

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

Wilken Wößner

**Identifikation und Reduktion der Ursachen von
Unwuchtänderungen an
Permanentmagnetrotoren elektrischer
Traktionsantriebe**

Band 295

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

Wilken Wößner

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 295

Identifikation und Reduktion der Ursachen von Unwuchtänderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

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

Wilken Wößner, M.Sc.
aus Erlangen

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2024
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour

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., 2024

Copyright Shaker Verlag 2025

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

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8440-9985-0
PDF-ISBN 978-3-8191-0063-5
ISSN 2944-6430
eISSN 2944-6449
<https://doi.org/10.2370/9783819100635>

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

Vorwort des Herausgebers

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

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferent. Das über die Jahre stets entgegengebrachte Vertrauen sowie die konstruktiven Diskussionen haben es mir ermöglicht, nicht nur fachlich, sondern auch persönlich zu wachsen. Ebenso möchte mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats bedanken sowie bei Frau Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler für den Prüfungsvorsitz.

Für die besonders kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des wbk Institut für Produktionstechnik, insbesondere aus dem Bereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung. Diese Zusammenarbeit wäre ohne die Unterstützung der Sekretariate und Service-Center des wbk nicht möglich gewesen. Bei Michael Heinz und Ralf Dorsner möchte ich mich ganz besonders für zahlreiche konstruktive Gespräche zur Fertigung von Prüfstandskomponenten bedanken. Mein Dank gilt ebenso den Studierenden, die durch die geteilte Begeisterung für Schleuderversuche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Die tatkräftige Unterstützung von Fabian Lalla, Marco Walter, Adrian Kohlund und Tobias Schoen möchte ich hierbei hervorheben. Meinen ehemaligen Kollegen Manuel Peter, Jens Schäfer, Markus Heim und Nicolaus Klein möchte ich zudem für wertvolles Feedback zur Arbeit danken.

Mein Dank gilt ebenso meinen Eltern und meinem Bruder, die mich bereits während des Studiums jederzeit unterstützt und in meinen Zielen bestärkt haben.

Köln, im Dezember 2024

Wilken Wößner

Zusammenfassung

Die Elektrifizierung von Mobilitätslösungen ist einerseits ein wichtiger Schritt zur Reduzierung von CO₂-Emissionen, stellt andererseits aber besonders hohe Anforderungen an die Leistungsdichte elektrischer Traktionsantriebe. Hohe Leistungsdichten werden in der Regel durch den Einsatz von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit hohen maximalen Drehzahlen erreicht. Diese können bis zu 21.000 min⁻¹ betragen. Damit einhergehende mechanische, thermische und magnetische Belastungen stellen den Rotor und seine Produktion vor neue Herausforderungen: Die Rotorunwucht wird zwar zum Ende der Rotormontage in einem Auswuchtprozess reduziert, kann aber während des Betriebs in unzulässigem Maße steigen. Ursachen im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen wurden im Stand der Forschung und Technik bisher nicht systematisch untersucht. Rotoren, bei denen Unwuchtänderungen zu erwarten sind, müssen daher während der Produktion einem kosten- und zeitintensiven Schleuderprozess unterzogen werden.

Zur Identifikation der Ursachen von Unwuchtänderungen werden daher zunächst Verformungen und Relativbewegungen von Rotorkomponenten mit dem voraussichtlich stärksten Einfluss auf Unwuchtänderungen analysiert. Es folgt eine experimentelle Validierung anhand von Schleuderversuchen an einer Referenzgeometrie sowie an zwei industriellen Rotorgeometrien. Insbesondere Planlauf-, Zylindrizitäts- und Koaxialitätsfehler sowie Unwuchten der Blechpakete weisen eine hohe Relevanz für vorübergehende und dauerhafte Verformungen der Blechpakete auf.

Daraufhin werden Lösungsansätze für die Reduzierung von Unwuchtänderungen abgeleitet. Diese umfassen einerseits eine Methodik, anhand derer andere Rotorgeometrien als die hier verwendeten hinsichtlich ihrer Ursachen von Unwuchtänderungen untersucht werden können. Darüber hinaus werden Ansätze für einen adaptiven Schleuderprozess, eine planlaufminimale Rotormontage sowie konstruktive Anpassungen erarbeitet. Abschließend wird ein neuartiges Herstellungsverfahren validiert, welches konstruktive Lösungsansätze umsetzt. Gewonnene Erkenntnisse sollen es ermöglichen, in der industriellen Rotorproduktion auf einen Schleuderprozess zu verzichten.

