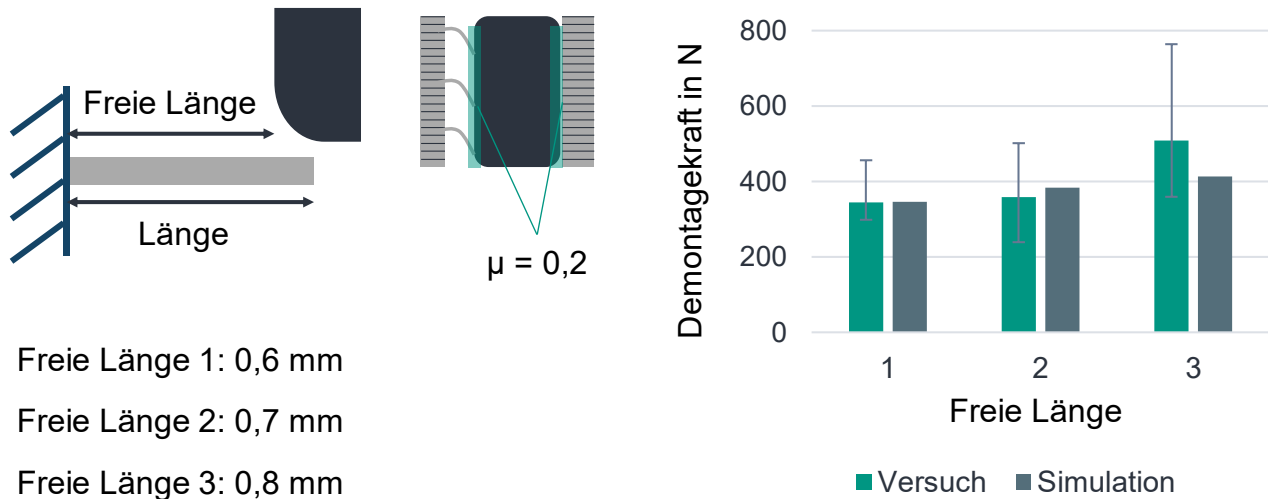


Abbildung 7-29: Vergleich von Versuch und Simulation der Magnetfixierung mittels Federnasen.

Die Ergebnisse von Simulation und Versuch stimmen sehr gut überein. Die in der Simulation von Federnase eins bis drei ermittelte Toleranz für 50% der Haltekraft liegt im Bereich von 3,35 bis 5,41  $\mu\text{m}$ , wodurch eine hohe Sensitivität gegeben ist. Im Vergleich dazu liegt die Dicke von Magnetbeschichtungen bei 10 bis 30  $\mu\text{m}$  (HS Magnets; Supermagnete; Tengye 2025). Die Beschichtung wurde gemäß Abbildung 7-27 abgetragen. Basierend auf den experimentellen Demontagekräften kann geschlussfolgert werden, dass die Kantenverformung sowie der Beschichtungsabtrag während des Umformprozesses stattfindet und sich damit nicht nachträglich negativ auf die Haltekraft auswirkt.

Der Demontageprozess gestaltet sich bei der Magnetfixierung mit Federnasen im Vergleich zur stoffschlüssigen Magnetfixierung deutlich einfacher. Aufgrund der deutlich geringeren Auspresskräfte kommt es in keinem Fall zum Bruch eines Magneten. Zu beachten ist die Beschädigung der Magnetbeschichtung, die aufgrund des mechanischen Kontakts von Magneten, Blechpaket und Federnase deutlich mehr beansprucht wird als bei stoffschlüssigen Magnetfixierungen. Die Beständigkeit der Magnetbeschichtung muss allerdings bereits bei der Auslegung der Magnetfixierung ausreichend

berücksichtigt werden, da der Magnet die mechanischen Kräfte bereits während der Montage erfährt und die Demontagekräfte keine Steigerung dazu darstellen.

**Zusammenfassung:** Die experimentellen Ergebnisse der Magnetfixierung mittels Federnase stimmen qualitativ und quantitativ sehr gut mit den entwickelten Modellen überein. Aufgrund der starken lokalen Plastifizierung des Blechmaterials ist die Materialausnutzung der Feder gering. Die hohe Sensitivität gegenüber Toleranzen aus der Simulation konnte in den Versuchen nicht festgestellt werden, da abgesehen vom Montageprozess innerhalb der Magnettasche keine Verschiebungen auftreten.

Im Kontakt von Federnase und Magneten kommt es durch die vorliegende Flächenpressung zum Abkratzen der Beschichtung, weshalb deren Widerstandsfähigkeit bei der Produktentwicklung und Demontage berücksichtigt werden muss.

### 7.3.3 Federblech

Für die Magnetfixierung mittels Federblech werden die Einflussparameter experimentell untersucht. Das Federverhalten des Blechs konnte während der Simulation in Kapitel 6.2.2 bereits validiert werden. In diesem Kapitel gilt es, das Federblech als Magnetfixierung zu untersuchen.

Für die effektive Untersuchung der Einflussparameter wird zunächst ein Ersatzsystem entwickelt, um Magnettaschen unterschiedlicher Größe zu untersuchen. Insbesondere die Taschenbreite und der daraus resultierende Luftspalt ist sensitiv, da hierdurch die Kompression des Federblechs bestimmt wird. Das Ersatzsystem ist in Abbildung 7-30 dargestellt. Detaillierte Untersuchungen mittels Ersatzsystem sind bereits in (A\_Weimann 2023) veröffentlicht. Die Versuchsvorrichtung befindet sich innerhalb einer Zwick Roell universal Materialprüfmaschine, die eine präzise Aufzeichnung des Kraft-Weg-Verlaufs ermöglicht. Basierend auf den physikalischen Annahmen werden keine signifikanten Wechselwirkungen erwartet. Daher werden die Faktoren isoliert voneinander untersucht. Das Federblech für die Versuche besitzt die Parameter von Tabelle 6-7 und kommt in unterschiedlichen Größen, entsprechend der Magnetgeometrie, zum Einsatz. Falls nicht anders beschrieben, werden jeweils drei Replikationen durchgeführt.

Die Vorrichtung besteht aus zwei Schlitten, welche auf einer Nutenplatte kontinuierlich auf einen beliebigen Abstand eingestellt werden können. Wahlweise können Magnete zwischen die Schlitten aus Stahl in Position 2 oder zwischen zwei offene Magnettaschen eines auf die Schlitten gespannten Blechpaketes bei Position 1 montiert werden.

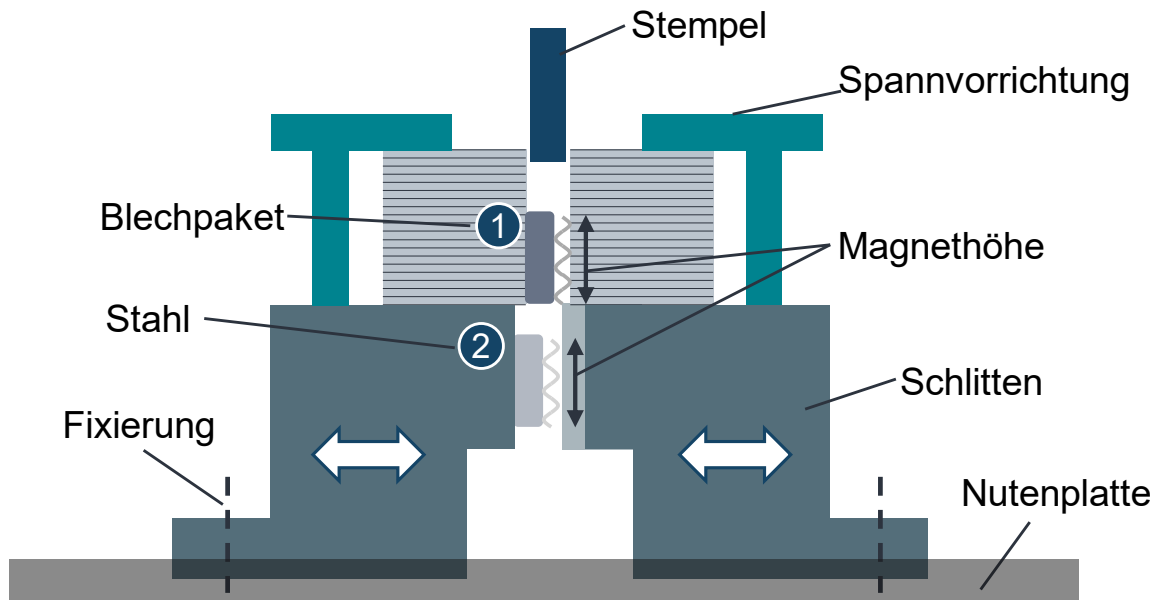


Abbildung 7-30: Einstellbare Versuchsvorrichtung für die Demontage von mit Federblech fixierten Magneten (eigene Darstellung (A\_Weimann 2023, S. 35)).

Für die Montage werden Magnet und Federblech mit einer Hilfsvorrichtung zwischen den Schritten positioniert und anschließend die Schritte auf die gewünschte Position zusammengefahren. Die mit diesem Aufbau untersuchten Faktoren und deren Faktorstufen sind in Tabelle 7-7 aufgelistet.

Zunächst wird die Magnethöhe untersucht, die der Gesamtlänge des Federblechs entspricht. Dies erfolgt in Position 2 von Abbildung 7-30. Zur Untersuchung von Vielfachen der Magnethöhe werden Quader aus Stahl mit abgerundeten Kanten als Ersatzmagnet verwendet. Diese haben die Maße  $3,9 \times 9,3$  mm mit Magnethöhen von 12,5; 25,0 und 37,5 mm. Die Ergebnisse der Demontage sind in Form von Kraft-Weg-Verläufen in Abbildung 7-31 dargestellt.

Tabelle 7-7: Faktoren und Faktorstufen für die Versuchsreihe Federnase.

Faktor	Faktorstufen	Einheit
Magnethöhe	12,5; 25,0; 37,5	mm
Anzahl Magnet pro Tasche	1; 2; 3	-
Magnetbeschichtung	Nickel, Epoxid	
Taschenmaterial	Stahl, Blechpaket	
Geschwindigkeit	20; 150	mm/min
Luftspalt (Taschenbreite)	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55	mm

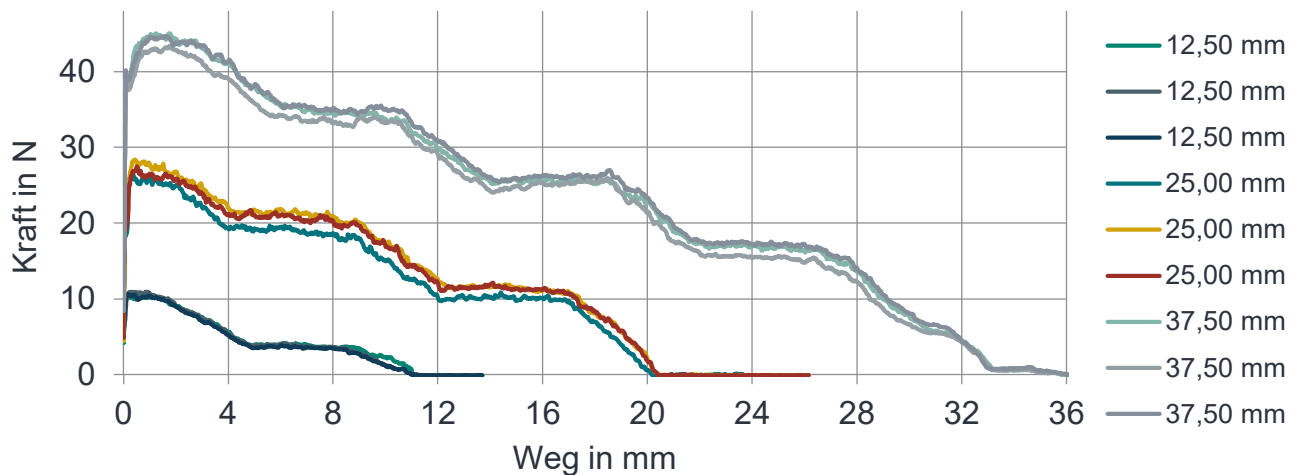


Abbildung 7-31: Kraft-Weg-Verlauf bei der Demontage von Magneten mit Federblechfixierung und unterschiedlichen Magnethöhen (eigene Darstellung (A\_Weimann 2023, S. 60)).

Die drei unterschiedlichen Magnethöhen sind eindeutig anhand des Kraftniveaus sowie des Wegs voneinander differenzierbar. Der Kraftverlauf besteht aus alternierenden Teilstücken von konstanter und abfallender Kraft. Die abfallende Kraft wird durch den verringerten Eingriff von Federblech und Magneten hervorgerufen. Innerhalb der konstanten Teilstücke wird ein Teil des Federblechs herausgeschoben, welcher nicht in Kontakt mit dem Magneten und der Magnettasche ist. Mit einer Wellenlänge von 7,85 mm entsprechen die Abschnitte jeweils der halben Wellenlänge der Magnetfixierung. Im Vergleich zur Federnase sind klare Abschnitte zu erkennen, was darin begründet ist, dass mit den maximal vier Wellenlängen der Feder deutlich weniger Fixierelemente als die 17 Federnasen eingesetzt werden. Außerdem ist das Kraftniveau bei den gewählten Parametern auf einem niedrigen Niveau, was an den kleinen Magneten sowie dem verwendeten Federblech liegt. Die Annahme eines linearen Zusammenhangs von Magnethöhe und Demontagekraft aus der Simulation ist damit validiert.

Analog zur Magnethöhe wird der gleiche Versuch mit je einem, zwei und drei Einzelmagneten übereinander durchgeführt. Dabei liegt der gleiche lineare Zusammenhang für die Anzahl der Magnete vor.

Für die Untersuchung der Magnetbeschichtung werden Magnete mit Nickel- und Epoxidbeschichtung sowie die Ersatzmagnete aus Stahl betrachtet, um deren Reibwerte zu vergleichen. Die Versuche zeigen, dass die Demontagekräfte jeweils auf dem gleichen Niveau liegen und sich unterhalb der Streuung befinden. Zudem wird der

Unterschied zwischen dem Kontakt von Federblech und Magneten mit einem Blechpaket oder dem Vollkörper aus Abbildung 7-30 untersucht. Hier ist ebenfalls kein Einfluss erkennbar. Der Reibwert wird daher für alle Kombinationen als gleich angenommen. Bei der Auspressgeschwindigkeit ist ebenfalls kein Einfluss auf die Demontagekraft zu beobachten.

Die Taschenbreite wird zur detaillierten Untersuchung des Federblechs in zehn Faktorstufen von 0,10 bis 0,55 mm Luftspalt in einem Abstand von je 0,05 mm betrachtet. Es wird untersucht, ob die lineare Federsteifigkeit zu einem linearen Zusammenhang bezüglich der Demontagekraft führt. Die Ergebnisse der Demontageversuche sind in Abbildung 7-32 dargestellt.

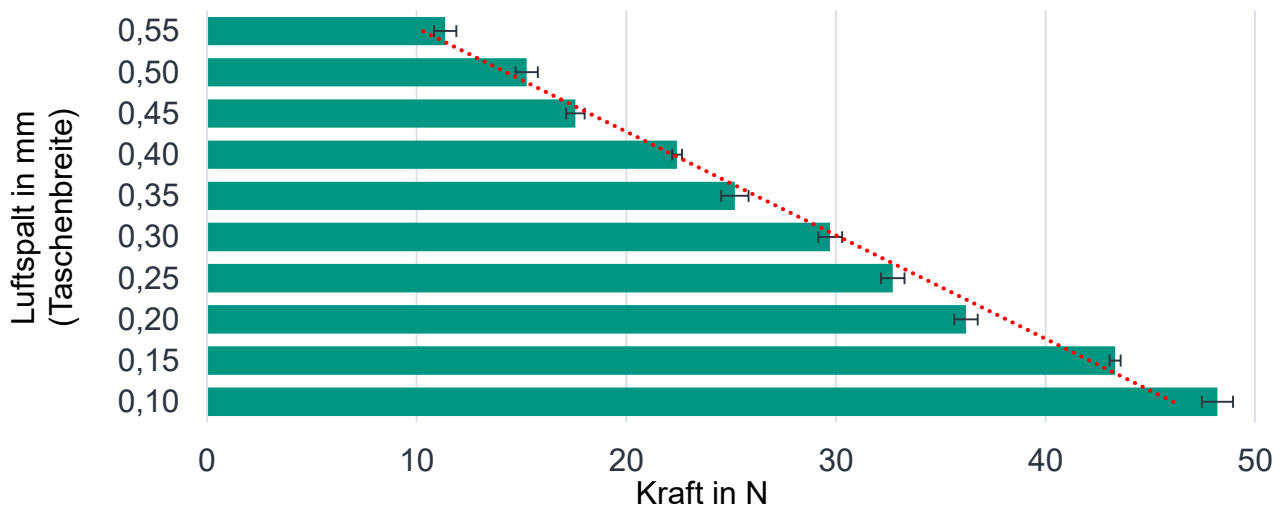


Abbildung 7-32: Maximale Demontagekraft für unterschiedliche Taschenbreiten mit Federblechfixierung (eigene Darstellung (A\_Weimann 2023, S. 70)).

Die Ergebnisse zeigen einen linearen Verlauf zwischen Taschenbreite und maximaler Demontagekraft. Dies validiert das simulierte lineare Federverhalten. Im hier nicht abgebildeten Kraftverlauf ist zu erkennen, dass die klare Abgrenzung zwischen dem alternierenden konstanten und linearen Kraftverlauf von Abbildung 7-31 mit zunehmender Kompression abnimmt.

Nach der Bewertung der Einflussfaktoren im Ersatzsystem erfolgt die Demontage innerhalb einer Magnettasche. Aufgrund der einfacheren Herstellung wird die Magnettasche durch das Erodieren einer Tasche in Stahl als Vollmaterial umgesetzt. Zuvor konnte bereits aufgezeigt werden, dass der Einfluss von Blech- oder Vollmaterial zu vernachlässigen ist. Das verwendete Federblech ist identisch zu den Parametern in

Tabelle 6-7. Die Höhe der Magnettasche beträgt 34,8 mm. In die Magnettaschen werden vier Magnete übereinander gefügt. Das Spiel zwischen Blechpaket und Magneten beträgt 0,34 mm. Abzüglich der Federblechstärke von 0,1 mm verbleiben 0,24 mm Luftspalt. Die Montage von Federblech und Magneten erfolgt mit dem in Kapitel 7.2.3 vorgestellten Verfahren. Der typische Kraft-Weg-Verlauf der Demontage ist in Abbildung 7-33 dargestellt.

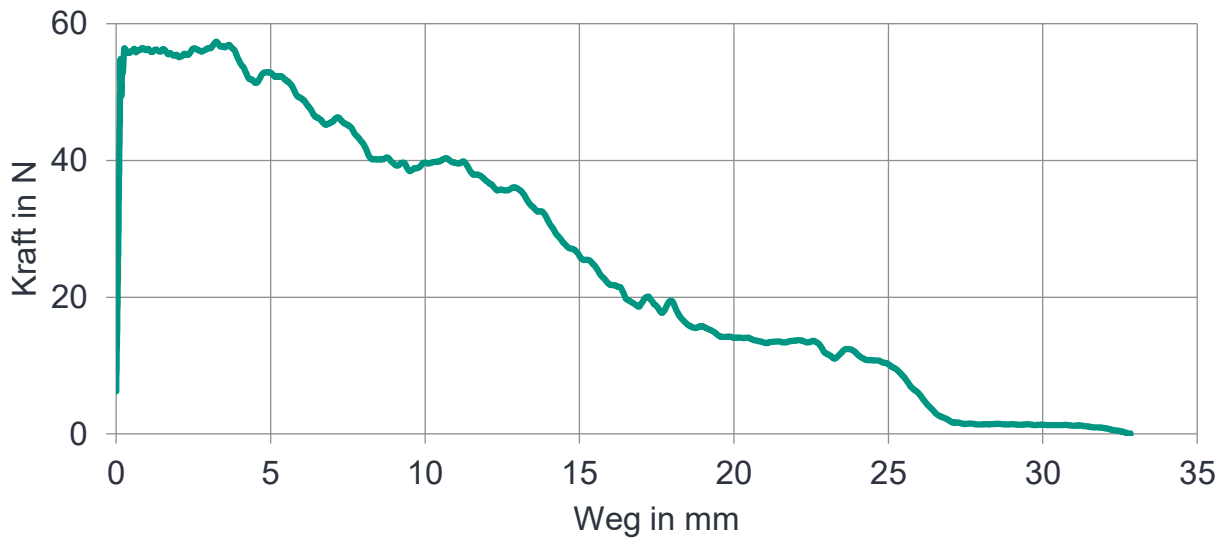


Abbildung 7-33: Kraft-Weg-Verlauf der Demontage von Magneten mit Federblechfixierung.

Ausgehend von einem steilen Anstieg nimmt die Kraft mit zunehmendem Weg ab, da der Magnet sowie das Federblech den Kontakt verlieren. Eindeutige Plateaus, wie in den Versuchsreihen zuvor, sind nicht zu erkennen. Durch die starke Kompression findet kein individueller Kontaktverlust der einzelnen Wellen statt. Es wird die durchschnittliche maximale Demontagekraft von fünf Demontageversuchen ermittelt. Der Durchschnitt der Maximalwerte der Demontagekraft für diese Verbindung beträgt 58,9 N mit einem Maximum von 64,1 N und einem Minimum von 54,0 N. Die Streuung ist damit gering.

### 7.3.3.1 Validierung der Simulation

Die Demontagekräfte des vorherigen Kapitels von Abbildung 7-33 werden für den Abgleich von Versuch und Simulation genutzt. Mit der Amplitude des Federblechs von 0,7 mm und dem Luftspalt in der Tasche von 0,24 mm ergibt sich eine Kompression von 0,46 mm während des Versuchs. Bei der gegebenen Magnetfixierung ergibt sich

aus der Simulation eine Demontagekraft von 1,378 N/mm. Aus Formel 7-2 ergibt sich für die Haltekraft des Federblechs zu:

$$F_{Fb,ges} = 2 * F_{\lambda} * n_{\lambda} * b_{Fb} \quad 7-2$$

$$F_{Fb,ges} = 2 * 1,378 \text{ N/mm} * 4 * 15,5 \text{ mm} = 170,88 \text{ N}$$

Aus Formel 6-19 erhält man mit einem Reibwert von 0,2 die Demontagekraft:

$$F_{De} = 2 * F_{H,ges} * \mu_{Fb} \quad 7-3$$

$$F_{De} = 2 * 170,88 \text{ N} * 0,2 = 68,35 \text{ N}$$

Die Werte der Simulation stimmen gut mit den Versuchsergebnissen überein. Die reale Demontagekraft mit 58,9 N liegt etwas unterhalb der 68,4 N der Simulation.

Der Magnetzustand nach der Demontage weist im Vergleich zur Federnase eine geringere Abtragung der Magnetbeschichtung auf. Durch die geringeren Kräfte und den flächigen Kontakt zwischen Federblech und Magneten kommt es nicht zu einem lokalen Abkratzen der Magnetbeschichtung. Dennoch gilt es die mechanische Belastung der Magnetbeschichtung zu berücksichtigen.

**Zusammenfassung:** In den experimentellen Untersuchungen konnten die Annahmen des Modells validiert werden. Die Magnet- und Blechpaketoberfläche sowie die Demontagegeschwindigkeit weisen keinen Einfluss auf die Demontage auf. Die experimentellen Ergebnisse stimmen sehr gut mit der Simulation überein, sodass das Modell validiert werden konnte.

## 8 Validierung

Die Validierung des entwickelten Ansatzes erfolgt anhand der Magnetdemontage eines elektrischen Traktionsmotors. Dabei wird die Prozessparametrierung beispielhaft durchlaufen. Bei diesem Validierungsrotor handelt sich um ein Serienprodukt eines Automobilzulieferers. Der Motor wurde bereits in Kapitel 4 bis auf Blechpaketebene demontiert. Die Magnete sind mittels Spritzpressen (Transfermolding) stoffschlüssig fixiert.

### 8.1 Demontagekräfte von stoffschlüssigen Fixierungen

Für die Validierung des Simulationsmodells für die Vorhersage von Demontagekräften von stoffschlüssigen Verbindungen werden Simulationsergebnisse mit Demontageversuchen abgeglichen. Für den vorliegenden Validierungsrotor sind keine ausreichenden Werkstoffdaten des verwendeten Transfermoldingwerkstoffs für einen aussagekräftigen Vergleich vorhanden. Transfermolding Materialien werden nicht primär als Klebeverbindung, wie im Fall der Magnetfixierung, eingesetzt, weshalb das Datenblatt die Scherfestigkeit nicht beinhaltet. Die Bestimmung der Werkstoffdaten ist für Hersteller mit technischem Aufwand verbunden, da mit dem Material nicht ohne weiteres Überlappproben hergestellt werden können. Hierfür wäre ein kostspieliges Transfermoldingwerkzeug notwendig. Aus diesen Gründen werden die Versuchsergebnisse zu stoffschlüssigen Magnetfixierungen aus Kapitel 7.3.1.3 herangezogen. Es wird der Klebstoff MONOPOX HT2999 zur Validierung genutzt, da für diesen die umfangreichsten Werkstoffkennwerte vorliegen. Geometrie und Werkstoffparameter sind in Tabelle 8-1 aufgelistet.

Tabelle 8-1: Geometrie- und Werkstoffparameter zum Abgleich von Versuch und Simulation (Baloglu 2021, S. 109; Delo 2024).

System	Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Magnet	Höhe	$h_{\text{Mag}}$	21,3	mm
	Länge	$l_{\text{Mag}}$	21,6	mm
	Breite	$b_{\text{Mag}}$	4,8	mm
	E-Modul	$E_{\text{Mag}}$	160	GPa
	Poissonzahl	$\nu_{\text{Mag}}$	0,24	-
Blechpaket	Breite	$b_{\text{BP}}$	4,0	mm
	E-Modul (radial)	$E_{\text{BP},1}$	206,4	GPa
	E-Modul (tangential)	$E_{\text{BP},1}$	206,4	GPa
	E-Modul (axial)	$E_{\text{BP},2}$	118,9	GPa
	Schubmodul	$G_{\text{BP},12}$	79,37	GPa

Kohäsivschicht	Schubmodul	$G_{BP,13}$	35,62	GPa
	Poissonzahl	$\nu_{BP,12}$	0,300	-
	Poissonzahl	$\nu_{BP,13}$	0,301	-
	Poissonzahl	$\nu_{BP,23}$	0,174	-
	Dicke	$D_K$	0,10	mm
	E-Modul	$E_K$	4,4	GPa
	Schubmodul	$G_K$	1,692	GPa
	Festigkeit in Normalenrichtung	$t_{n,K}$	54	MPa
	Festigkeit in Scherrichtung	$t_{s,K}$	45	MPa
	Kritische Rissöffnung	$\delta_K$	0,01227	mm
Poissonzahl	$\nu_K$	0,3	-	

Nicht alle der notwendigen Daten des Klebstoffs sind im Datenblatt vorhanden, daher werden diese mit folgender Berechnung angenähert.

Das Schubmodul der Kohäsivschicht wird im Datenblatt nicht angegeben und wird daher mit folgender Formel berechnet (Gross et al. 2014, S. 78):

$$G_K = \frac{E_K}{2(1 + \nu_K)} \quad 8-1$$

Dabei liegt die Querkontraktionszahl von Epoxidharzen typischerweise bei 0,3 (Epoxy Technology, S. 2). Für die kritische Rissöffnung liegen ebenfalls keine Werte im Datenblatt vor. Die kritische Rissöffnung wird daher anhand der Festigkeit und des E-Moduls abgeschätzt.

$$\delta_K = \frac{t_{n,K}}{E_K} = 0,01227 \text{ mm} \quad 8-2$$

Bei der Festigkeit der Kohäsivschicht wurde der Wert für Druckscherbeanspruchung gewählt. Die Simulation liefert eine Demontagekraft von 513,4 N/mm<sup>2</sup>. Mit dem Magnetumfang von 2 × (21,6 mm + 4,8 mm) ergibt sich eine Demontagekraft von 27,09 kN. In den zuvor durchgeführten Versuchen wurde aufgrund der Alterung eine Reduktion der Demontagekraft um 18 % festgestellt, daher wird der in der Simulation ermittelte Wert um 18 % reduziert, wodurch sich eine Demontagekraft von 22,21 kN ergibt. Die Demontagekraft aus den Versuchen von Kapitel 7.3.1.3 des gleichen Magneten hatte in der Versuchsreihe bei fünf Replikationen einen durchschnittlichen Wert von 18,94 kN und betrug maximal 19,66 kN.

Die Simulation liefert mit 22,21 kN eine 17 % höhere Demontagekraft als die durchschnittlichen Versuchsergebnisse. Das Simulationsergebnis kann sehr gut als oberes Limit oder konservative Abschätzung betrachtet werden.

Abschließend wird die analytische Formel 6-1 zur Berechnung der maximal übertragbaren Klebelast herangezogen, um die Demontagekraft analytisch zu bestimmen und mit der Finite-Elemente-Simulation zu vergleichen. Mit der übertragbaren Schubspannung von 45 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich die analytische Demontagekraft mit:

$$A = 2 * 21,6 \text{ mm} * (21,3 \text{ mm} + 4,8 \text{ mm}) = 1127,5 \text{ mm}^2 \quad 8-3$$
$$F_{De} = \tau * A = 45 \text{ N/mm}^2 * 1127,5 \text{ mm}^2 = 50,74 \text{ kN}$$

Wird erneut eine alterungsbedingte Reduktion der Demontagekraft von 18 % angenommen, ergibt sich eine analytische Demontagekraft von 41,6 kN, was mehr als das Doppelte der tatsächlichen Demontagekraft ist. Die klassische analytische Berechnung der Klebeverbindung ist nicht zielführend. Die Finite-Elemente-Simulation ist deutlich präziser und stimmt sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein und konnte damit erfolgreich validiert werden.

## 8.2 Magnetdemontage

Aufgrund der fehlenden Werkstoffdaten, wird als Grundlage für die weiteren Berechnungen die Demontagekraft experimentell ermittelt. Das Blechpaket besitzt zwei Magnete unterschiedlicher Größe. Bei der prototypischen Demontage wird für den großen Magneten eine Kraft von 14 kN und für den kleinen Magneten eine Kraft von 12 kN gemessen.

### 8.2.1 Berechnung von kritischen Belastungen

Für die erfolgreiche Magnetdemontage müssen die Prozessparameter berechnet werden. Bei einem gegebenen Produkt muss die Stempelgeometrie bestimmt werden. Es wird berechnet ob verschiedene Stempel für die Demontage benötigt werden oder das gleiche Werkzeug eingesetzt werden kann ohne eine Beschädigung der Magnete hervorzurufen. Die Geometrie der beiden im Motor eingesetzten Magnete kann Tabelle 8-2 entnommen werden.

Tabelle 8-2: Parameter der Magnete für die Validierung.

Bezeichnung	Symbol	Magnet 1	Magnet 2	Einheit
Höhe Magnet	$h_{Mag}$	21,3	21,3	mm
Breite Magnet	$b_{Mag}$	4,8	4,0	mm
Länge Magnet	$l_{Mag}$	21,6	14,0	mm
Beschichtung	-	Phosphatierung	Phosphatierung	-

### 8.2.1.1 Druckbelastung

Die Berechnung der Druckbelastung erfolgt gemäß Formel 6-2. Bei der Nutzung des gleichen Stempels ist lediglich der größere Magnet aufgrund der höheren Demontagekraft als kritisch einzustufen. Der Spannungsüberhöhungsfaktor wird aufgrund der Phosphatierung und der Untersuchungen in Kapitel 7.3.1.11 auf 1,75 festgelegt. Mit einer zulässigen Druckspannung von 750 N/mm<sup>2</sup> ergibt sich die Querschnittsfläche zu:

$$A_S = \frac{F_{De}}{\sigma_{D, Mag}} * K$$

8-4

$$A_S = \frac{14 \text{ kN}}{750 \text{ N/mm}^2} * 1,75 = 32,67 \text{ mm}^2$$

Der Stempel kann bezüglich der Druckspannung beispielsweise die Werte 9,5 × 3,5 mm, 11,0 × 3,0 mm oder 12,0 × 2,75 mm besitzen.

### 8.2.1.2 Biegebelastung

Der größere Magnet weist bei gleichem Stempel den größeren Hebelarm auf, gleichzeitig werden größere Demontagekräfte benötigt. Aufgrund der unterschiedlichen Magnetbreiten müssen dennoch beide Fälle betrachtet werden. Mit der Formel 6-14 zur maximalen Biegespannung und den beispielhaften Stempelgeometrien sowie den Demontagekräften können die auftretenden Biegespannungen berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-3 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei zulässigen Biegemomenten von über 180 N/mm<sup>2</sup> keine kritischen Spannungen auftreten.

Tabelle 8-3: Biegespannungen der Magnete bei unterschiedlichen Stempelgeometrien.

Stempel	Magnet 1	Magnet 2	Einheit
9,5 × 3,5 mm	77,28	37,75	N/mm <sup>2</sup>
11,0 × 3,0 mm	70,04	30,31	N/mm <sup>2</sup>
12,0 × 2,75 mm	65,22	25,35	N/mm <sup>2</sup>

### 8.2.1.3 Knickspannungen des Stempels

Analog zu Kapitel 6.3 werden die auftretenden Knickspannungen betrachtet. Es wird lediglich der große Magnet untersucht, da bei gleichem Stempel höhere Demontageräfte und damit höhere Knickspannungen auftreten. Es werden die Stempel des vorherigen Kapitels mit unterschiedlichen Höhen betrachtet. Bei 21,3 mm Magnethöhe wird eine Mindesthöhe von 22 mm für den Stempel genutzt, die in Schritten von 5 mm gesteigert wird, damit andere Magnete mit größerer Höhe ebenfalls demontiert werden können. Zunächst wird der Schlankheitsgrad der unterschiedlichen Stempel mit Formel 6-22 in Tabelle 8-4 berechnet.

Tabelle 8-4: Schlankheitsgrade der Stempel für die Magnetdemontage.

Stempel	22 mm	27 mm	32 mm	37 mm
<b>9,5 × 3,5 mm</b>	15,24	18,71	22,17	25,63
<b>11,0 × 3,0 mm</b>	17,78	21,82	25,87	29,91
<b>12,0 × 2,75 mm</b>	19,40	23,81	28,22	32,63

Der Grenzschlankheitsgrad ergibt sich mit Formel 6-23 zu 58,77. Damit liegen alle Stempel unterhalb der Proportionalitätsgrenze. Es liegt der elastisch-plastische Knickfall für alle Stempel vor. Für den elastischen Grenzfall ergibt sich bei einer Streckgrenze von 750 N/mm<sup>2</sup> mit Formel 6-24 die Knickspannung zu 600,1 N/mm<sup>2</sup>. Die vorliegende Spannung bei der Demontagerkraft des großen Magneten von 14 kN und einer Querschnittsfläche von 32,67 mm<sup>2</sup> ergibt 428,5 N/mm<sup>2</sup>. Die Sicherheit gegen Knicken liegt damit bei 1,4. Dabei gilt es zu beachten, dass der Schlankheitsgrad der Proportionalitätsgrenze deutlich höher ist als der real vorliegende Schlankheitsgrad. Das Knicken ist für den betrachteten Fall damit unkritisch.