Abstract

While the electrification of mobility solutions is an important step towards reducing CO₂ emissions, it also places particularly high demands on the power density of electric traction drives. High power densities are generally achieved by using permanent magnet synchronous machines with high maximum speeds. These can be up to 21,000 rpm. The resulting mechanical, thermal and magnetic loads pose new challenges for the rotor and its production: The rotor unbalance is reduced at the end of rotor assembly in a balancing process but can increase again during operation. Causes of unbalance changes occurring during operation have not yet been systematically investigated in the state of research and technology. Rotors where unbalance changes are to be expected must therefore be subjected to a costly and time-consuming centrifuging process during production.

In order to identify the causes of unbalance changes, deformations and relative movements of rotor components that are likely to have the strongest influence on unbalance changes are analyzed first. This is followed by an experimental validation using spin tests on a reference geometry and on two industrial rotor geometries. In particular, axial run-out, cylindricity and coaxiality errors as well as unbalances of the laminations are highly relevant for temporary and permanent deformations of the laminations.

Measures for the reduction of unbalance changes are then derived. On the one hand, these include a methodology that can be used to investigate the causes of unbalance changes in rotor geometries other than those utilized in this work. In addition, approaches for an adaptive centrifuging process, a rotor assembly with minimum axial run-out and design adjustments are developed. Finally, a novel manufacturing process is validated, which implements design recommendations. The knowledge gained is intended to make it possible to avoid a centrifuging process in industrial rotor production.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzungen	1
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM)	4
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines Permanentmagnetrotors	4
2.1.2 Technologische Anforderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe	6
2.2 Unwucht	8
2.2.1 Arten von Unwuchten	9
2.2.2 Zulässige Unwucht	14
2.2.3 Auswuchtprozess	16
2.2.4 Zulässige Unwuchtänderung	19
3 Stand der Forschung und Technik	22
3.1 Auslegung und Konstruktion von Permanentmagnetrotoren	22
3.2 Unwuchtbeiträge in der Produktion von Permanentmagnetrotoren	26
3.2.1 Wellenfertigung	26
3.2.2 Blechpaketherstellung	27
3.2.3 Magnetherstellung	29
3.2.4 Magnetmontage und -fixierung	30
3.2.5 Welle-Nabe-Verbindung	32
3.2.6 Auswuchten	33
3.2.7 Magnetisieren	34
3.3 Unwuchtänderungen im Betrieb von Permanentmagnetrotoren	35
3.3.1 Belastung des Rotorblechpakets	35
3.3.2 Mögliche Verformungen und Relativbewegungen	37

3.3.3	Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen	45
3.4	Forschungsbedarf	49
4	Zielsetzungen und Vorgehensweise	51
4.1	Verständnis im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen	51
4.2	Reduzierung im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen	52
4.3	Vorgehensweise	53
4.3.1	Priorisierung erwarteter Unwuchtänderungen (Forschungsfrage 1)	53
4.3.2	Validierung auftretender Unwuchtänderungen (Forschungsfrage 2)	54
4.3.3	Maßnahmen zur Reduzierung im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen (Forschungsfrage 3)	55
5	Priorisierung erwarteter Unwuchtänderungen	56
5.1	Definition produkt- und prozesseitiger Randbedingungen	56
5.2	Identifikation zu erwartender Verformungen und Relativbewegungen	59
5.2.1	Analyse erwarteter Fertigungsabweichungen	60
5.2.2	Analyse erwarteter Montageabweichungen	62
5.2.3	Ableitung erwarteter Verformungen und Relativbewegungen	64
5.3	Quantifizierung erwarteter Verformungen und Relativbewegungen	65
5.3.1	Rotorwelle	65
5.3.2	Blechkpaket	66
5.3.3	Magnete	68
5.3.4	Magnetfixierung	69
5.3.5	Wuchtscheibe	69
5.3.6	Zugstab	70
5.4	Bewertung zu erwartender Unwuchtänderungen	70
5.4.1	Modellierung möglicher Unwuchtänderungen	71
5.4.2	Numerische Versuchsplanung	72
5.4.3	Ergebnisse des numerischen Versuchsplans	74
5.5	Zusammenfassung	76
6	Validierung auftretender Unwuchtänderungen	77