### 8.2.2 Magnetdemontage

Die Berechnungen haben aufgezeigt, dass es möglich ist, einen Stempel für beide Magnete zu verwenden ohne kritische Belastungen zu überschreiten. Daher wird ein Stempel mit einer Querschnittsfläche von 11,0 × 3,0 mm und einer Höhe von 27 mm eingesetzt. Die sechs Blechpakete des Validierungsrotors werden nacheinander demontiert. Abbildung 8-1 zeigt die Kraft-Weg-Verläufe der Demontage von zwei beispielhaften Magneten. Der Kraft-Weg-Verlauf der Demontage der stoffschlüssigen Magnetfixierung mit Transfermolding weist einen sehr ähnlichen Verlauf zu den Magnetfixierungen mittels regulärem Klebstoff auf. Die Demontagerkraft für den großen Magnet ist höher im

Vergleich zum kleinen Magnet. Das gilt sowohl für den Kraftanstieg zu Beginn sowie insbesondere für den restlichen Verlauf. Bei dem großen Magneten ist zudem ein leichter Anstieg nach dem ersten Kraftabfall zu erkennen.

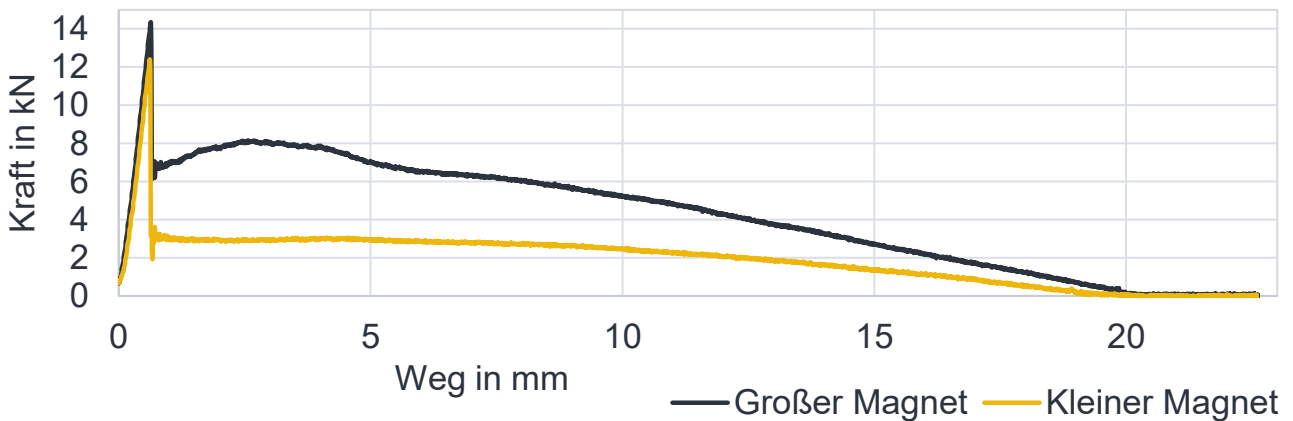


Abbildung 8-1: Kraft-Weg-Verlauf der Demontage von Magneten.

Der Zustand der beiden Magnete von Abbildung 8-1 nach der Demontage ist in Abbildung 8-2 dargestellt.

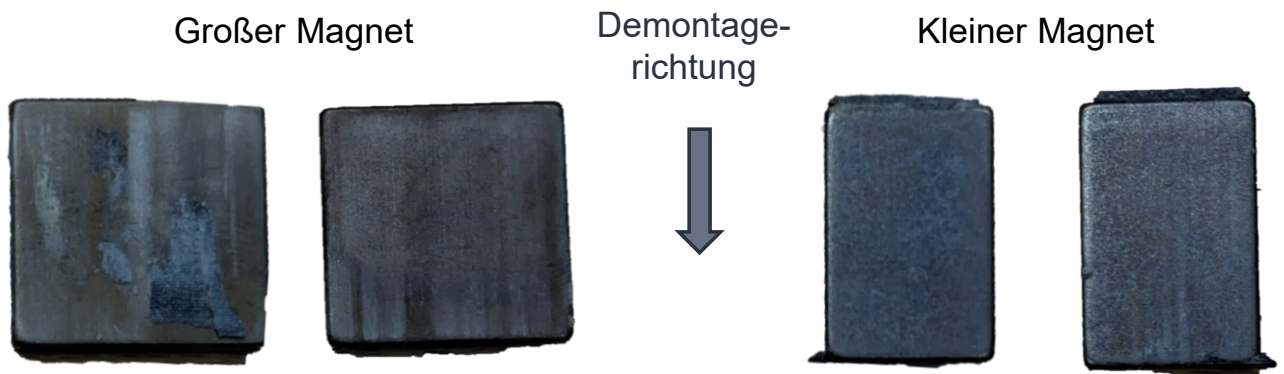


Abbildung 8-2: Magnetzustand nach der Demontage.

Bei beiden Magneten liegt kein Schaden vor. Die Flächen der Magnete sind fast frei von Rückständen. An der Ober- und Unterseite sind die meisten Rückstände zu erkennen.

Bei der Demontage des gesamten Validierungsrotors konnten 142 der 144 Magnete zerstörungsfrei demontiert werden, was einer Erfolgsquote von 98,6 % entspricht. Bei den zerstörten Magneten handelt es sich jeweils um große Magnete, die in Abbildung 8-3 dargestellt sind.

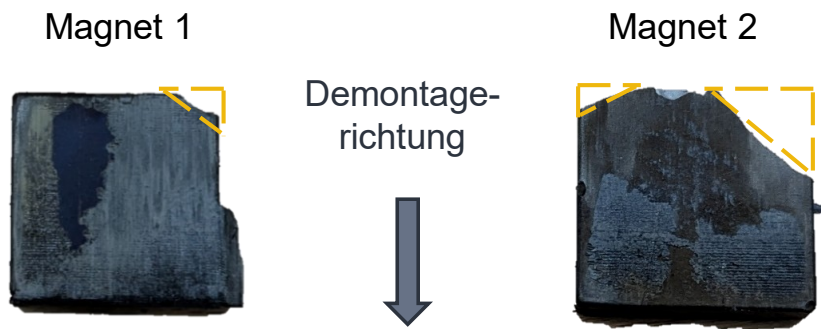


Abbildung 8-3: Schadensbild der zerstörten Magnete.

Es ist jeweils ein Schaden an den Ecken der Magnete zu erkennen. Dies deckt sich mit den Berechnungen, in denen die Druckspannungen deutlich kritischer als die Biegespannungen sind.

Die durchschnittlichen Demontagekräfte der großen und kleinen Magnete liegen bei 14,03 und 10,23 kN. Die experimentelle Schätzung des großen Magneten hat sich damit als sehr präzise erwiesen, während die des kleinen geringfügig höher als in der Realität ausfällt. Die Standardabweichung des großen Magneten liegt bei 4,33 kN und die des kleinen bei 4,41 kN. Die Streuung liegt damit deutlich höher im Vergleich zu vorherigen Versuchen. Dies kann ein Indiz für höhere Schwankungen beim Transfermoldingprozess im Vergleich zum Kleben sein. Diese unerwartet starke Streuung sollte bei der zukünftigen Prozessparametrierung berücksichtigt werden. So kann die Erfolgsquote der zerstörungsfreien Demontage weiter gesteigert werden.

**Zusammenfassung:** Die Modelle zur Berechnung der Demontagekräfte und der Schädigungsmechanismen stoffschlüssiger Magnetfixierungen konnten validiert werden. Allerdings sind im Gegensatz zu Klebewerkstoffen die Werkstoffdaten von Transfermoldingmaterial nicht ausreichend verfügbar, was die Prozessparametrierung deutlich erschwert. Zudem wurden bei der Magnetfixierung mittels Transfermolding unerwartet hohe Streuungen beobachtet.

## 9 Gestaltungsempfehlungen für die Magnetdemontage

Die bisherigen Erkenntnisse der Magnetdemontage werden genutzt, um Empfehlungen für die Produkt- und Prozessgestaltung zu geben.

### 9.1 Produktgestaltung

Bei der Produktgestaltung gilt es neben den Vorteilen von Gestaltungsänderungen für die Magnetdemontage, mögliche Kosten und Auswirkungen auf die Produkteigenschaften zu berücksichtigen.

Bezogen auf die Gestaltung des Rotors konnte in Kapitel 4 gezeigt werden, dass insbesondere die axiale sowie tangential Fixierung des Blechpakets auf der Rotorwelle sowie miteinander verbundene Blechpakete den Demontageprozess erschweren, weshalb die Maßnahmen in Abbildung 9-1 empfohlen werden.

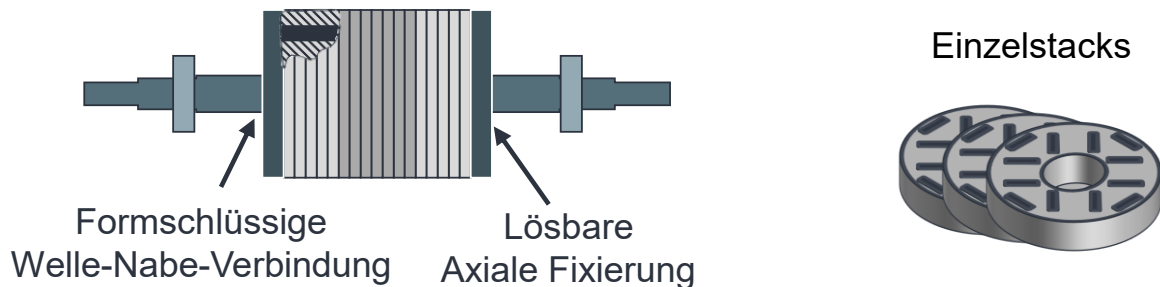


Abbildung 9-1: Empfehlungen zur Gestaltung von PSM Rotoren.

Eine formschlüssige Welle-Nabe-Verbindung zwischen Rotorwelle und Blechpaket, wie eine Passfeder oder eine Zahnwelle, kann das erforderliche Übermaß für die Drehmomentübertragung reduzieren, was ein einfacheres Auspressen ermöglicht. Die axiale Verbindung sollte lösbar gestaltet sein, durch beispielsweise eine Wellenmutter.

Die Magnete sollten in Einzelstacks verklebt werden, sodass keine Verbindung zwischen den einzelnen Blechpaketen besteht. Dadurch entfällt der Spaltprozess der Blechpakete. Alle Empfehlungen sind ohne Auswirkungen auf die Produkteigenschaften umzusetzen, da keine elektromagnetisch aktiven Teile angepasst werden müssen. In Abhängigkeit der Stückzahl können jeweils geringe Mehrkosten in der Produktion entstehen.

Für die Magnetfixierungen haben die Ergebnisse der vorherigen Kapitel aufgezeigt, dass kritische Belastungen, die zum Bruch des Magneten führen können, lediglich bei stoffschlüssigen Magnetfixierungen auftreten. Daher sind grundsätzlich kraftschlüssige

Fixierungen zu empfehlen. Bei kraftschlüssigen Fixierungen gilt es, Beschädigungen an der Magnetbeschichtung während der Montage und Demontage zu berücksichtigen. Das Abkratzen der Beschichtung wird durch eine hohe Flächenpressung, wie beispielsweise durch die Federnase begünstigt. Die Haltekräfte der Magnete müssen die Produktanforderungen erfüllen, weshalb maßgeblich die Kontaktfläche und nicht die Haltekraft der kraftschlüssigen Magnetfixierung angepasst werden sollte. Werkzeuge für die Demontage können mit den entwickelten Modellen dimensioniert werden.

Die thermische Anbindung sowie der magnetische Fluss können bei der Gestaltung der Maschine mit stoffschlüssiger Magnetfixierung im Vergleich zur mechanischen vorteilhaft sein. Daher werden voraussichtlich in Zukunft stoffschlüssige Magnetfixierungen weiterhin eingesetzt. Empfehlungen für die Gestaltung von stoffschlüssigen Magnetfixierungen sind in Abbildung 9-2 dargestellt.

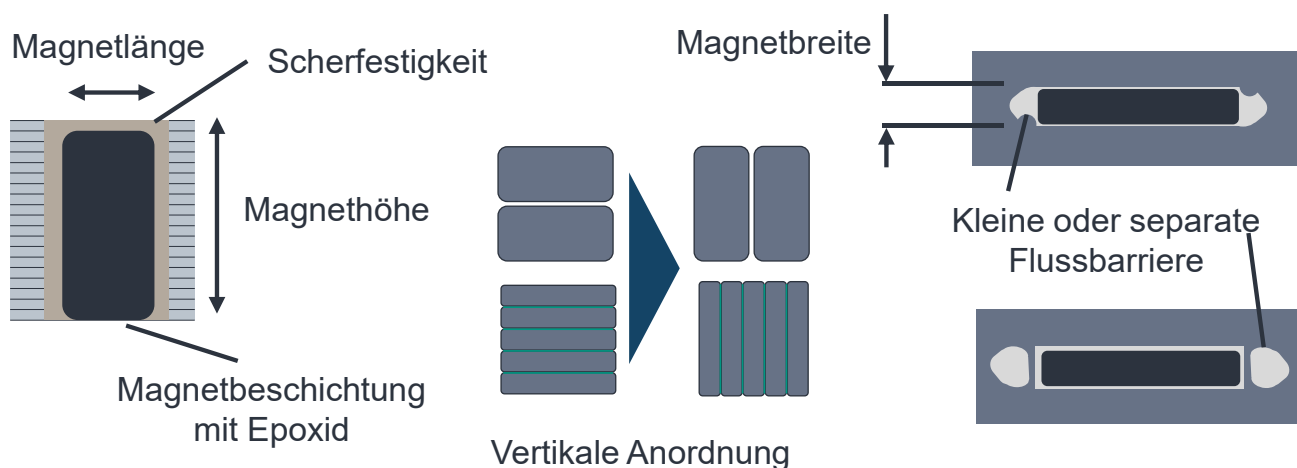


Abbildung 9-2: Gestaltungsempfehlungen für stoffschlüssige Magnetfixierungen.

Die Versuche haben aufgezeigt, dass sich eine Epoxidbeschichtung aufgrund ihrer schützenden Wirkung sehr positiv bezüglich Beschädigungen am Magneten auswirkt. Die Magnetkosten mit Epoxidbeschichtung sind durch den geringfügig komplexeren Beschichtungsprozess minimal gesteigert.

An den eingesetzten Magnetfixierungswerkstoff werden viele Anforderungen hinsichtlich der Produkteigenschaften und der Produktion gestellt. Die Scherfestigkeit besitzt den größten Einfluss auf die Demontagekräfte, sodass im Optimalfall die Scherfestigkeit nicht zu hoch gewählt wird.

Die Magnetabmaße Höhe, Breite und Länge besitzen ebenfalls einen hohen Einfluss, unterliegen allerdings allerdings produktseitig vielen Randbedingungen, weshalb eine Anpassung

bezüglich der Demontage nur sehr schwer möglich ist. Da die elektromagnetische Auslegung stets zweidimensional erfolgt, besitzt die Höhe des Magneten den größten Freiheitsgrad. Die Höhe des Magneten sollte nicht zu kurz gewählt werden, da dies zu größeren Biegespannungen führt. Gleichzeitig führt eine große Höhe zu hohen Demontagekräften und langen Demontagestempeln. Magnete mit dem Aspektverhältnis von 1:1 haben sich als relativ widerstandsfähig erwiesen.

Im Vergleich zu einem regulären Magneten sind Magnetanordnungen mit mehreren Magneten pro Tasche oder segmentierte Magnete deutlich anfälliger gegenüber Beschädigungen. Zur Vermeidung von gesteigerten Biegespannungen und der damit einhergehenden Gefahr des Bruchs, sollte die Magnetanordnung vertikal orientiert werden. Bei verklebten Magnetsegmenten besitzt die vertikale Orientierung keinen Einfluss auf Produktion oder Kosten im Vergleich zur horizontalen Orientierung. Bei mehreren Magneten pro Tasche kann der Montageprozess eine etwas höhere Komplexität aufweisen, da vertikale Magnete nicht sequentiell, sondern gleichzeitig in die Tasche eingeführt werden müssen.

Für die Flussbarrieren konnte beobachtet werden, dass größere Flussbarrieren die Beschädigung der Magnete begünstigt, daher sind kleine oder separate Flussbarrieren zu empfehlen. Im Vergleich zu den anderen Maßnahmen ist bei den Flussbarrieren das Änderungs-Nutzen Verhältnis gering einzustufen.

## **9.2 Prozessgestaltung**

Für die Prozessgestaltung gelten weniger Einschränkungen im Vergleich zur Produktgestaltung, da die Auslegung des Elektromotors nicht berücksichtigt werden muss. Die Empfehlungen in Abbildung 9-3 gelten für stoffschlüssige Fixierungen, da mechanische Fixierungen unkritischer bezüglich der Magnetbeschädigung während der Demontage sind.

Für die Auspressrichtung sollte die Magnetseite mit der dickeren Schicht Magnetfixierung in Abbildung 9-3 gewählt werden. Durch die zusätzliche Schicht können Spannungen gleichmäßiger eingeleitet werden. Der Stempel sollte stets mittig positioniert werden, da eine andere Positionierung keine Vorteile bietet. Der Stempel muss gegen das in Kapitel 6.3 behandelte Knicken abgesichert sein.

Die Länge des Stempels stellt den wichtigsten Prozessparameter für die Spannungsverteilung im Magneten dar. Sie muss unter der Berücksichtigung von

Biegespannungen sowie Druckspannungen gewählt werden. Zudem steht die Länge im Zusammenhang mit dem Spannungsüberhöhungsfaktor bei Druckspannungen. Durch den Einsatz der entwickelten Modelle können die Dimensionen des Stempels optimal hinsichtlich zerstörungsfreier Demontage und Flexibilität gewählt werden.

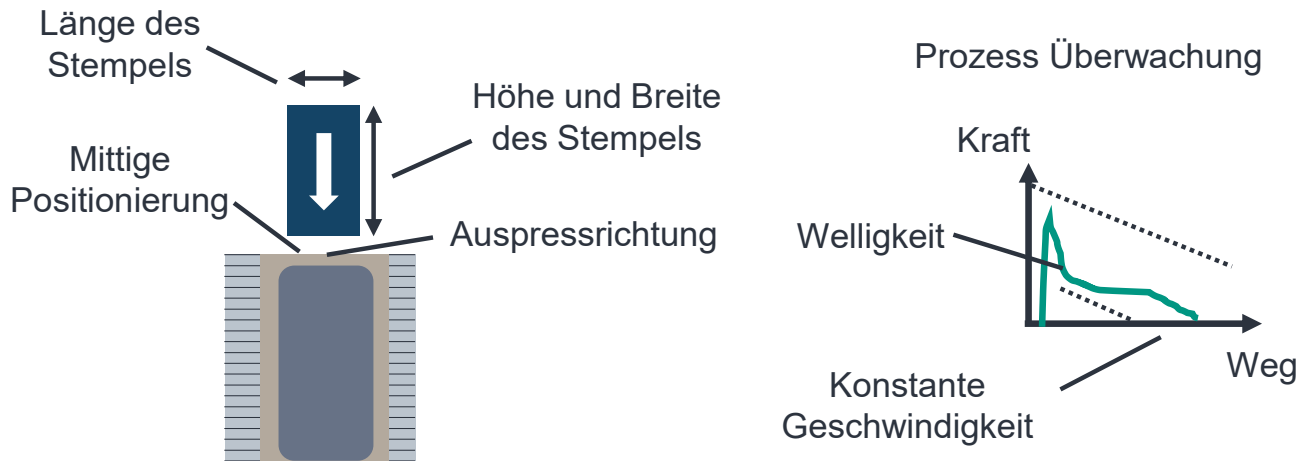


Abbildung 9-3: Gestaltungsempfehlungen für den Magnetdemontageprozess.

Die Prozessführung und -überwachung sind ebenfalls ein wichtiger Bestandteil der Magnetdemontage. Die Geschwindigkeit des Prozesses kann als konstant gewählt werden mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s. Hierdurch sind bereits Taktzeiten von ca. einer Sekunde möglich. Strategien mit unterschiedlichen Kraft-Weg-Geschwindigkeitsprofilen weisen meist eine höhere Taktzeit auf und verringern die Demontagekräfte nur geringfügig.

Für den Demontageprozess ist eine Prozessüberwachung in Form einer Maximalkraft zu empfehlen. Die Maximalkraft kann auf Basis der durchgeführten Berechnungen und Versuche für die verschiedenen Arten der Magnetfixierung bestimmt werden. Beim Überschreiten der Maximalkraft kann der Prozess zur Vermeidung von Schäden von Werkzeugen, Magnet, Blechpaket und der Demontagezelle abgebrochen werden. Bei kraftschlüssigen Verbindungen ist dies ebenfalls relevant. Schäden am Magneten sind hier aufgrund der geringeren Demontagekräfte unwahrscheinlich. Das Nutzen von relativ kleinen Werkzeugen für eine möglichst große Anzahl von Magnetgeometrien macht diese jedoch anfällig für Werkzeugschäden.

Zuletzt können innerhalb des Prozesses die durchschnittliche Demontagekraft und die Welligkeit der Auspresskurve analysiert werden. Eine hohe durchschnittliche Kraft und Welligkeit spricht für die Anhaftung von einem großen Anteil der Magnetfixierung.

Magnete können so automatisch in unterschiedliche Klassen zur Weiterverarbeitung eingeteilt werden.

### 9.2.1 Vorgehensweise zur Prozessparametrierung

Um darzulegen, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Form die Prozessgestaltungsempfehlungen in den Magnetdemontageprozess einfließen, ist in Abbildung 9-4 die Vorgehensweise zur Prozessparametrierung dargestellt und im Folgenden detailliert beschrieben. Die Vorgehensweise bezieht sich auf stoffschlüssige Magnetfixierungen, da deren Parametrierung im Vergleich zu kraftschlüssigen Magnetfixierungen herausfordernder ist.



Abbildung 9-4: Vorgehensweise zur Prozessparametrierung bei der Magnetdemontage.

## **Rotordaten beziehen**

Zunächst werden Daten des vorliegenden Rotors für die Prozessparametrierung benötigt. Diese umfassen Herstellerangaben zu den Eigenschaften der Magnetfixierung sowie die Eigenschaften von Blechpaket und Magneten. Idealerweise stellen Fahrzeug- und Motorenhersteller diese Daten zur Verfügung, um eine ressourceneffiziente Magnetaufbereitung zu ermöglichen. Andernfalls können Daten von beispielsweise Benchmarking-Dienstleistern oder Datenblätter von Klebstoffzulieferern genutzt werden.

## **Maximale Demontagekräfte bestimmen**

Die Rotordaten des vorhergehenden Schritts werden als Input für das in Kapitel 6.1 entwickelte Finite-Elemente-Modell eingesetzt und die maximale Demontagekraft bestimmt. Die maximale Demontagekraft ist essentiell für die folgenden Prozessschritte. Der Einfluss der Alterung kann ebenfalls in diesem Schritt berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wurde eine Reduktion der Demontagekraft von 18 % aufgrund der Alterung festgestellt. Alternativ können andere empirische Werte eingesetzt werden oder für eine konservative Abschätzung keine Alterung berücksichtigt werden.

## **Berechnung Druckbeanspruchung**

Basierend auf der maximalen Demontagekraft und der Druckfestigkeit der Magnete kann die Druckbeanspruchung der Magnete gemäß Kapitel 6.1.5.1 bestimmt werden. Der in Kapitel 7.3.1 ermittelte Spannungsüberhöhungsfaktor fließt hier ebenfalls mit ein. Daraus wird die erforderliche Stempelquerschnittsfläche ermittelt. Mithilfe der Berechnung kann überprüft werden, ob ein vorhandener Stempel geeignet ist, oder es können erforderliche Abmessungen für einen neuen Stempel bestimmt werden.

## **Berechnung Biegebeanspruchung**

Analog zur Druckbeanspruchung kann anhand der in Kapitel 6.1.5.2 abgeleiteten analytischen Berechnungsvorschrift die Biegebeanspruchung der Magnete bestimmt werden. Die erforderliche Länge und Breite des Stempels für eine zerstörungsfreie Demontage kann daraus abgeleitet werden. Die zuvor bestimmte Querschnittsfläche des Stempels darf dabei nicht unterschritten werden.

## **Berechnung Knickbeanspruchung**

Der Stempel wird gemäß Kapitel 6.3 hinsichtlich des Knickens dimensioniert. Hierdurch wird die maximale Länge des Stempels definiert.

### **Konstante Parameter**

Prozessparameter, die nach den Prozessempfehlungen stets gleich und konstant gewählt werden können, werden integriert. Dies beinhaltet eine Demontagegeschwindigkeit von 20 mm/s, eine mittige Ausrichtung des Stempels sowie die Auspressrichtung von der Oberseite. Diese Parameter wurden in den Versuchen in Kapitel 7.3.1 bestimmt.

### **Prozessüberwachung**

Mittels der berechneten maximalen Demontagekraft und der Stempelgeometrie kann die maximale Prozesskraft definiert werden. Um Schäden am Magneten, Stempel und der Maschine zu vermeiden, bricht der Prozess beim Erreichen dieser Kraft ab. Mögliche Fehler des Positioniersystems oder andere Fehler können so vermieden werden.

### **Welligkeit des Auspresskraftverlaufs**

Die Versuche von Kapitel 7.3.1 haben aufgezeigt, dass eine Welligkeit im Demontagekraftverlauf mit der Wellenlänge der Blechstärke auf viele Kleberückstände am Magneten schließen lässt. Daher kann der Kraftverlauf während des Demontageprozesses analysiert werden, um die demontierten Magnete direkt beim Auspressen zu klassifizieren und beispielsweise unterschiedlich weiterzuverarbeiten.

Mit der Umsetzung aller Schritte ist der Prozess vollständig parametrisiert und die Demontage kann erfolgreich umgesetzt werden.

## 10 Zusammenfassung und Ausblick

### 10.1 Zusammenfassung

Die Elektrifizierung des Verkehrssektors zur Reduktion der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen mindert die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, erfordert aber den Einsatz anderer Ressourcen wie Seltene Erden. Diese kommen vorwiegend in Form von Hochleistungsmagneten im elektrischen Traktionsmotor zum Einsatz. Die Problematik bezüglich hoher Materialkosten, negativer Umwelteinwirkungen sowie politischer Abhängigkeiten von Seltenen Erden kann mithilfe der Zirkulärwirtschaft gemindert werden. Die Demontage von End-of-Life Produkten mit anschließender Aufbereitung der Seltenerd-magnete bietet vor diesem Hintergrund hohes Potenzial. Nichtlösbare Verbindungselemente, insbesondere für die Magnetfixierung, stellen in Bezug auf die Demontage eine große Herausforderung dar. Prozesse für hochwertige Werterhaltungsstrategien erfordern bestmögliches Magnetmaterial und damit eine zerstörungsfreie Demontage der Magnete. Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und die Demontage unterschiedlicher elektrischer Traktionsantriebe erfordern eine Flexibilisierung und Automatisierung des Demontageprozesses. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Zielstellung zur automatisierten, flexiblen und zerstörungsfreien Magnetdemontage.

Der Betrachtungsraum bezieht sich auf elektrische Traktionsantriebe, wobei stoffschlüssige Magnetfixierungen sowie die mechanischen Magnetfixierungen mittels Federnase und Federblech untersucht wurden. Zunächst wurden produkt- und prozessseitige Einflussgrößen des Demontageprozesses identifiziert und klassifiziert. Es wurden analytische und numerische Modelle zur Bestimmung von Demontagekräften sowie Bauteilspannungen entwickelt, die zudem für die Untersuchung von verschiedenen Einflussgrößen genutzt wurden. Bei mechanischen Magnetfixierungen bestimmten vorrangig die Geometrieparameter des jeweiligen Federelements die Demontagekräfte. Die maximalen Demontagekräfte der mechanischen Fixierungen fielen deutlich geringer aus als die der stoffschlüssigen. Bei stoffschlüssigen Magnetfixierungen waren die Magnetgeometrie sowie die Werkstoffeigenschaften des Klebstoffs ausschlaggebend für die Demontagekräfte. Kritische Bauteilbelastungen stellten Biegespannungen sowie Druckspannungen dar, die von der Magnet- und Demontagewerkzeuggeometrie sowie der Demontagekraft bestimmt wurden.

Anschließend wurde eine Demontagezelle für die Durchführung von experimentellen Versuchsreihen entwickelt. Mittels eines Screening Versuchsplans wurde zunächst der

Einfluss verschiedener Parameter experimentell betrachtet und danach wurden besonders relevante Parameter mittels faktorieller Versuchspläne näher untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass Magnete mit Epoxidbeschichtung deutlich robuster gegenüber Beschädigungen waren. Die Beschichtung war darüber hinaus in Kombination mit dem Werkstoff der Magnetfixierung für die Anhaftung von Rückständen der Magnetfixierung verantwortlich. Prozessseitig konnte die Anhaftung der Magnetfixierung nicht beeinflusst werden. Lediglich eine Vorhersage der Anhaftung anhand der durchschnittlichen Demontagekraft und Welligkeit der Demontagekurve ist möglich, auf deren Basis eine Reinigung der Magnete vorbereitet werden kann. Der Alterungszustand der Magnete reduzierte die maximalen Auspresskräfte, was positiv in Bezug auf die Demontage zu bewerten ist. Zudem zeigten die Demontagegeschwindigkeiten sowie verschiedene Kraft-Geschwindigkeitsprofile nur einen geringen Einfluss auf. Die zuvor entwickelten Modelle wiesen eine hohe Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen auf.

Die Validierung der Magnetdemontage erfolgte durch die Demontage eines elektrischen Traktionsantriebs, anhand dessen die Prozessparametrierung des Demontageprozesses durchlaufen wurde. Die Demontage konnte erfolgreich durchgeführt werden, wobei fehlende Werkstoffdaten des Transfermoldingmaterials die Vorhersage der Demontagekräfte erschwerten.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden Empfehlungen für die zukünftige produkt- und prozessseitige Gestaltung von Magnetfixierungen beschrieben. Produktseitig sind mechanische Magnetfixierungen den stoffschlüssigen aufgrund der geringeren Demontagekräfte und damit der vereinfachten zerstörungsfreien Demontage vorzuziehen. Bei stoffschlüssigen Fixierungen sind insbesondere miteinander verklebte Blechpakete, sehr hohe Scherfestigkeiten der Magnetfixierung sowie unvorteilhafte Aspektverhältnisse von Magneten zu vermeiden. Beim Demontageprozess ist die Wahl des Werkzeugs sowie die Vorhersage der Demontagekraft essentiell. Die entwickelten Modelle bieten in diesem Zusammenhang Unterstützung.

## **10.2 Ausblick**

Kurzfristig kann der Magnetdemontageprozess an weiteren elektrischen Traktionsmotoren umgesetzt werden und deren Ergebnisse empirisch in die bestehenden Modelle integriert werden. Der Spannungsüberhöhungsfaktor kann durch weitere Demontageversuche für unterschiedliche Parameterkombinationen präzisiert werden. Zudem können Werkstoffparameter für z.B. Transfermolding-Werkstoffe anhand von Versuchen

abgeschätzt werden. Empirische Werte für die Degradation des Klebstoffs, aufgrund von Alterung, die zur Reduktion der maximalen Demontagekraft führen, können ebenfalls bestimmt werden.

Mittelfristig ist eine bessere Verfügbarkeit von Materialdaten durch empirische Versuche oder erweiterter Herstellerangaben anzustreben. Zudem sind die verwendeten Magnetfixierungswerkstoffe nicht ausreichend in Rotoren gekennzeichnet. Kennungen wie QR-Codes für digitale Zwillinge sind bereits an Rotoren vorhanden. Die Daten können jedoch nur vom Hersteller gelesen werden. Für neuartige Magnetfixierungskonzepte können weitere Modelle abgeleitet werden, falls diese an industrieller Relevanz gewinnen.

Die aktuell bestehenden Modelle sollten in die Demontagezelle mit einem entsprechendem Userinterface integriert werden, um eine einfache Prozessparametrierung an der Maschine für Produktionsmitarbeiter zu ermöglichen. Für die Integration des Finiten-Elemente-Modells für die Bestimmung der maximalen Demontagekräfte ist ggf. ein vereinfachtes Metamodell zur Reduktion der Rechenzeit erforderlich.

Die produktseitigen Empfehlungen für die Gestaltung von Magnetfixierungen sollten in die Praxis der Elektromotorengestaltung eingebracht werden. Aufgrund der langen Entwicklungszyklen sowie der Lebensdauer von Fahrzeugen sollte dies möglichst zeitnah erfolgen.

Langfristig sollten mit der zunehmenden Marktdurchdringung von elektrischen Fahrzeugen und der damit zunehmenden Anzahl an Rückläufern Ansätze zur Steigerung der Produktivität des Demontageprozesses anvisiert werden. Die simultane Demontage mehrerer Magnete bietet Potenzial. Erkenntnisse der Einzelmagnetdemontage können zu diesem Zweck zielgerichtet übertragen werden. Eine Beibehaltung der Flexibilität bezüglich unterschiedlicher Rotorgeometrien wäre dabei vorteilhaft.



## 11 Literaturverzeichnis

Verweise gemäß dem Schema (A\_Name Jahr) beziehen sich auf studentische Arbeiten, die vom Verfasser der Dissertation angeleitet wurden.

A\_Cassiani 2024

A\_Cassiani (2024), *Prozessentwicklung und Optimierung der Montage und Demontage mittels Federblech fixierter Magnete aus elektrischen Traktionsmotoren*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Claassen 2024

A\_Claassen (2024), *Experimentelle Parameterstudie mittels statistischer Versuchsplanung für die Demontage von Magneten aus Permanentmagneterregten Synchronmaschinen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Dengel 2024

A\_Dengel (2024), *Optimierung der zerstörungsfreien Magnetdemontage durch Analyse von Prozessparametern und Versagensarten*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Lalla 2024

A\_Lalla (2024), *Prozesskonzeption und -entwicklung für die Demontage von NdFeB Magneten aus PSM-Rotoren*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Walter 2023

A\_Walter (2023), *FE-Simulation für die Vorhersage von Demontagekräften von Seltenerd magneten bei stoffschlüssigen Verbindungen in elektrischen Traktionsmotoren*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A\_Weimann 2023

A\_Weimann (2023), *Experimentelle Parameterstudie zur Demontage von Magneten mit federnder Magnetfixierung*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

Albrecht 2014

Albrecht, T. (2014), *Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren*

*getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen*. Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg.

Albrecht & Koenig 2012

Albrecht, T. & Koenig, W. (2012), *Permanentmagneteinheit, Rotor und Verfahren zur Herstellung des Rotors*. Daimler AG, DE 102012003453 (A1).