6.1	Auslegung einer Referenzgeometrie	77
6.2	Zielsetzungen, Messgrößen und Belastungsparameter der experimentellen Validierung	82
6.3	Aufbau eines Schleuderprüfstands	83
6.3.1	Anforderungen und Funktionsstruktur	84
6.3.2	Konstruktive Umsetzung	85
6.3.3	Steuerungstechnische Umsetzung	88
6.3.4	Aufbau und Inbetriebnahme	89
6.3.5	Bewertung von Messunsicherheiten	90
6.4	Bewertung von Fertigungsabweichungen	93
6.4.1	Wellen	93
6.4.2	Blechkpakete	94
6.4.3	Magnete	101
6.5	Bewertung von Montageabweichungen	101
6.5.1	Magnetmontage	102
6.5.2	Schrumpfprozess des Blechkpakets auf die Welle	103
6.6	Bewertung von Verformungen und Relativbewegungen	108
6.6.1	Blechkpaket ohne Magnettaschen	109
6.6.2	Zwei Blechkpakete ohne Magnettaschen	115
6.6.3	Blechkpaket mit Magneten	117
6.6.4	Einfluss einer Temperaturbelastung	121
6.7	Schleuderversuche an industriell hergestellten Blechkpaketen	123
6.7.1	Blechkpaket mit Single-Stack-Molding	124
6.7.2	Blechkpaket mit federnder Magnetfixierung	126
6.8	Zusammenfassung	128
7	Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen	133
7.1	Handlungsfelder entlang der Auslegung und Produktion von PM-Rotoren	133
7.2	Methodik zur Identifikation der Ursachen von Unwuchtänderungen	135
7.3	Adaptiver Schleuderprozess	136
7.4	Planlaufminimale Montage	141

7.5	Konstruktive Anpassungen	144
7.6	Proof-of-Concept eines neuartigen Leichtbaurotors	147
7.7	Zusammenfassung	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
8.1	Zusammenfassung	151
8.2	Ausblick	152
9	Literaturverzeichnis	153
	Publikationsliste	I
	Abbildungsverzeichnis	IV
	Tabellenverzeichnis	XIV
	Anhang	XVI

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Größe	Einheit
$[\vec{c}, -\vec{c}]$	Unwuchtpaar der Momentenunwucht	gmm
d	Innendurchmesser eines Hohlzylinders	mm
D	Außendurchmesser eines Hohlzylinders	mm
\vec{e}	Exzentrizität des Schwerpunkts bzw. der Trägheitsachse	μm
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
e_{zul}	Zulässige Exzentrizität	μm
F_{ax}	Betrag der Axialkraft	N
\vec{F}_z	Zentrifugalkraft	N
G	Wuchtgüte	mm/s
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
J_x, J_z	Trägheitsmomente eines Rotors bezüglich seiner x- und z-Achse	gmm^2
\vec{l}	Axialer Abstand zweier Unwuchtmassen	mm
L	Lagerabstand	mm
$[L_A, L_B]$	Axiale Abstände der Lagerebenen zum Schwerpunkt	mm
l_{ax}	Axiale Länge eines Hohlzylinders	mm
l_b	Länge eines Biegebalkens	mm
m	Masse eines Körpers	kg
M	Drehmoment	Nm
n	Drehzahl	min^{-1}
n_{ausw}	Auswuchtdrehzahl	min^{-1}
n_{bel}	Belastungsdrehzahl	min^{-1}
n_{max}	Maximale Betriebsdrehzahl	min^{-1}
n_{ref}	Referenzdrehzahl	min^{-1}
\vec{p}	Momentenunwucht	gmm^2

Formelzeichen	Größe	Einheit
P_{mech}	Mechanische Leistung	kW
P_{Δ}	Änderung des Betrags der Momentenunwucht	gmm ²
q	Streckenlast an einem Biegebalken	N/mm
\vec{r}	Radiale Position einer Unwuchtmasse	mm
R	Pearson-Korrelationskoeffizient	-
S, S'	Schwerpunkt bzw. exzentrischer Schwerpunkt	-
u	Unwuchtmasse	g
U	Erweiterte Messunsicherheit	Einheit der Messgröße
\vec{U}	Unwucht	gmm
\vec{U}_A, \vec{U}_B	Unwucht in Lagerebene A bzw. B	gmm
$U_{A,k}, U_{B,k}$	Unwuchtbeitrag, der beim Auswuchten durch Materialabtrag, -auftrag oder -verlagerung erzeugt wird	gmm
$\vec{U}_{A,P}, \vec{U}_{B,P}$	In Lagerebene A bzw. B wirkender Anteil der Momentenunwucht	gmm
$\vec{U}_{A,S}, \vec{U}_{B,S}$	In Lagerebene A bzw. B wirkender Anteil der statischen Unwucht	gmm
$\vec{U}_{A,0}, \vec{U}_{B,0}$	Unwuchtzustand eines Rotors zu Beginn seiner Lebensdauer	gmm
$\vec{U}_{A,1}, \vec{U}_{B,1}$	Unwuchtzustand eines Rotors zum Ende seiner Lebensdauer	gmm
\vec{U}_S	Statische Unwucht	gmm
U_{zul}	Zulässige Restunwucht	gmm
$U_{\text{zul,A}}, U_{\text{zul,B}}$	In A bzw. B zulässige Unwucht	gmm
$U_{\Delta\text{zul,min}}, U_{\Delta\text{zul,max}}$	Minimal und maximal zulässige Unwuchtänderung	gmm
$\vec{U}_{\Delta A}, \vec{U}_{\Delta B}$	Innerhalb der Lebensdauer eines Rotors aufgetretene Unwuchtänderung	gmm
$\vec{U}_{\Delta S}$	Änderung der statischen Unwucht	gmm
w	Durchbiegung eines Biegebalkens	mm

Formelzeichen	Größe	Einheit
δ_p	Leistungsdichte	kW/kg
Δ_{bel}	Änderung eines Messwerts zwischen erstem und letztem Belastungslauf	Einheit der Messgröße
Δ_{elast}	Änderung eines Messwerts zwischen erstem Referenzlauf und erstem Belastungslauf	Einheit der Messgröße
Δ_{ref}	Änderung eines Messwerts zwischen erstem und letztem Referenzlauf	Einheit der Messgröße
Δu	Verschiebung	mm
φ	Winkellage der Unwucht	°
$\varphi_{\kappa oax}$	Winkellage des maximalen Koaxialitätsfehlers	°
φ_{Pl}	Winkellage des maximalen Planlauffehlers	°
$\overrightarrow{\varphi_{rot}}$	Verdrehung der Trägheitsachse zur Rotationsachse	°
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹
\emptyset	Durchmesser	mm

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzungen

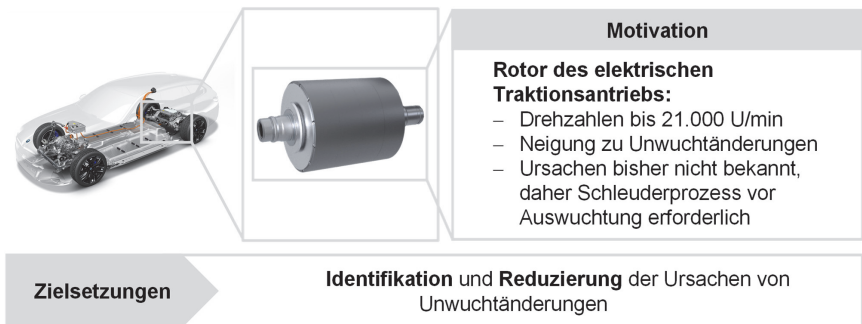
23,5 Prozent der 2021 für Deutschland geschätzten CO₂-Emissionen sind auf den Verkehrssektor zurückzuführen (BMWK 2023, S. 26). Die Elektrifizierung von Mobilitätslösungen vom Personenverkehr bis hin zur Luftfahrt stellt somit einen entscheidenden Baustein zur Erreichung der Klimaziele dar (BMWK 2023, S. 17). Gleichzeitig stellt sie besonders hohe Anforderungen an den Wirkungsgrad, die Leistungsdichte und die Lebensdauer elektrischer Traktionsantriebe. Die Produktion dieser Antriebe wird somit vor immer neue Herausforderungen gestellt.

Der Einsatz permanentmagneternerregter Synchronmaschinen (PSM) ermöglicht besonders hohe Wirkungsgrade von bis zu 96 % (Neß & Raggl 2022, S. 42). Gesteigerte Leistungsdichten werden durch hohe maximale Drehzahlen von bis zu 21.000 min⁻¹ erreicht¹. Bis 2035 sind maximale Drehzahlen von bis 28.000 U/min zu erwarten (Cai & Wu et al. 2021, S. 18). Dies folgt aus der Abhängigkeit der mechanischen Leistung vom Drehmoment und der Drehzahl des Antriebs: Eine Steigerung der maximalen Drehzahl ermöglicht eine Steigerung der mechanischen Leistung, ohne in gleichem Maße die Masse des Antriebs zu erhöhen. Eine Steigerung des Drehmoments würde hingegen einen Rotor größeren Durchmessers und somit größerer Masse erfordern (Tessarolo 2018, S. 1065). Abhängig vom Außendurchmesser des Rotors gehen mit erhöhten Drehzahlen Umfangsgeschwindigkeiten von über 100 m/s und folglich hohen Fliehkräften einher. Zur Vermeidung eines unruhigen Laufs und eines frühzeitigen Lagerschadens ist somit für jeden Rotor ein individueller Auswuchtprozess erforderlich (Schneider 2020, S. 2). Aufgrund der hohen im Betrieb wirkenden mechanischen, thermischen und magnetischen Lasten kann bereits vor Eintritt eines Lagerschadens eine Steigerung der im Betrieb hör- und spürbaren Schwingungen auftreten. Diese können durch Setzbewegungen der Rotorkomponenten hervorgerufen werden, die eine Steigerung der Rotorunwucht bewirken (Schneider 2020, S. 38). Setzbewegungen können bspw. an Rotorblechpaketen in Form unsymmetrischer plastischer Aufweitungen auftreten (Epskamp 2020, S. 147). Zum Überschreiten einer zulässigen Unwuchtänderung sind bereits Setzbewegungen im µm-Bereich ausreichend (Schneider 2020, S. 189).