Arnold Magnetic Technologies 2025

Arnold Magnetic Technologies (2025), *Neodym-Eisen-Bor-Magnete*.

<https://www.arnoldmagnetics.de/products/neodymium-iron-boron-magnets/> [Zugriff am 07.04.2025].

Assmann & Selke 2013

Assmann, B. & Selke, P. (2013), *Technische Mechanik 2. Band 2: Festigkeitslehre*, Oldenbourg Verlag, München.

Asuman et al. 2020

Asuman, F.; Emin, G.; Pevrul, S. & Gokhan, E. (2020), *Magnet retainer for use in an electric motor*. Arcelik Anonim Sirketi, US 10,566,864 B2.

Audi AG 2024

Audi AG (2024), *Audi Q6 e-tron quattro. Rotor der E-Maschine hinten: Permanent erregte Synchronmaschine (PSM)*. [https://uploads.audi-mediacyber.com/system/production/media/123186/images/9ee7b056b034adc1170b981bc259b17a0d6ffcb3/A241075\\_web\\_1920.jpg?1710520608](https://uploads.audi-mediacyber.com/system/production/media/123186/images/9ee7b056b034adc1170b981bc259b17a0d6ffcb3/A241075_web_1920.jpg?1710520608) [Zugriff am 07.04.2025].

Auerbach et al. 2017

Auerbach, R.; Brämer, T. & Brouwer E. (2017), *RECVAl-HPM Innovative RE-use and ReCycling VALue Chain for High-Power Magnets. Innovative Reuse- und Recycling-Wertschöpfungskette für Hochleistungspersistentmagnete*. Schlussbericht zum Verbundvorhaben. [https://www.iwks.fraunhofer.de/content/dam/iwks/de/documents/clippings/2024/et\\_4\\_2024\\_Recycling%20von%20Selten-Erd-Permanentmagneten.pdf](https://www.iwks.fraunhofer.de/content/dam/iwks/de/documents/clippings/2024/et_4_2024_Recycling%20von%20Selten-Erd-Permanentmagneten.pdf) [Zugriff am 07.05.2025].

Auerbach et al. 2019

Auerbach, R.; Bokelmann, K.; Stauber, R.; Gutfleisch, O.; Schnell, S. & Ratering, S. (2019), „Critical raw materials – Advanced recycling technologies and processes: Recycling of rare earth metals out of end of life magnets by bioleaching with

various bacteria as an example of an intelligent recycling strategy“, *Minerals Engineering* (134), S. 104–117.

Baazouzi et al. 2023

Baazouzi, S., et al. (2023), *Industrielle Demontage von Batteriemodulen und E-Motoren zur Sicherung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe für die E-Mobilität – DeMoBat. Abschlussbericht*. [https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Projekte/Industrieprojekte/2023\\_12\\_DeMoBat\\_Abschlussbericht.pdf](https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Projekte/Industrieprojekte/2023_12_DeMoBat_Abschlussbericht.pdf) [Zugriff am 07.05.2025].

Baloglu 2021

Baloglu, M. V. (2021), *Identifikation eines Materialmodells geschichteter Blechpakete im Rahmen einer Zwei-Skalen-Modellierung*. Dissertation, Lehrstuhl für Technische Mechanik (LTM), Erlangen.

Banea 2019

Banea, M. D. (2019), „Debonding on Demand of Adhesively Bonded Joints: A Critical Review“, *Rev. Adhesion Adhesives* (Vol. 7, No. 1), S. 33–50.

Bast et al. 2014

Bast, U., et al. (2014), *Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fährantrieben. Abschlussbericht*. MORE (Motor Recycling). <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/a89b5bc4-5b49-422b-8c08-a6f8e05fd71c/download> [Zugriff am 07.05.2025].

Baumeister 2010

Baumeister, J. (2010), *Permanent magnet rotor for an electric motor*. ZF Friedrichshafen AG, EP 2437377 (A1).

Baur 2022

Baur, E. (2022), *Saechtling Kunststoff-Handbuch*, Hanser, München.

BCG Global 2023

BCG Global (2023), *Five Steps for Solving the Rare-Earth Metals Shortage*. <https://www.bcg.com/publications/2023/five-steps-for-solving-the-rare-earth-metals-shortage> [Zugriff am 23.08.2024].

Bekavac et al. 2007

Bekavac, M.; Minnermann, M. & Hofmeister, A. (2007), *Lamellenpaket für einen*

*Rotor oder Stator einer elektrischen Maschine und entsprechende elektrische Maschine.* Robert Bosch GmbH, DE 102007036315 (A1).

Bhuiyan et al. 2023

Bhuiyan, N. A.; Balasubramanian, L.; Fahmy, A. A.; Belblidia, F. & Sienz, J. (2023), „Modelling and Optimization of Interior Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle Applications and Effect on Sustainable Transportation“, *Smart Innovation* (Januar), S. 301–311.

Biden-Harris Administration 2022

Biden-Harris Administration (2022), *FACT SHEET: Securing a Made in America Supply Chain for Critical Minerals*. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/02/22/fact-sheet-securing-a-made-in-america-supply-chain-for-critical-minerals/> [Zugriff am 23.09.2022].

Bilcai et al. 2009

Bilcai, E.; Haslberger, S. & Barriau, E. (2009), *Verfahren zum Befestigen eines Magneten auf oder in einem Rotor oder Stator*. Henkel AG & Co. KGaA, DE 102009028180 (A1).

Bode 2019

Bode, B. (2019), *Zum Verformungs- und Ermüdungsverhalten von Elektroblech*. Dissertation, kassel university press, Kassel.

Böge et al. 2021

Böge, G.; Böge, W. & Kampf, M. (2021), „Stoffschlüssige Verbindungen“ in *Handbuch Maschinenbau. Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, Hrsg. A. Böge, W. Böge, K.-D. Arndt, W. Bahmann, L. Barfels, J. Bauer, G. Böge, M. Dehli, B. Heinrich, A. Hirsch, M. Kampf, A. Kemnitz, P. Kurzweil, S. Labisch, P. Linke, W. Roddeck, K. Schreiner, J. Sebulke, D. Surek, F. Weidemann & W. Weißbach, Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, S. 709–726.

Böttger et al. 2016

Böttger, T.; Farkas, V.; Kalavsky, M. & Walter, A. (2016), *Elektrischer Antriebsmotor*. BSH Hausgeräte GmbH, DE 102016218540 (A1).

Burkhardt 2018

Burkhardt, C. (2018), *Abschlussbericht REProMag. Resource Efficient Production Route for Rare Earth Magnets*.

<https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b8e5f55d&appld=PPGMS> [Zugriff am 07.05.2025].

Burkhardt et al. 2024

Burkhardt, C.; Ortiz, F.; Daoud, K.; Björnfort, T.; Ahrentorp, F.; Blomgren, J. & Walton, A. (2024), „Automated High-Speed Approaches for the Extraction of Permanent Magnets from Hard-Disk Drive Components for the Circular Economy“, *Magnetism* (4), S. 295–304.

Burkhardt et al. 2021

Burkhardt, C.; Lehmann, A.; Fleissner, P.; Grau, L.; Trautz, M.; Mungenast, M.; Podmiljšak, B. & Kobe, S. (2021), „Comparative Evaluation of Anti-Corrosion Coatings for NdFeB-Type Magnets with Respect to Performance and Recyclability via Hydrogen-Assisted Recycling (HPMS)“, *Material proceedings* (5), S. 87–97.

Campilho et al. 2013

Campilho, R.; Banea, M. D.; Neto, J. & Da Silva, L. (2013), „Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer“, *International Journal of Adhesion and Adhesives* (44), S. 48–56.

Campilho & Fernandes 2015

Campilho, R. & Fernandes, T. (2015), „Comparative Evaluation of Single-lap Joints Bonded with Different Adhesives by Cohesive Zone Modelling“, *1st International Conference on Structural Integrity*, 01.-04.09.2015, Funchal, Portugal (Procedia Engineering 114), S. 102–109.

Checa Fernández et al. 2023

Checa Fernández, B. L.; Martín, J. M.; Sarriegui, G. & Burgos, N. (2023), „Effect of temperature on particle shape, size, and polycrystallinity of Nd-Fe-B powders obtained by hydrogen decrepitation“, *Journal of Materials Research and Technology* (24), S. 1454–1467.

Cherkezova-Zheleva et al. 2024

Cherkezova-Zheleva, Z.; Burada, M.; Sobetskii, A. E.; Paneva, D.; Fironda, S. A. & Piticescu, R.-R. (2024), „Green and Sustainable Rare Earth Element Recycling and Reuse from End-of-Life Permanent Magnets“, *Metals* (14), S. 658–672.

Chung et al. 2022

Chung, H.; Stopic, S.; Emil-Kaya, E.; Gürmen, S. & Friedrich, B. (2022), „Recovery

of Rare Earth Elements from Spent NdFeB-Magnets: Separation of Iron through Reductive Smelting of the Oxidized Material (Second Part)“, *Metals* (12), S. 1–13.

Ciro et al. 2019

Ciro, E.; Alzate, A.; López, E.; Serna, C. & Gonzalez, O. (2019), „Neodymium recovery from scrap magnet using ammonium persulfate“, *Hydrometallurgy* (186), S. 226–234.

Crippa et al. 2024

Crippa, M.; Guizzardi, D.; Pagani, F.; Banja, M.; Muntean, M.; Schaaf, E.; Monforti-Ferrario, F.; Becker, W.; Quadrelli, R.; Riskey Martin, A.; Taghavi-Moharamli, P.; Köykkä, J.; Grassi, G., Rossi, S.; Melo, J.; Oom, D.; Branco, A.; San-Miguel, J.; Manca, G.; Pisoni, E.; Vignati, E. & Pekar, F. (2024), *GHG emissions of all world countries. JRC Science for Policy Report*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Da Rocha, R. J. B. 2016

Da Rocha, R. J. B. (2016), *Evaluation of different damage initiation and growth criteria in the cohesive zone modelling analysis of single-lap bonded joints*. Masterthesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Mechanical Engineering.

Delo 2020

Delo (2020), *DELO-Klebstoffe für Anwendungen im Elektromotor*.

[https://www.delo.de/fileadmin/files/brochures/de/adhesives\\_for\\_e-motors-de.pdf](https://www.delo.de/fileadmin/files/brochures/de/adhesives_for_e-motors-de.pdf) [Zugriff am 09.04.2025].

Delo 2023

Delo (2023), *Delo-ML DB140. Technisches Datenblatt*. [https://www.delo.de/service-center/downloadbereich/downloads/datasheet/DELO-ML\\_DB140\\_TIDB-de.pdf?show=1&type=5001&cHash=466a3e7a101e66f2e24dbbb1c2c49513](https://www.delo.de/service-center/downloadbereich/downloads/datasheet/DELO-ML_DB140_TIDB-de.pdf?show=1&type=5001&cHash=466a3e7a101e66f2e24dbbb1c2c49513) [Zugriff am 09.04.2025].

Delo 2024

Delo (2024), *DELO Monopox HT2999. Technisches Datenblatt*.

[https://www.delo.de/service-center/downloadbereich/downloads/datasheet/DELO%20MONOPOX\\_HT2999\\_TIDB-de.pdf?show=1&type=5001&cHash=466a3e7a101e66f2e24dbbb1c2c49513](https://www.delo.de/service-center/downloadbereich/downloads/datasheet/DELO%20MONOPOX_HT2999_TIDB-de.pdf?show=1&type=5001&cHash=466a3e7a101e66f2e24dbbb1c2c49513) [Zugriff am 09.04.2025].

Dentry et al. 2023

Dentry, E., et al. (2023), *Five Steps for Solving the Rare-Earth Metals Shortage*. <https://www.bcg.com/publications/2023/five-steps-for-solving-the-rare-earth-metals-shortage> [Zugriff am 30.07.2024].

Dias et al. 2020

Dias, P.; Bobba, P.; Carrara, S. & Plazotta, B. (2020), *The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility. An analysis of future supply/demand balances*, Publication Office of the European Union, Luxembourg.

DIN 8593-8:2003-09

DIN 8593-8:2003-09 (2003). *Fertigungsverfahren Fügen Teil 8: Kleben - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN 8580:2022-12

DIN 8580:2022-12 (2022). *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*, Beuth Verlag, Berlin.

DIN/TS 54405:2020-12

DIN/TS 54405:2020-12 (2020). *Konstruktionsklebstoffe - Leitlinie zum Trennen und Rückgewinnen von Klebstoffen und Fügeteilen aus geklebten Verbindungen*, Beuth Verlag, Berlin.

Do et al. 2023

Do, S. H.; Hong, N. H. & Kim, K. B. (2023), *Structure for fixing permanent magnet in rotor core*. Hynday Motor Co Ltd [Kr]; Kia Corp. [Kr], US 2023318374 (A1).

Dönges & Schulte 2021

Dönges, B. & Schulte, M. (2021), *Permanent magnet fastening structure, rotor and motor*. Muhr und Bender KG, 215120330U.

Doppelbauer 2025

Doppelbauer, M. (2025), *Grundlagen der Elektromobilität. Technik, Praxis, Energie und Umwelt*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg.

Du et al. 2016

Du, J.; Wang, X. & Lv, H. (2016), „Optimization of Magnet Shape Based on Efficiency Map of IPMSM for EVs“, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* (Vol. 16, No. 7), S. 1–7.

Du et al. 2023

Du, C.; Ma, S.; Xie, M.; Yang, F.; Zhao, Z.; Chen, Y. & Ma, Y. (2023), „Recovery of high-value rare earth elements from waste NdFeB by the water-soluble ammonium salt [Hbet]cl“, *Separation and Purification Technology* (308), S. 1–9.

Eclipse Magnetics

Eclipse Magnetics , *Technical Data Sheet - NdFeB Magnets*. [https://www.eclipse-magnetics.com/site/assets/files/22177/eclipsemagnetics\\_ndfeb\\_datasheet.pdf](https://www.eclipse-magnetics.com/site/assets/files/22177/eclipsemagnetics_ndfeb_datasheet.pdf) [Zugriff am 07.04.2025].

Eclipse Magnetics

Eclipse Magnetics , *NdFeB Magnets / Neodymium Iron Boron Magnets Datasheet*. [https://www.eclipsemagnetics.com/site/assets/files/19485/ndfeb\\_neodymium\\_iron\\_boron-standard\\_ndfeb\\_range\\_datasheet\\_rev1.pdf](https://www.eclipsemagnetics.com/site/assets/files/19485/ndfeb_neodymium_iron_boron-standard_ndfeb_range_datasheet_rev1.pdf) [Zugriff am 07.04.2025].

Elantas 2009

Elantas (2009), *Elan-tron EC5000/W5690. Produktdatenblatt* .

Elantas 2013

Elantas (2013), *Elan-tron EC5100/W5620. Produktdatenblatt* .

Elwert et al. 2017

Elwert, T.; Goldmann, D.; Roemer, F. & Schwarz, S. (2017), „Recycling of NdFeB Magnets from Electric Drive Motors of (Hybrid) Electric Vehicles“, *Journal of Sustainable Metallurgy* (3), S. 108–121.

e-Magnets 2025

e-Magnets (2025), *Physical properties and characteristics of NdFeB magnets*. <https://e-magnetsuk.com/introduction-to-neodymium-magnets/characteristics-of-ndfeb-magnets> [Zugriff am 07.05.2025].

Epoxy Technology

Epoxy Technology , *Verstehen von mechanischen Eigenschaften von Epoxidklebstoffen für die Anwendung der Finiren-Elemente-Analyse (FEA)*. <https://www.e-potek.com/docs/en/Related/Tech%20Tip%2019%20Understanding%20Mechanical%20Properties%20of%20Epoxies%20For%20Modeling%2C%20Finite%20Element%20Analysis%20%28FEA%29.DE.pdf> [Zugriff am 19.03.2025].

---

#### Epskamp 2020

Epskamp, T. (2020), *Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine*. Dissertation, Elektrotechnisches Institut (ETI), Karlsruhe.

#### Erdmann et al. 2023

Erdmann, J. G.; Koller, J.; Brimaire, J. & Döpfer, F. (2023), „Assessment of the disassemblability of electric bicycle motors for remanufacturing“, *Journal of Remanufacturing* (13), S. 137–159.

#### Europäische Union 2023

Europäische Union (2023), *Verordnung über Batterien und Altbatterien*, Europäische Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542> [Zugriff am 07.05.2025].

#### European Environment Agency 2018

European Environment Agency (2018), „Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives. TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report“, *EEA Report* (No. 13).

#### Ferreira & Critelli 2022

Ferreira, G. & Critelli, J. (2022), „China’s Global Monopoly on Rare-Earth Elements“, *The US Army War College Quarterly: Parameters* (52), S. 57–72.

#### Franke et al. 2015

Franke, J.; Hofmann, B.; Tremel, J. & Meyer, A. (2015), „Innovative Methods for Automated Assembly and Fixation of Permanent Magnets in Electrical Machines“, *12th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 22.-24.09.2014, Johor Bahru, Malaysia (Procedia CIRP 26), S. 724–728.

#### Fröhlich 2016

Fröhlich, H. (2016), *Befestigung eines Permanentmagnets innerhalb eines Rotorblechpakets*. Continental Automotive GmbH, DE 102016201281 (B3).

#### Fuels Institute 2022

Fuels Institute (2022), „Life Cycle Analysis Comparison. Electric and internal combustion engine vehicles“, *Fuels Institute* (Januar), S. 1–66.

## Gilde 2020

Gilde, C. (2020), *Rotor und Verfahren zur Herstellung eines Rotors*. Schaeffler Technologies AG, DE 102020111305 (A1).