¹ Electric Motor News (2024), *The two E-motors developed by Xiaomi*. <https://www.electricmotor-news.com/gb/eventi/motori-elettrici-sviluppati-xiaomi/> [09.06.2024]

Derzeit liegen nur wenige Erkenntnisse darüber vor, wie sich die Auslegung und Produktion von Permanentmagnetrotoren (PM-Rotoren) auf deren Neigung zu Unwuchtänderungen auswirken. Sind an einem PM-Rotor im Betrieb Unwuchtänderungen zu erwarten, muss er während der Produktion einem Schleuderprozess unterzogen werden. Dieser ist dem eigentlichen Auswuchtprozess vorgelagert. Für einen sicheren Betrieb des Schleuderstands ist zudem in der Regel ein Vorwuchten des Rotors erforderlich². Die Neigung eines PM-Rotors zu Unwuchtänderungen wirkt sich somit in hohem Maße auf die Investitionskosten und Durchlaufzeiten der Rotorproduktion aus.

In dieser Arbeit sollen daher zunächst die **Ursachen der an PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe auftretenden Unwuchtänderungen** identifiziert werden. Hierfür werden Fertigungs- und Montageabweichungen der Rotorkomponenten eines Referenzsystems sowie im Betrieb wirkende mechanische und thermische Lasten analysiert. Daraus abgeleitete, erwartete Ursachen für Unwuchtänderungen werden an einem Schleuderprüfstand experimentell validiert. Daraus gewonnene Erkenntnisse sollen eingesetzt werden, um **Maßnahmen für die Reduzierung von Unwuchtänderungen** abzuleiten (Abbildung 1-1). Die Maßnahmen sollen es zukünftig ermöglichen, auf einen Schleuderprozess zu verzichten.



*Abbildung 1-1: Motivation und Zielsetzungen der Arbeit
(Bildquellen von links nach rechts: BMW AG³, Muhr und Bender KG)*

² Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG (2023), *Vertikaler Schleuderstand Typ ESV25-AR*. <https://www.hofmann-global.com/produkte/spezial-auswuchtloesungen/auswuchtmaschinen-automotive/auswuchtmaschinen-fuer-elektrorotoren-hybridkaeufer.html> [03.10.2023]

³ BMW AG (2024), *Der neue BMW 5er Touring - BEV Antrieb (02/2024)*. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90536045/der-neue-bmw-5er-touring-bev-antrieb-02/2024> [13.07.2024]

1.2 Aufbau der Arbeit

In **Kapitel 2** werden zunächst die Funktionsweise, der Aufbau sowie relevante Qualitätsanforderungen industriell hergestellter PM-Rotoren für elektrische Traktionsantriebe vorgestellt. Es werden Grundlagen zu Begriffen, Arten und Ursachen von Unwuchten sowie zulässiger Unwuchten eingeführt.

Der für diese Arbeit relevante Stand der Forschung und Technik zur Auslegung, Produktion und zum Betrieb von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe wird in **Kapitel 3** zusammengefasst. Aus diesem wird der Forschungsbedarf abgeleitet.

Die beiden Zielsetzungen, Ursachen von Unwuchtänderungen zu identifizieren und zu reduzieren (vgl. Abbildung 1-1), werden im **Kapitel 4** um insgesamt drei Forschungsfragen ergänzt. Die zur Bearbeitung dieser Forschungsfragen gewählten Methoden werden ebenfalls erläutert.

In **Kapitel 5** werden zunächst technologische Randbedingungen aktuell produzierter elektrischer Traktionsantriebe definiert. Sie bilden die Grundlage der Analyse erwarteter Fertigungs- und Montageabweichungen sowie Relativbewegungen und Verformungen der Rotorkomponenten. Anhand eines analytischen Modells werden diejenigen Relativbewegungen und Verformungen identifiziert, die sich in besonderem Maße auf Unwuchtänderungen auswirken.