## Gilde &amp; Blaes 2020

Gilde, C. & Blaes, C. (2020), *Rotor mit klebefreier Magnetfixierung durch Zusatzbauteil, Elektromotor und Verfahren zum Herstellen eines Rotors*. Schaeffler Technologies AG, DE 102020109798 (A1).

## Gross et al. 2014

Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J. & Wall, W. A. (2014), *Technische Mechanik 2*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

## Grote &amp; Feldhusen 2014

Grote, K.-H. & Feldhusen, J. (2014), *Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

## Habenicht 2016

Habenicht, G. (2016), *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg.

## Hansjosten et al. 2024

Hansjosten, M.; Baumgärtner, J. & Fleischer, J. (2024), „Generalized Partially Destructive Disassembly Planning for Robotic Disassembly“, *2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 13.-17.05.2024, Yokohama, Japan (IEEE), S. 1978–1984.

## Hansjosten &amp; Fleischer 2023

Hansjosten, M. & Fleischer, J. (2023), „Disassembly Graph Generation and Sequence Planning Based on 3D Models for the Disassembly of Electric Motors“, *13th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, 20.-23.11.2023, Freudenstadt (Springer), S. 448–457.

## Heim et al. 2025

Heim, M.; Klein, N.; Lalla, F.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2025), „Flexible and Robust Magnet Disassembly Cell for Electric Traction Motors“, *8th International Conference on Sustainable Manufacturing (ICSM)*, 30.10.-01.11.2024, Shanghai, China, 61-74.

## Heim et al. 2023a

Heim, M.; Wirth, F.; Boschert, L.; Acker, D.; Klein, N. & Fleischer, J. (2023), „Wave Spring-Based Magnet Fixations for Electric Traction Motors“, *13th International Electric Drive Production Conference (EDPC)*, 29.-30.11.2023, Regensburg (IEEE), S. 1–7.

## Heim et al. 2024

Heim, M.; Klein, N.; Claassen, T.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2024), „Experimental Parameter Analysis for the Disassembly of Magnets from Electric Traction Motors“, *14th International Electric Drive Production Conference (EDPC)*, 26.-27.11.2024, Regensburg (IEEE), S. 1–7.

## Heim et al. 2023b

Heim, M.; Wirth, F.; Boschert, L. & Fleischer, J. (2023), „An Approach for the Disassembly of Permanent Magnet Synchronous Rotors to Recover Rare Earth Materials“, *30th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE)*, 15.-17.05.2023, New Brunswick, USA (Procedia CIRP Volume 116), S. 71–76.

## Hirsch &amp; Schempp 2020

Hirsch, P. & Schempp, C. (2020), *Categorisation system for the circular economy. A sector-agnostic categorisation system for activities substantially contributing to the circular economy*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

## Hofer et al. 2018

Hofer, M.; Nikowitz, M. & Schrödl, M. (2018), „Auslegung einer Einzelpol-Synchron-Reluktanzmaschine hinsichtlich sensorlosen Betriebs eines industriellen Antriebs“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 135 (2), S. 153–160.

## Hogberg et al. 2015

Hogberg, S.; Bendixen, F. B.; Mijatovic, N.; Bech Jensen, B. & Holboll, J. (2015), „Influence of demagnetization-temperature on magnetic performance of recycled Nd-Fe-B magnets“, *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, 10.-13.05.2025, Coeur d'Alene, USA (IEEE), S. 1242–1246.

## Hogberg et al. 2016

Hogberg, S.; Pedersen, T. S.; Bendixen, F. B.; Mijatovic, N.; Jensen, B. B. & Holboll, J. (2016), „Direct reuse of rare earth permanent magnets — Wind turbine generator case study“, *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 04.-07.09.2016, Lausanne, Schweiz (IEEE), S. 1625–1629.

## HS Magnets

HS Magnets , *Advantages of Neodymium Magnet Epoxy Coating*.

<https://www.hsmagnets.com/blog/advantages-of-neodymium-magnet-epoxy-coating/> [Zugriff am 07.05.2025].

## Hyundai 2025

Hyundai (2025), *Performance. Explore the performance of the IONIQ 5 N*.

<https://www.hyundai.com/de/de/modelle/ioniq-5-n/antriebe.html> [Zugriff am 14.12.2025].

## Ihne et al. 2023a

Ihne, T.; Wieprecht, N.; Hahn, R.; Franke, J. & Kühl, A. (2023), „Analysis of induction-based thermal demagnetization of a permanent magnet rotor in the context of recycling“, *13th International Electric Drive Production Conference (EDPC)*, 29.-30.11.2023, Regensburg (IEEE), S. 1–6.

## Ihne et al. 2024a

Ihne, T.; Hahn, R.; Wieprecht, N.; Franke, J. & Kühl, A. (2024), „Recycling Concept for Electric Vehicle Drives in the Context of Rare Earth Recovery“, *1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS)*, 05.-06.06.2024, Bamberg (IEEE), S. 1–9.

## Ihne et al. 2024b

Ihne, T.; Hahn, R.; Kühl, A. & Franke, J. (2024), „Approaches For The Physical Sorting Of Soft And Hard Magnetic Material Mixtures In The Context Of Rare Earth Recycling“, *6th Conference on Production System and Logistics (CPSL)*, 09.-12.07.2024, Honolulu, USA (Publish-Ing.), S. 697–708.

## Ihne et al. 2023b

Ihne, T.; Hahn, R.; Wieprecht, N.; Franke, J. & Kühl, A. (2023), „Approach for Advanced Mechanical Recycling Strategies of Rare Earth Magnets Applied in Traction Drives“, *Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*, 20.-23.11.2023, Freudenstadt (Springer), S. 458–468.

## Itoh et al. 2004

Itoh, M.; Masuda, M.; Suzuki, S. & Machida, K. (2004), „Recycling of rare earth sintered magnets as isotropic bonded magnets by melt-spinning“, *Journal of Alloys and Compounds* (374), S. 393–396.

Jeon et al. 2021

Jeon, Y.; Hur, J.; Jeong, G. Y.; Sohn, S. & Park, J. (2021), „Selective and efficient extraction of Nd from NdFeB magnets via ionization in LiCl-KCl-CdCl<sub>2</sub> melt“, *Journal of Alloys and Compounds* (860), S. 1–10.

Jin et al. 2018

Jin, H.; Afiuny, P.; Dove, S.; Furlan, G.; Zakotnik, M.; Yih, Y. & Sutherland, J. W. (2018), „Life Cycle Assessment of Neodymium-Iron-Boron Magnet-to-Magnet Recycling for Electric Vehicle Motors“, *Environmental science & technology* (52), S. 3796–3802.

Jugovic & El 2016

Jugovic, S. & El, B. K. (2016), *Machine électrique tournante comportant des éléments de maintien*. Valeo Equip Electriques Moteur, FR 3060891 (A1).

Kalt 2021

Kalt, S. (2021), *Automatisierte Auslegung elektrischer Antriebsmaschinen zur anwendungsspezifischen Optimierung*. Dissertation, TUM School of Engineering and Design, München.

Kishi T.

Kishi T. , *IPM Rotor and Rotating Electric Machine*. Honda Motor Co. Ltd., JP 000006940965 B2.

Klier et al. 2013a

Klier, T.; Risch, F. & Franke, J. (2013), „Disassembly strategies for recovering valuable magnet material of electric drives“, *3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 29.-30.10.2013, Nürnberg (IEEE), S. 1–3.

Klier et al. 2013b

Klier, T.; Risch, F. & Franke, J. (2013), „Disassembly, recycling, and reuse of magnet material of electric drives“, *International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, 30.07-02.08.2013, Xi'an, China (IEEE), S. 88–90.

Koenig 2011

Koenig, W. (2011), *Rotor für eine elektrische Maschine und Verfahren zu dessen Herstellung*. Daimler AG, DE 102011111626 (A1).

Koller et al. 2023

Koller, J.; Grosse Erdmann, J.; Herold, M. & Döpfer, F. (2023), „RemanLab –

Conceptualization and Realization of a Learning Factory for Remanufacturing“, *13th Conference on Learning Factories (CLF)*, 09-11.05.2023, Reutlingen , S. 1–6.

Krings & Monissen 2020

Krings, A. & Monissen, C. (2020), „Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles“, *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 23.-26.08.2020, Gothenburg, Schweden (IEEE), S. 1807–1813.

Kritharidou et al. 2010

Kritharidou, S.; Zernikow, M.; Stoermer, S.; Nommensen, B.; Kupke, N. & Klatter, H. (2010), *Befestigung von Magneten an einem Rotor*. Robert Bosch GmbH, DE 102010039334 (A1).

Lamarre et al. 2024

Lamarre, J.-M.; Ibrahim, M.; Pelletier, R.; Vatandoost, H. & Bernier, F. (2024), „Permanent magnets with embedded phase changing material for electric motor thermal management“, *Journal of Applied Physics* (136), S. 1–8.

Lamprecht 2014

Lamprecht, E. (2014), *Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. Dissertation, Meisenbrach Verlag, Bamberg.

Leuning et al. 2018

Leuning, N.; Steentjes, S.; Weiss, H. A.; Volk, W. & Hameyer, K. (2018), „Magnetic Material Deterioration of Non-Oriented Electrical Steels as a Result of Plastic Deformation Considering Residual Stress Distribution“, *IEEE Transactions on Magnetics* (Vol. 54, No. 11), S. 1–5.

Li et al. 2003

Li, Y.; Evans, H. E.; Harris, I. R. & Jones, I. P. (2003), „The Oxidation of NdFeB Magnets“, *Oxidation of Metals* (59), S. 167–182.

Li et al. 2019

Li, X. T.; Yue, M.; Zhou, S. X.; Kuang, C. J.; Zhang, G. Q.; Dong, B. S. & Zeng, H. (2019), „Effect of hydrogen pressure on hydrogen absorption of waste Nd-Fe-B sintered magnets“, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (473), S. 144–147.

Lixandru 2018

Lixandru, A. (2018), *Recycling of Nd-Fe-B permanent magnets by hydrogen processes*. Dissertation, Material- und Geowissenschaften, Darmstadt.

Lott et al. 2010

Lott, T.; Meyer, C. & Bolz, M. P. (2010), *Befestigung von Einzelmagneten eines Maschinenteils einer elektrischen Maschine*. Robert Bosch GmbH, DE 102010030326 (A1).

Makarova et al. 2020

Makarova, I.; Soboleva, E.; Osipenko, M.; Kurilo, I.; Laatikainen, M. & Repo, E. (2020), „Electrochemical leaching of rare-earth elements from spent NdFeB magnets“, *Hydrometallurgy*, 192, S. 1–11.

Marschall et al. 2016

Marschall, P.; Mueller, D. D.; Minnermann, M.; Holdgruen, M.; Burger, S. A. & Hahlbeck, S. (2016), *Rotor einer elektrischen Maschine*. Daimler AG; EM-motive GmbH, DE 102016211711 (A1).

Martens & Goldmann 2016

Martens, H. & Goldmann, D. (2016), *Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis*, Springer Vieweg, Wiesbaden.

MatWeb

MatWeb, *Alliance N-45 Neodymium Iron Boron Magnetic Material*.  
[https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=e7eda0f5b11243a6a9ea46f21d667dc1](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=e7eda0f5b11243a6a9ea46f21d667dc1) [Zugriff am 07.04.2025].

Maxwell 2024

Maxwell (2024), *Herstellung von Neodym-Eisen-Bor (Nd-Fe-B) Magneten*.  
<https://www.magnet-maxwell.de/germany/parameter/NdFeBMagnets/production/>  
[Zugriff am 07.04.2025].

Michalski et al. 2022

Michalski, B.; Szymanski, M.; Gola, K.; Zygmuntowicz, J. & Leonowicz, M. (2022), „Experimental evidence for the suitability of the hydrogen decomposition process for the recycling of Nd-Fe-B sintered magnets“, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* (548), S. 1–8.

## Miotti 2025

Miotti (2025), *Magnete in Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)*. <https://www.miot-tisrl.com/de/product/magnete-neodym-eisen-bor-ndfeb/> [Zugriff am 07.04.2025].

## Miyazono et al. 2023

Miyazono, H.; Kato, H.; Asaoka, H.; Yokoyama, K. & Yamato, F. (2023), *Rotor core, rotor, and manufacturing method of rotor core*. Toyota Motor Co. Ltd., US 2024243624 (A1).

## Mizutani &amp; Takeuchi 2008

Mizutani, T. & Takeuchi, T. (2008), *Rotor, its manufacturing method, and electric vehicle*. Toyota Motor Co. Ltd., EP 2136454 (A1).

## Nerg et al. 2014

Nerg, J.; Rilla, M.; Ruuskanen, V.; Pyrhonen, J. & Ruotsalainen, S. (2014), „Direct-Driven Interior Magnet Permanent-Magnet Synchronous Motors for a Full Electric Sports Car“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (Vol. 61, No. 8), S. 4286–4294.

## Neß &amp; Raggl 2022

Neß, W. & Raggl, K. (2022), „E-Motortypen für sekundäre Elektroantriebe im Vergleich“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 83 (2), S. 40–45.

## Niese 2018

Niese, S. (2018), *Verfahren zur Befestigung mindestens eines Magneten an einem Blechpaket eines Rotors für einen Elektromotor, ein Rotor und ein Elektromotor mit dem Rotor*. Schaeffler Technologies AG, DE 102018129877 (A1).

## Parasiliti et al. 2012

Parasiliti, F.; Villani, M.; Lucidi, S. & Rinaldi, F. (2012), „Finite-Element-Based Multiobjective Design Optimization Procedure of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide Constant-Power Region Operation“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (Vol. 59, No. 6), S. 2503–2514.

## Peter 2018

Peter, M. (2018), *Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung*. Dissertation, Shaker Verlag, Düren.

## Pieper &amp; Bachmann 2021

Pieper, S. & Bachmann, T. (2021), *Rotorblechpaket für einen Rotor und Verfahren*

---

zum Fertigen eines Rotorblechpakets für einen Rotor. Volkswagen AG, DE 102021204598 (A1).

Pieper & Bachmann 2021

Pieper, S. & Bachmann, T. (2021), *Verfahren zur Anordnung und/oder Befestigung mindestens eines Magneten an einem Rotor einer Elektromaschine mittels eines Klebstoffs*. Volkswagen AG, DE 102021205053 (A1).

Podack 2006

Podack, M. (2006), *Permanentmagnetrotor mit Aufbiegungen zum Fixieren der Permanentmagnete des Rotorpaketes*. Siemens AG, DE 102006056873 (A1).

Poschmann et al. 2020

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 (Vol. 92, No. 4), S. 341–359.

Rapp 2015

Rapp, H. (2015), „Berechnung von strukturellen Klebeverbindungen“, *Lightweight Design*, 2015 (8), S. 6–23.

Redlich et al. 2021

Redlich, J.; Suchan, A. & Ponick, B. (2021), „Novel Design of Delta-Connected PM Synchronous Machines Considering Rotor Skewing“, *Energy Efficiency in Motor Systems* (Springer Proceedings), S. 1–13.

Reuter et al. 2019

Reuter, B., et al. (2019), *Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien. Herausforderungen und Lösungsansätze*. [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publicationen/Studien/Material-Studie\\_e-mobilBW.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publicationen/Studien/Material-Studie_e-mobilBW.pdf) [Zugriff am 07.05.2025].

Rom et al. 2024

Rom, C. L.; Smaha, R. W.; O'Donnell, S.; Dugu, S. & Bauers, S. R. (2024), „Emerging magnetic materials for electric vehicle drive motors“, *MRS Bulletin* (49), S. 738–750.

Sagawa et al. 1984

Sagawa, M.; Fujimura, S.; Yamamoto, H.; Matsuura, Y. & Hiraga, K. (1984),

„Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds“, *IEEE Transactions on Magnetics* (Vol. 20, No. 5), S. 1584–1589.

Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Schaeffler Technologies AG & Co. KG , *Gestaltung der Lagerung*. [https://medias.schaeffler.de/de/design-of-bearing-arrangements#:~:text=Zur%20Lagerung%20einer%20Welle%20sind,%2C%20Kreuzrollen-%20und%20Schwenklager\).](https://medias.schaeffler.de/de/design-of-bearing-arrangements#:~:text=Zur%20Lagerung%20einer%20Welle%20sind,%2C%20Kreuzrollen-%20und%20Schwenklager).) [Zugriff am 02.08.2024].

Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Schaeffler Technologies AG & Co. KG , *Mechanischer Ausbau von Wälzlagern*. [https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/catalogue\\_1/downloads\\_6/mh1\\_dismounting\\_mechanical\\_de\\_de.pdf](https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/mh1_dismounting_mechanical_de_de.pdf) [Zugriff am 07.05.2025].

Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2021

Schaeffler Technologies AG & Co. KG (2021), *Schaeffler Technical Pocket Guide – STT*, Schaeffler Technical Documentation. [https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/schaeffler\\_2/catalogue\\_1/downloads\\_6/stt\\_de\\_en.pdf](https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/catalogue_1/downloads_6/stt_de_en.pdf) [Zugriff am 07.05.2025].

Schauerte et al. 2021

Schauerte, B.; Gilch, I.; Neuwirth, T.; Sebold, S.; Leuning, N.; Schulz, M.; Volk, W. & Hameyer, K. (2021), „Alternative Magnetflussführung in Elektromotoren. Reproduzierbar eingebrachte Eigenspannungen zur gezielten Magnetflussführung in nicht-kornorientiertem Elektroblech“, *Forschung im Ingenieurwesen* (85), S. 827–836.