Kapitel 6 beschreibt die experimentelle Validierung der in Kapitel 5 als kritisch identifizierten Verformungen und Relativbewegungen. Hierbei erfolgt zunächst die Bewertung von Fertigungs- und Montageabweichungen der Komponenten einer Referenzgeometrie. Bei Schleuderversuchen durchgeführte Messungen werden den in Kapitel 5 erwarteten Verformungen und Relativbewegungen gegenübergestellt. In diese Bewertungen fließen auch Schleuderversuche an zwei industriell hergestellten Rotorgeometrien ein.

In den Kapiteln 5 und 6 gewonnene Erkenntnisse werden in **Kapitel 7** in Maßnahmen zur optimierten Auslegung und Produktion von PM-Rotoren überführt. Dabei erfolgt eine Unterscheidung zwischen Ansätzen, die wenige bis umfassende Anpassungen aktueller Produktionsprozesse und Produktauslegungen erfordern. Zudem wird die in den vorherigen Kapiteln eingesetzte Methodik zur Identifikation der Ursachen von Unwuchtänderungen zusammengefasst.

Kapitel 8 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und leitet einen Ausblick für zukünftige Untersuchungen ab.

2 Grundlagen

2.1 Permanentmagnetenerregte Synchronmaschine (PSM)

Während die Asynchronmaschine (ASM) als stationärer Antrieb am häufigsten verwendet wird, stellt bei elektrischen Fahrzeugen die permanentmagnetenerregte Synchronmaschine (PSM) die am häufigsten eingesetzte Antriebsart dar. Fremderregte Synchronmaschinen (FSM) kommen aktuell nur in wenigen Fahrzeugmodellen zum Einsatz. Auch für die nächsten zehn Jahre wird erwartet, dass 82 % der neu zugelassenen hybrid- und vollelektrischen Fahrzeuge als Traktionsantrieb eine PSM verwenden⁴. Im Vergleich zur ASM zeichnet sich die PSM durch einen besonders hohen Wirkungsgrad aus. Im Gegensatz zur FSM erfordert sie keine Stromeinleitung in den Rotor und ermöglicht somit eine durch geringeren Verschleiß bedingte höhere Lebensdauer. Bei der Auswahl eines elektrischen Traktionsantriebs überwiegen diese Vorteile meist die hohen Materialkosten, die mit dem Einsatz von Seltenerdmetallen im Rotor der PSM einhergehen (Neß & Raggl 2022, S. 44). Die Funktionsweise und der Aufbau eines Permanentmagnetrotors (PM-Rotor) werden im Folgenden vorgestellt. Zudem werden Qualitätsanforderungen an die Gestaltung und Produktion von PM-Rotoren erläutert.

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines Permanentmagnetrotors

Der Stator und der PM-Rotor bilden gemeinsam die beiden Aktivteile einer PSM. Durch eine geeignete Bestromung der Erregerspulen im Stator durch die Leistungselektronik wird in diesem ein elektromagnetisches Feld erzeugt, welches sich in Umfangsrichtung fortbewegt. Das Magnetfeld des PM-Rotors folgt dem Magnetfeld des feststehenden Stators und erzeugt dadurch eine Rotation des Rotors (Abbildung 2-1 a). Die Permanentmagnete, die am Umfang oder innerhalb des Rotors positioniert sind, erzeugen das Rotormagnetfeld. Bei PSM, die als elektrische Traktionsantriebe eingesetzt werden, überwiegt der Einsatz innenliegender Magnete. Sie werden im Folgenden als vergrabene Magnete bezeichnet (Abbildung 2-1 b) (Krings & Monissen 2020, S. 1810). Durch einen höheren Reluktanzanteil als bei Oberflächenmagneten erhöhen sie das oberhalb der Nenndrehzahl verfügbare Drehmoment (Neß & Raggl 2022, S. 42). Zudem ermöglicht die Verwendung vergrabener Magnete, die erforderliche Magnetmasse und damit einhergehende Materialkosten eines PM-Rotors zu verringern (Binder & Schneider et

⁴ IDTechEx (2023), *Electric Motors for Electric Vehicles 2024-2034*. <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-motors-for-electric-vehicles-2024-2034/941> [03.10.2023]

al. 2005, S. 2846). Industriell hergestellte PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe können typischerweise 48 bis 128 Magnete beinhalten (Krings & Monissen 2020, S. 1810).

Um Wirbelstromverluste zu reduzieren, besteht der Magnetträger aus Blechen, die in axialer Richtung zueinander elektrisch isoliert sind (Binder 2012, S. 41). Dieser Magnetträger wird im Folgenden als Rotorblechpaket bezeichnet. Die Magnete sind innerhalb der Magnet Taschen mittels Formschluss gegenüber im Betrieb wirkenden Fliehkräften gesichert (Abbildung 2-1 c). Zur Fixierung der Magnete innerhalb der Magnet-taschen kann zusätzlich ein Stoff- und/oder Kraftschluss eingesetzt werden. Jedes der Rotorblechpakete eines Rotors ist an eine drehend gelagerte Rotorwelle angebunden. Sie ist als Hohlwelle ausgeführt, um die Rotormasse zu reduzieren. In einer koaxialen Verzahnung übergibt sie das erzeugte Drehmoment an ein nachgelagertes Getriebe. Mit einem Verhältnis von 7:1 bis 10:1 erfolgt dort die Untersetzung zur Drehzahl der Antriebsachse des elektrischen Fahrzeugs (Abbildung 2-1 d) (Mehta & Liao et al. 2019, S. 450).

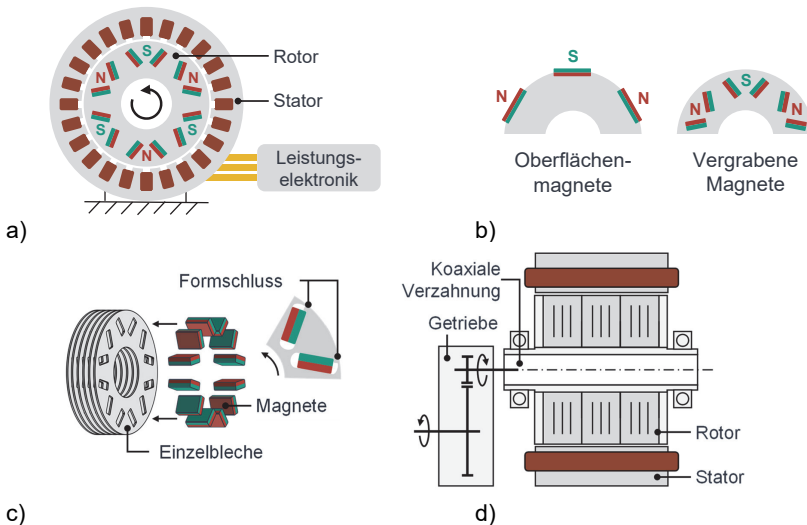


Abbildung 2-1: Aufbau eines Permanentmagnetrotors: a) Rotor und Stator als Aktivteile einer PSM, b) Oberflächenmagnete und vergrabene Magnete, c) geblechter Magnetträger bzw. Blechpaket mit vergrabenen Magneten, d) Blechpakete auf Rotorwelle und Anbindung an ein Getriebe

Weitere Details sowie aktuelle Entwicklungen bei der konstruktiven Gestaltung des PM-Rotors eines elektrischen Traktionsantriebs sowie der Auswahl zugehöriger Produktionsprozesse werden in Abschnitt 3.1 vorgestellt. Zum besseren Verständnis des Abschnitts 3.1 sowie zur Verdeutlichung der Bedeutung der Unwucht eines Rotors für dessen Betriebsverhalten befasst sich der folgende Abschnitt mit den technologischen Anforderungen an PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe.

2.1.2 Technologische Anforderungen an Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

Eine zentrale Anforderung an ein elektrisches Fahrzeug ist eine möglichst hohe Reichweite. Dies setzt einen elektrischen Antrieb mit besonders hohem Wirkungsgrad voraus (Abbildung 2-2) (Karle 2021, S. 14). Daraus folgt wiederum die Auswahl einer PSM als Antriebsart und somit der Einsatz eines Permanentmagnetrotors (Neß & Raggl 2022, S. 42). Zur Verringerung von Rollverlusten sowie zur Verbesserung der Fahrdynamik ist zudem ein elektrischer Antrieb mit besonders kleinem Bauraum, geringer Masse und gleichzeitig hoher Antriebsleistung vorteilhaft. Diese Anforderungen können als gesteigerte Leistungsdichte δ_P des Antriebs zusammengefasst werden. Diese stellt den Quotienten aus mechanischer Leistung P_{mech} und Masse m des Antriebs dar (2-1 rechts). Eine Steigerung des Drehmoments M ist in der Regel mit gesteigerten Materialkosten, verringertem Wirkungsgrad und vergrößertem Bauraum verbunden. Letzteres wirkt sich wiederum negativ auf die Masse m des Antriebs aus. Somit stellt die Steigerung der maximalen Rotordrehzahl ω trotz der Notwendigkeit eines Getriebes das größere Potential zur Steigerung der Leistungsdichte dar (2-1 rechts) (Tessarolo 2018, S. 1065).