Schillingmann et al. 2021

Schillingmann, H.; Gehler, S. & Henke, M. (2021), „Life cycle assessment of electrical machine production considering resource requirements and sustainability“, *11th International Electrical Drive Production Conference (EDPC)*, 07.-09.12.2021, Online (IEEE), S. 1–7.

Schönfeld et al. 2024

Schönfeld, M.; Diehl, O. & Gassmann, J. (2024), *Recycling von NdFeB-Magneten in Deutschland*, Deutsche Rohstoffagentur. [https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffinformationen-60.pdf?\\_\\_blob=publication-File&v=2](https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/rohstoffinformationen-60.pdf?__blob=publication-File&v=2) [Zugriff am 07.05.2025].

## Schönfeldt et al. 2025

Schönfeldt, M.; Opelt, K.; Hasan, M.; Gröninger, M.; Jahnke, D.; Gassmann, J. & Gutfleisch, O. (2025), „Functional Recycling and Reuse of Nd–Fe–B Permanent Magnets from Various Waste Streams for a more Sustainable and Resilient Electromobility“, *Advanced Engineering Materials* (7), S. 1–11.

## Schulde et al. 2017

Schulde, A.; Herr, J.; Fehrenbach, J.; Flaig, M.; Mayer, C.; Poyraz, S. & Radjenovic, B. (2017), *Elektromotor, Innenrotor und Rotorblech*. EBM Papst St. Georgen GmbH & Co. KG, DE 102017103619 (A1).

## Schütz 2022

Schütz, R. (2022), *Fixierungsvorrichtung*. Voith Patent GmbH, DE 102022122141 (A1).

## Seelig 2024

Seelig, J. (2024), *Simulation automatisierter Demontagesysteme für rotierende elektrische Maschinen. Ein Beitrag zur Circular Economy in der Elektromobilität*. Dissertation, Clausthal.

## Seidel et al. 2008

Seidel, M.; Ploeger, A.; Hofmeister, A.; Bekavac, M.; Gremmel, D. & Minnermann, M. (2008), *Lamellenpaket eines Rotors einer elektrischen Maschine*. Robert Bosch GmbH, DE 102008043138 (A1).

## SM Magnetism 2024

SM Magnetism (2024), *Understanding Magnet Grades and Magnet Tables*. <https://smmagnetism.com/blogs/news/understanding-magnet-grades-and-magnet-tables> [Zugriff am 07.04.2025].

## Songke 2017

Songke (2017), *Products*. <http://www.songke.com/EN/product.aspx?cateid=122&jsid=4> [Zugriff am 07.04.2025].

## Souza et al. 2025

Souza, D. F. de; Fong, J.; Hernandez, C.; do Carmo, C. E. M.; Lourenço, J. L.; Sauer, I. L.; Tatizawa, H. & Almeida, A. T. de (2025), „Environmental impacts of electric motor technologies: Life cycle approach based on EuP Eco-Report“, *Environmental Impact Assessment Review* (111), S. 1–16.

#### Stanek et al. 2021

Stanek, R., et al. (2021), *Wertschöpfungspotenziale von E-Motoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg*. [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Cluster\\_ESW\\_Themenpapier-Wertschoepfungspotenziale-von-E-Motoren-fuer-den-Automobilbereich-in-Baden-Wuerttemberg.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Cluster_ESW_Themenpapier-Wertschoepfungspotenziale-von-E-Motoren-fuer-den-Automobilbereich-in-Baden-Wuerttemberg.pdf) [Zugriff am 07.05.2025].

#### Stanford Magnets 2025

Stanford Magnets (2025), *Neodymium Iron Boron Temperature Ratings*. <https://www.stanfordmagnets.com/ndfeb-magnets-temperature-ratings.html> [Zugriff am 07.04.2025].

#### Statista 2025

Statista (2025), *Durchschnittliche Preise ausgewählter Seltene Erden-Metalle aus China im Jahr 2024*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/180491/umfrage/seltene-erden-preise-oxide-2010/#:~:text=F%C3%BCr%20den%20Zeitraum%20von%20Dezember,69%20US%2DDollar%20pro%20Kilogramm.> [Zugriff am 07.04.2025].

#### Stopic et al. 2022

Stopic, S.; Polat, B.; Chung, H.; Emil-Kaya, E.; Smiljanić, S.; Gürmen, S. & Friedrich, B. (2022), „Recovery of Rare Earth Elements through Spent NdFeB Magnet Oxidation (First Part)“, *Metals* (12), S. 1–12.

#### Supermagnete

Supermagnete , *Welche Beschichtung gibe es bei Magneten?* <https://www.supermagnete.de/faq/Welche-Beschichtungen-gibt-es-bei-Magneten> [Zugriff am 07.05.2025].

#### Szczepanski 2021

Szczepanski, M. (2021), *Critical raw materials in EU external policies. Improving access and raising global standards*, European Parliament. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en) [Zugriff am 28.09.2022].

#### Tengye 2025

Tengye (2025), *Coating for Neodymium Magnets*. <https://tymagnets.com/coatings-for-neodymium-magnets-2/> [Zugriff am 07.05.2025].

#### Teprosa

Teprosa , *Die Backlack-Technologie*. <https://www.teprosa.de/die-backlack-technologie/> [Zugriff am 07.04.2025].

#### Thianhe Magnetics

Thianhe Magnetics , *Standard Specifications for the TH Magnetics Sintered NdFeB Magnet*. [http://www.thmagnet.com/english/cpzx\\_126/](http://www.thmagnet.com/english/cpzx_126/) [Zugriff am 07.04.2025].

#### Thyssenkrupp 2015

Thyssenkrupp (2015), *Neodym-Eisen-Bor-Magnete. Produktinformation*. [https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/\\_binary/UCPthyssenkruppBAMXSchulteMicrositeMagnettechnik/de/downloads/link-thyssenkruppMagnettechnik-Produktinfo-Neodym-Magnete.pdf](https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_binary/UCPthyssenkruppBAMXSchulteMicrositeMagnettechnik/de/downloads/link-thyssenkruppMagnettechnik-Produktinfo-Neodym-Magnete.pdf) [Zugriff am 07.04.2025].

#### Thyssenkrupp 2015

Thyssenkrupp (2015), *Neodym-Eisen-Bor-Magnete. Produktinformation*. [https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/\\_binary/UCPthyssenkruppBAMXSchulteMicrositeMagnettechnik/de/downloads/link-thyssenkruppMagnettechnik-Produktinfo-Neodym-Magnete.pdf](https://ucpcdn.thyssenkrupp.com/_binary/UCPthyssenkruppBAMXSchulteMicrositeMagnettechnik/de/downloads/link-thyssenkruppMagnettechnik-Produktinfo-Neodym-Magnete.pdf) [Zugriff am 07.04.2025].

#### Utsumi et al. 2012

Utsumi, A.; Nagao, Y. & Katou, H. (2012), *Rotor und Verfahren zur Herstellung des Rotors*. ASMO Co. Ltd., DE 102012012911 (A1).

#### Uysal et al. 2022

Uysal, E.; Al, S.; Emil-Kaya, E.; Stopic, S.; Gürmen, S. & Friedrich, B. (2022), „Hydrometallurgical recycling of waste NdFeB magnets: design of experiment, optimisation of low concentrations of sulphuric acid leaching and process analysis“, *Canadian Metallurgical Quarterly* (62), S. 107–118.

#### Voestalpine 2025

Voestalpine (2025), *Elektrobandpakete compacore®*. <https://www.voestalpine.com/automotivecomponents/E-Mobilitaet/Produkte-E-Mobilitaet/Elektrobandpakete-compacore-R> [Zugriff am 07.04.2025].

#### Vogel et al. 2020

Vogel, J.; Krüger, F. & Fabian, M. (2020), *Chemisches Recycling*.

*Umweltbundesamt*. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17\\_hgp\\_chemisches-recycling\\_online.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-07-17_hgp_chemisches-recycling_online.pdf) [Zugriff am 07.05.2025].

#### Waelzholz 2023

Waelzholz (2023), *Elektrobandwerkstoffe und Lacksysteme. Leistungsfähige Werkstoffe. Höchste Präzision*. <https://www.waelzholz.com/fileadmin/Website-DE/Documents/Broschueren/waelzholz-elektroband-2019-10-de.pdf> [Zugriff am 07.04.2025].

#### Walter, M. 2021

Walter, M. (2021), *Analyse, Modellierung und Quantifizierung bei Rotoren elektrischer Traktionsantriebe auftretender Unwuchtänderungen*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

#### Walton et al. 2015

Walton, A.; Yi, H.; Rowson, N. A.; Speight, J. D.; Mann, V.; Sheridan, R. S.; Bradshaw, A.; Harris, I. R. & Williams, A. J. (2015), „The use of hydrogen to separate and recycle neodymium–iron–boron-type magnets from electronic waste“, *Journal of Cleaner Production* (104), S. 236–241.

#### Wang et al. 2020

Wang, X.; Sun, X. & Gao, P. (2020), „Study on the effects of rotor-step skewing on the vibration and noise of a PMSM for electric vehicles“, *IET Electric Power Applications* (1), S. 131–138.

#### Wang et al. 2019

Wang, Y.; Ma, J.; Liu, C.; Lei, G.; Guo, Y. & Zhu, J. (2019), „Reduction of Magnet Eddy Current Loss in PMSM by Using Partial Magnet Segment Method“, *IEEE Transactions on Magnetics* (Vol. 55, No. 7), S. 1–5.

#### Wang 2011

Wang, X. Z. (2011), *Tool wear prediction modelling for sheet metal stamping die in automotive manufacture*. Dissertation, Hawthorn, Australia, Faculty of Engineering and Industrial Sciences.

#### Wetterau 2017

Wetterau, L. (2017), *Elektrische Maschine mit einem Lamellenpaket zur Fixierung*

eines Magneten sowie ein Lamellenpaket zur Verwendung bei einer solchen Maschine. Volkswagen AG, DE 102017218408 (A1).

Wilhelm & Mann 2020

Wilhelm, H. D. & Mann, T. (2020), *Magnetaufnahme, Rotor, Stator und Elektromotor*. Vitesco Technologies GmbH, DE 102020205513 (A1).

Wößner et al. 2021

Wößner, W.; Heim, M.; Walter, M. & Fleischer, J. (2021), „Challenges and Potential Solutions for Reduced Unbalance of Permanent Magnet Rotors for Electric Traction Motors“, *11th International Electrical Drive Production Conference (EDPC)*, 07.-09.12.2021, Online (IEEE), S. 1–9.

Wößner et al. 2019

Wößner, W.; Uhl, E.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Sensitivity Analysis and Validation of the Intelligent Assembly Process for Permanent Magnet Rotors with the Balancing Grade G 2.5“, *9th International Electric Drive Production Conference (EDPC)*, 03.-04.12.2019, Esslingen (IEEE), S. 1–6.

Wößner et al. 2022a

Wößner, W.; Gürbüz, H.; Heim, M.; Klein, N.; Schulz, J. & Fleischer, J. (2022), „Federnde Rotorkomponenten für elektrische Antriebe“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (117), S. 667–672.

Wößner et al. 2022

Wößner, W.; Nieschlag, J.; Ruhland, J. & Fleischer, J. (2022), *Verfahren zur Fixierung vergrabener Magnete in einem Rotor eines Elektromotors oder eines Generators*. Karlsruher Institut für Technologie, DE 102022130482 (A1).

Wößner 2025

Wößner, W. (2025), *Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe*. Dissertation, Shaker Verlag, Düren.

Xia et al. 2022

Xia, D.; Charpentier, N. M.; Maurice, A. A.; Brambilla, A.; Yan, Q. & Gabriel, J.-C. P. (2022), „Sustainable route for Nd recycling from waste electronic components featured with unique element-specific sorting enabling simplified hydrometallurgy“, *Chemical Engineering Journal* (441), S. 1–11.

## Xiaomi 2023

Xiaomi (2023), *Xiaomi Unveils Five Core Automotive Technologies and Debuts Xiaomi SU7, Completing the Human x Car x Home Smart Ecosystem*.

<https://www.mi.com/global/discover/article?id=3095> [Zugriff am 14.12.2025].

## Yamagishi &amp; Watanabe 2011

Yamagishi, Y. & Watanabe, Y. (2011), *Rotor for rotating electrical machine, rotating electric machine, and method for producing rotor for rotating electrical machine*. Toyota Motor Co. Ltd, EP 2722968 (A1).

## Yunsheng Deutschland 2022

Yunsheng Deutschland (2022), *Coating*. <https://www.yunsheng.de/coating/> [Zugriff am 07.04.2025].

## Zakotnik et al. 2016

Zakotnik, M.; Tudor, C. O.; Peiró, L. T.; Afiuny, P.; Skomski, R. & Hatch, G. P. (2016), „Analysis of energy usage in Nd–Fe–B magnet to magnet recycling“, *Environmental Technology & Innovation* (5), S. 117–126.

## Zakotnik et al. 2008

Zakotnik, M.; Harris, I. R. & Williams, A. J. (2008), „Possible methods of recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process“, *Journal of Alloys and Compounds* (450), S. 525–531.

## Zhou et al. 2019

Zhou, X.; Tian, Y. L.; Yu, H. Y.; Zhang, H.; Zhong, X. C. & Liu, Z. W. (2019), „Synthesis of hard magnetic NdFeB composite particles by recycling the waste using microwave assisted auto-combustion and reduction method“, *Waste Management* (87), S. 645–651.

## Publikationsliste des Verfassers

Hausmann et al. 2020

Hausmann, L.; Waldhof, M.; Fischer, J.; Wößner, W.; Oliveira Flammer, M.; Heim, M. & Fleischer, J. (2020), „Review and Enhancements of Rotor Designs for High Speed Synchronous Reluctance Machines”, *10th International Electrical Drive Production Conference (EDPC)*, 08.-09.12.2020, Online (IEEE), S. 1–8.

Wossner et al. 2021

Wossner, W.; Heim, M.; Walter, M. & Fleischer, J. (2021), „Challenges and Potential Solutions for Reduced Unbalance of Permanent Magnet Rotors for Electric Traction Motors“, *11th International Electrical Drive Production Conference (EDPC)*, 07.-09.12.2021, Online (IEEE), S. 1–9.

Gong et al. 2022

Gong, Y.; Heim, M.; Waldhof, M.; Wößner, W.; Fischer, J.; Parspour, N. & Fleischer, J. (2022), „Improvement of the Mechanical Strength of High Speed Synchronous Reluctance Machines by Fiber Reinforced Support Structures“, *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 05.-08.09.2022, Valencia, Spanien, (IEEE), S. 49–55.

Wößner et al. 2022

Wößner, W.; Gürbüz, H.; Heim, M.; Klein, N.; Schulz, J. & Fleischer, J. (2022), „Federnde Rotorkomponenten für elektrische Antriebe“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (117), S. 667–672.

Heim et al. 2023

Heim, M.; Wirth, F.; Boschert, L. & Fleischer, J. (2023), „An Approach for the Disassembly of Permanent Magnet Synchronous Rotors to Recover Rare Earth Materials“, *30th CIRP Life Cycle Engineering Conference (LCE)*, 15.-17.05.2023, New Brunswick, USA (Procedia CIRP Volume 116), S. 71–76.

Heim et al. 2023

Heim, M.; Wirth, F.; Boschert, L.; Acker, D.; Klein, N. & Fleischer, J. (2023), „Wave Spring-Based Magnet Fixations for Electric Traction Motors“, *13th International Electric Drive Production Conference (EDPC)*, 29.-30.11.2023, Regensburg (IEEE), S. 1–7.

## Heim et al. 2024

Heim, M.; Klein, N.; Claassen, T.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2024), „Experimental Parameter Analysis for the Disassembly of Magnets from Electric Traction Motors“, *14th International Electric Drive Production Conference (EDPC)*, 26.-27.11.2024, Regensburg (IEEE), S. 1–7.

## Klein et al. 2025

Klein, N.; Franken, L.; Heim, M.; Kößler, F.; Dönges, B.; Fleischer, J. (2025), „Assessment of Product Carbon Footprint Reduction Potential Using Lightweight Rotor Components for Electric Traction Motors“, *20st Global Conference on Sustainable Manufacturing (GCSM)*, 09.-11.10.2024, Ho Chi Minh City, Vietnam, S. 91-98.

## Heim et al. 2025

Heim, M.; Klein, N.; Lalla, F.; Kößler, F. & Fleischer, J. (2024), „Flexible and Robust Magnet Disassembly Cell for Electric Traction Motors“, *8th International Conference on Sustainable Manufacturing (ICSM)*, 30.10.-01.11.2024, Shanghai, China, S. 61-74.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Aufbau eines PSM Rotors und dessen Komponenten nach (Heim et al. 2025, S. 2).	5
Abbildung 2-2: Arten der Magnetsegmentierung.	7
Abbildung 2-3: Unterschiedliche Ausführungen von Flussbarrieren.	12
Abbildung 2-4: Einteilung von Magnetfixierungen.	13
Abbildung 2-5: Verschiedene Ausführungen von mechanischen Magnetfixierungen mit Zusatzkomponente nach eigener Darstellung; a): (Dönges und Schulte, S. 13), b): (Jugovic und El 2016, S. 16–17), c): (Asuman et al., 2020), d): (Kritharidou et al. 2010, 9,12), e): (Gilde und Blaes 2020), f): (Pieper und Bachmann 2021a, S. 8).	14
Abbildung 2-6: Magnetfixierungen in werkzeugfreier Integralbauform nach eigener Darstellung; a): (Wilhelm und Mann 2020, S. 1), b): (Schulde et al. 2017, S. 20), c): (Seidel et al. 2008, S. 1), d): (Lott et al. 2010), e): (Miyazono et al. 2023, S. 5), f): (Fröhlich 2016, S. 11).	16
Abbildung 2-7: Magnetfixierungen in werkzeuggestützter Integralbauform nach eigener Darstellung; a): (Koenig 2011, S. 7), b): (Do et al. 2023, S. 2), c): (Utsumi et al. 2012, S. 32), d): (Marschall et al. 2016, S. 7), e): (Gilde 2020, S. 1).	18
Abbildung 2-8: Einteilung von Magnetfixierungen mittels Kleben.	20
Abbildung 2-9: Arten von Klebstoffapplikationen für die Magnetfixierung.	20
Abbildung 2-10: Herstellungsverfahren von Magnetfixierungen mit Vollfüllung.	21
Abbildung 2-11: Ansätze zur Demontage von Elektromotoren, nach a) (Klier et al. 2013a, S. 3; Bast et al. 2014, S. 42), b) (Auerbach et al. 2017, S. 23), c) (Baazouzi et al. 2023, S. 139), d) (Ihne et al. 2024b, S. 6).	25
Abbildung 2-12: Ansätze zur Magnetaufbereitung in Anlehnung an (Cherkezova-Zheleva et al. 2024, S. 661).	28
Abbildung 2-13: Übersicht des ermittelten Forschungsdefizits.	34
Abbildung 3-1: Vorgehensweise.	37
Abbildung 4-1: Prozesskette zur Rotordemontage (Heim et al. 2023b, S. 73).	40
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Entmagnetisierungsprozesses.	41

---

Abbildung 4-3: Demontage der axialen Verbindung.	43
Abbildung 4-4: Demontage Rotorwelle.	44
Abbildung 4-5: Prozess zum Spalten von Rotorblechpaketen.	45
Abbildung 4-6: Trennen und Rückgewinnen aus geklebten Verbindungen nach DIN 54405.	46
Abbildung 5-1: Produktparameter zur Demontage von stoffschlüssigen Magnetfixierungen (Audi AG 2024; Heim et al. 2024, S. 2).	50
Abbildung 5-2: Produktparameter zur Demontage von Magnetfixierungen mit Federnase.	51
Abbildung 5-3: Produktparameter zur Demontage von Magnetfixierungen mit Federblech nach (Heim et al. 2023a).	53
Abbildung 5-4: Prozessparameter zur Demontage von Magneten.	53
Abbildung 6-1: Verlauf von Normalkräften und Schubspannungen in einer zweischichtigen Laschenklebung unter elastischer Deformation ((A_Walter 2023, S. 6) nach (Rapp 2015, S. 17)).	56
Abbildung 6-2: Darstellung der Simulationsgeometrien und Randbedingungen im 3D- (links) und im 2D-Modell (rechts) (A_Walter 2023, S. 46).	59
Abbildung 6-3: Links: Vergleich der Kraft-Weg-Kurven des 3D- und auf 3D-skalierten Modells. Rechts: Gegenüberstellung der verbleibenden Kohäsivelemente des Simulationsmodells und der real verbliebenen Transfermolding-Masse an einem Magneten (A_Walter 2023, S. 47).	60
Abbildung 6-4: Haupteffektediagramm maximale Demontagekraft bei stoffschlüssigen Magnetfixierungen (nach (A_Walter 2023, S. 60)).	62
Abbildung 6-5: Einfluss der Magnethöhe auf die maximale Demontagekraft (A_Walter 2023, S. 61).	63
Abbildung 6-6: Einfluss der Blechpaketbreite auf die maximale Demontagekraft (links), Verschiebung des Blechpaket in Abhängigkeit der Verschiebung des Magneten (rechts) (A_Walter 2023, S. 65).	64

---

Abbildung 6-7: Einfluss der kritischen Rissöffnung auf die Demontagekraft (links oben) und Schubspannungsverteilung innerhalb der Klebeverbindung (unten) (A_Walter 2023, S. 66–67).	66
Abbildung 6-8: Schadensmechanismen bei der Demontage von stoffschlüssig fixierten Magneten.	68
Abbildung 6-9: Analytisches Ersatzsystem eines Magneten unter Biegebeanspruchung.	71
Abbildung 6-10: Analytische Abschätzung der Fixierwirkung von Federnasen Magnetfixierungen mittels Biegebalken.	76
Abbildung 6-11: Qualitativer Einfluss der Geometrieparameter für die Magnetfixierung mittels Federnase.	78
Abbildung 6-12: Schematische Darstellung der Simulation der Federnase.	79
Abbildung 6-13: Kraft-Weg-Verlauf der Simulation einer beispielhaften Federnase.	81
Abbildung 6-14: Ergebnisse der Simulation zu Parameterstudien der Federnasen.	83
Abbildung 6-15: Finite-Elemente-Simulation des Federblechs; schematisch (links), Modell (rechts) (Heim et al. 2023a, S. 3).	85
Abbildung 6-16: Vergleich Simulation und Experiment; Versuchsaufbau (links), Kraft-Weg-Verlauf (rechts) (Heim et al. 2023a, S. 4).	87
Abbildung 6-17: Haupteffektdiagramm für die maximale Haltekraft des Federblechs (eigene Darstellung (Heim et al. 2023a, S. 5)).	89
Abbildung 6-18: Haupteffektdiagramm für die von-Mises-Vergleichsspannung des Federblechs (eigene Darstellung (Heim et al. 2023a, S. 5)).	89
Abbildung 6-19: Haupteffektdiagramm des Federblechs für die Haltekraft bei 0,1 mm Toleranz (eigene Darstellung (Heim et al. 2023a, S. 5)).	90
Abbildung 7-1: CAD-Modell und Bild der Demontagezelle (Heim et al. 2025, S. 5).	96
Abbildung 7-2: Positioniersystem (links) und Kameraperspektive des Kamerasystems (rechts) nach (Heim et al. 2025, S. 7).	97

---

Abbildung 7-3: Vorrichtung zum Verkleben von Magneten.	99
Abbildung 7-4: Montageprozess der federnden Magnetfixierung (A_Cassiani 2024, S. 26).	100
Abbildung 7-5: Blechpaketdesign für die Screening Versuchsreihe (links) (Heim et al. 2024, S. 3), mechanische Alterung im Schleuderprüfstand (rechts).	103
Abbildung 7-6: Kraft-Weg-Verlauf der Magnetdemontage bei unterschiedlichen Parametern (Heim et al. 2024, S. 4).	104
Abbildung 7-7: Demontageaufbau (links), Blechpaket nach der Demontage (rechts).	105
Abbildung 7-8: Haupteffektdiagramm für die maximale Demontagekraft beim Screening Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 5)).	106
Abbildung 7-9: Haupteffektdiagramm für die Magnetbeschädigung beim Screening Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 5)).	107
Abbildung 7-10: Haupteffektdiagramm für Kleberückstände beim Screening Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 5)).	109
Abbildung 7-11: Haupteffektdiagramm für die durchschnittliche Demontagekraft beim Screening Versuchsplan (eigene Darstellung (Heim et al. 2024, S. 6)).	110
Abbildung 7-12: Magnetzustand nach der Demontage (Heim et al. 2024, S. 6).	111
Abbildung 7-13: Definition von weiteren Versuchsreihen zur stoffschlüssigen Magnetfixierung.	112
Abbildung 7-14: Haupteffektdiagramme für die maximale Demontagekraft und Magnetbeschädigung bei unterschiedlichen Klebstoffen (eigene Darstellung (A_Claassen 2024, S. 72, 74)).	115
Abbildung 7-15: Haupteffektdiagramm für die maximale Demontagekraft bei unterschiedlichen Magnetgeometrien (eigene Darstellung (A_Claassen 2024, S. 72)).	116
Abbildung 7-16: Haupteffektdiagramm für die Magnetbeschädigung bei unterschiedlichen Magnetgeometrien (links), Schadensbilder (rechts) (eigene Darstellung (A_Claassen 2024, S. 74)).	117
Abbildung 7-17: Unterschiedliche Magnetausführungen.	118

---

Abbildung 7-18: Magnetzustand nach der Demontage bei mehreren Magneten pro Tasche.	119
Abbildung 7-19: Magnetzustand nach der Demontage segmentierter Magnete.	121
Abbildung 7-20: Stempelgeometrie (links), Magnetzustand nach der Demontage (rechts).	122
Abbildung 7-21: Haupteffektdiagramme für die maximale Demontagekraft bei unterschiedlichem Alterungszustand und unterschiedlichen Magnetbeschichtung (eigene Darstellung (A_Claassen 2024, S. 63)).	123
Abbildung 7-22: Eingesetzte Kraft-Weg-Profile für die Demontage.	125
Abbildung 7-23: Maximale Demontagekraft für Geschwindigkeits- und Kraftprofile (eigene Darstellung (A_Dengel 2024, S. 54)).	125
Abbildung 7-24: Versuchsaufbau zum Erzeugen eines Winkelfehlers (links), Magnetzustand nach der Demontage mit Winkelfehler (rechts) (eigene Darstellung (A_Dengel 2024, S. 53)).	127
Abbildung 7-25: Blechschnittgeometrie für die Magnetfixierung mit Federnase.	130
Abbildung 7-26: Kraft-Weg-Verlauf für die Montage und Demontage von Magneten mit Federnasenfixierung.	131
Abbildung 7-27: Vergleich von Montage und Demontagekräften sowie Magnetzustand nach der Demontage bei Magnetfixierung Federnase.	132
Abbildung 7-28: Federnasen vor der Montage und nach der Demontage.	133
Abbildung 7-29: Vergleich von Versuch und Simulation der Magnetfixierung mittels Federnasen.	134
Abbildung 7-30: Einstellbare Versuchsvorrichtung für die Demontage von mit Federblech fixierten Magneten (eigene Darstellung (A_Weimann 2023, S. 35)).	136
Abbildung 7-31: Kraft-Weg-Verlauf bei der Demontage von Magneten mit Federblechfixierung und unterschiedlichen Magnethöhen (eigene Darstellung (A_Weimann 2023, S. 60)).	137
Abbildung 7-32: Maximale Demontagekraft für unterschiedliche Taschenbreiten mit Federblechfixierung (eigene Darstellung (A_Weimann 2023, S. 70)).	138

Abbildung 7-33: Kraft-Weg-Verlauf der Demontage von Magneten mit Federblechfixierung.	139
Abbildung 8-1: Kraft-Weg-Verlauf der Demontage von Magneten.	146
Abbildung 8-2: Magnetzustand nach der Demontage.	146
Abbildung 8-3: Schadensbild der zerstörten Magnete.	147
Abbildung 9-1: Empfehlungen zur Gestaltung von PSM Rotoren.	148
Abbildung 9-2: Gestaltungsempfehlungen für stoffschlüssige Magnetfixierungen.	149
Abbildung 9-3: Gestaltungsempfehlungen für den Magnetdemontageprozess.	151
Abbildung 9-4: Vorgehensweise zur Prozessparametrierung bei der Magnetdemontage.	152

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Legierungszusammensetzung von NdFeB-Magneten (Maxwell 2024) .	9
Tabelle 2-2: Mechanische Eigenschaften von NdFeB-Magneten (Thyssenkrupp 2015b; Eclipse Magnetics; MatWeb; Miotti 2025).	9
Tabelle 5-1: Allgemeine Produktparameter der Magnetdemontage.	49
Tabelle 6-1: Werkstoffparameter für die Simulation der Magnetdemontage.	57
Tabelle 6-2: Werkstoffparameter von Blechpaket und Magnet für die Simulation der Magnetdemontage.	58
Tabelle 6-3: Faktorstufen für die simulative Screening Versuchsreihe.	61
Tabelle 6-4: Parameter für einen beispielhaften Magnetdemontageprozess.	70
Tabelle 6-5: Werkstoffparameter für Elektroblech (Bode 2019, S. 56–57).	80
Tabelle 6-6: Parameterkombinationen für die Simulationen mit Federnase.	82
Tabelle 6-7: Parameter des Federblechs für die Validierung (Heim et al. 2023a, S. 4).	87
Tabelle 6-8: Faktoren und Faktorstufen für die Federblech Parameterstudie (Heim et al. 2023a, S. 4).	88
Tabelle 6-9: Parameter des Stempels für einen beispielhaften Magnetdemontageprozess.	91
Tabelle 7-1: Anforderungsliste an die Magnetdemontage.	95
Tabelle 7-2: Einflussparameter stoffschlüssiger Magnetfixierungen (Heim et al. 2024, S. 2).	101
Tabelle 7-3: Faktorstufen und konstante Parameter des Screening Versuchsplans (Heim et al. 2024, S. 3).	102
Tabelle 7-4: Eigenschaften der verwendeten Klebstoffe (Elantas 2009, 2013; Delo 2023, 2024)	114
Tabelle 7-5: Verwendete Magnete für die Versuchsdurchführung.	116
Tabelle 7-6: Parameter der Federnasen Versuchsträger.	130

Tabelle 7-7: Faktoren und Faktorstufen für die Versuchsreihe Federnase.	136
Tabelle 8-1: Geometrie- und Werkstoffparameter zum Abgleich von Versuch und Simulation (Delo 2024; Baloglu 2021, S. 109).	141
Tabelle 8-2: Parameter der Magnete für die Validierung.	144
Tabelle 8-3: Biegespannungen der Magnete bei unterschiedlichen Stempelgeometrien.	144
Tabelle 8-4: Schlankheitsgrade der Stempel für die Magnetdemontage.	145

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

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

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

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

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

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

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

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

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

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

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

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

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

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

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

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

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

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

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

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkanteilen**

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 fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

**Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem**

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme:  
Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung  
im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch  
Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung  
in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der  
Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische  
Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge  
zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer  
Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

**Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus**

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungselementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindelantriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl. Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

**Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation**

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

**Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten**

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspanprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmer

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossman

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91

Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92

Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung 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 Schmäzle

**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  
Abrasive Strahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

**Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen**

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

**Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses**

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des  
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen  
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

**Turbulenzreaktionsprozesse**

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

**Fabrikplanung im turbulenten Umfeld**

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in  
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-  
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung  
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und  
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen  
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere  
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile  
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung  
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels  
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V**

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ MIM-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 adaptiven Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauß

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourcen-effizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**

ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit der  
Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight  
production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**

Band 230

Dr.-Ing. Tom Stähr

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung**

Band 231

Dr.-Ing. Jan Schwennen

**Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile**

Band 232

Dr.-Ing. Sven Coutandin

**Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem**

Band 233

Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz**  
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234

Dr.-Ing. Stefan Treber

**Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**  
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235

Dr.-Ing. Marius Dackweiler

**Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Band 236

Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

**Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion**

Band 237

Dr.-Ing. Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen**

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion**

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

**Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission**

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung**

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning**

Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation**

Prozesseinflüsse und Prozessauslegung

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

**Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen**

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

**Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen**

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

**Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements**

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

**Hochiterative Technologieplanung**

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren**

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung**

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

**Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China**

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

**Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion**

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms**

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

**Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie**

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen**

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

**Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln**

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

**Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound**

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

**Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik**

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

**Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures**

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

**(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken**

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

**Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung**

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion**

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

**Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien**

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

**Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5**

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

**Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetribspindeln**

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 Planetenwälgwindetrieben**

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 Gönninger

**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

Band 298

Dr.-Ing. Eduard Gerlitz

**Flexibles Trennen von Zellkontaktierungen in Lithium-Ionen-Batteriemodulen**

Ein Beitrag zur automatisierten und flexiblen Demontage von Traktionsbatterien

Band 299

Dr.-Ing. Edgar Mühlbeier

**Mechatronisches Koppelsystem für die prozessunabhängige, kraftgeregelte Kopplung von seriellen Roboterkinematiken**

Band 300

Dr.-Ing. Martin Benfer

**Decision-Making in Production Network Configuration**

A Design Framework for Digital Twins of Global Production Networks

Band 301

Dr.-Ing. Victor Lubkowitz

**Keramikverstärkte Aluminiumwerkstoffe für das pulverbettbasierte selektive Laserschmelzen**

Beschichtung, Werkstoff- und Oberflächeneigenschaften von Mikro-B<sub>4</sub>C- und Nano-TiC-verstärkten AlSi10Mg-Feedstocks, verarbeitet im PBF-LB-Prozess

Band 302

Dr.-Ing. Alex Frey

**Datenbasierte Erstellung und Überprüfung von Modellen zur Produkt- und Prozesskonfiguration**

Band 303

Dr.-Ing. Johannes Schubert

**Werkstoff- und Prozessanalyse zur Herstellung keramischer Werkstoffverbunde mittels badbasierter Photopolymerisation (VPP-LED)**

Band 304

Dr.-Ing. Tassilo Arndt

**Simulative und experimentelle Untersuchung des Rotationsunrunddrehens zur hochproduktiven Herstellung unrunder Bauteilquerschnitte**

Band 305

Dr.-Ing. Kamal Hussein

**Modellierung maschinenseitiger Einflüsse auf den Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozess von Batteriezellen**

Band 306

Dr.-Ing. Marco Friedmann

**Automatisierte Konfiguration von Greiferfingern aus einem modularen Baukasten**

Band 307

Dr.-Ing. Jannik Konstantin Schwalm

**Hämmerndes Drehen**

Entwicklung eines hybriden Prozesses zur hauptzeitparallelen mechanischen Oberflächenbehandlung und Oberflächentexturierung während der Zerspanung

Band 308

Dr.-Ing. Dominik Mayer

**Analyse prozessübergreifender Wirkzusammenhänge zur Modellierung der Stapelbildung in der Batteriezellfertigung**

Ein Beitrag zur Bewertung geometrischer Effekte in Elektroden auf die Stapelgenauigkeit

Band 309

Dr.-Ing. Markus Heim

**Demontage von Magneten aus permanentmagneterregten Synchronmaschinen**

Ressourceneffizienz durch Werterhaltung