$$\delta_P = \frac{P_{\text{mech}}}{m} = \frac{M \cdot \omega}{m} \rightarrow \delta_P \hat{=} \frac{M \hat{=} \cdot \omega \hat{=}}{m \hat{=}} \quad 2-1$$

Hohe Drehzahlen stehen allerdings im Widerspruch zur geforderten Lebensdauer sowie zu möglichst geringen hör- und spürbaren Schwingungen des elektrischen Traktionsantriebs. Letzteres kann durch die Abkürzung der Begriffe „Noise, Vibration, Harshness“ als hohe Anforderungen an das NVH-Verhalten zusammengefasst werden (Nguyen-Schäfer 2016, S. 192). Sie sind für die Zuverlässigkeit und den gewünschten Fahrkomfort des elektrischen Fahrzeugs erforderlich. Ein ruhiger Betrieb des PM-Rotors bei hohen Drehzahlen ist nur dann möglich, wenn dessen Unwucht über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs eine zulässige Unwucht nicht überschreitet (Schneider 2020, S. 98). Aktuell industriell hergestellte elektrische Traktionsantriebe

werden bei immer höheren Drehzahlen eingesetzt (Abbildung 2-3). Das Verständnis an einem Rotor vorliegender Unwuchten sowie an ihm auftretender Unwuchtänderungen gewinnt somit zunehmend an Bedeutung. Im folgenden Abschnitt werden daher Grundlagen zu Arten von Unwuchten sowie zulässigen Unwuchten und Unwuchtänderungen erläutert.

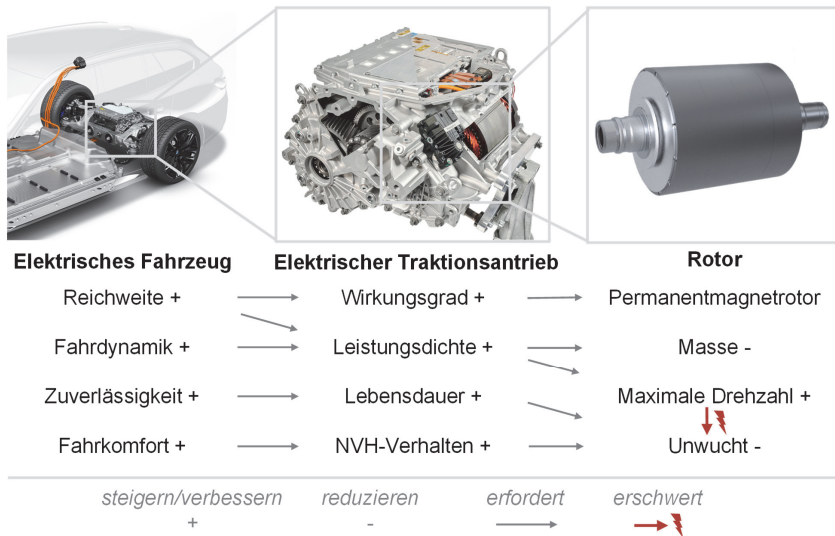


Abbildung 2-2: Anforderungen an PM-Rotoren, abgeleitet aus Anforderungen an ein elektrisches Fahrzeug
(Bildquellen von links nach rechts: BMW AG⁵, BMW AG⁶, Muhr und Bender KG)

⁵ BMW AG (2024), *Der neue BMW 5er Touring - BEV Antrieb (02/2024)*. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90536045/der-neue-bmw-5er-touring-bev-antrieb-02/2024> [13.07.2024]

⁶ BMW AG (2020), *BMW Gen5 Hochintegrierte E-Antriebsseinheit Schnittmodell*. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90392898/bmw-gen5-hochintegrierte-e-antriebsseinheit-schnittmodell> [13.07.2024]

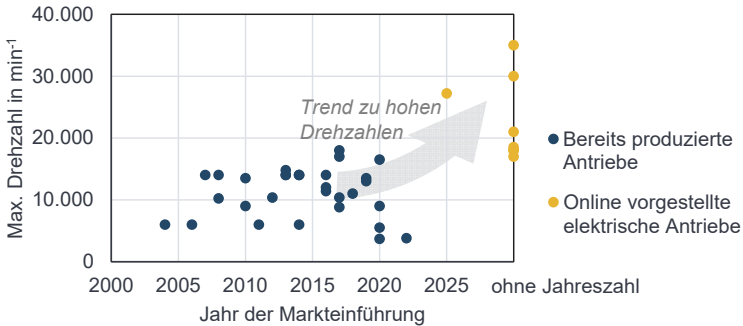


Abbildung 2-3: Maximale Drehzahlen bereits produzierter und online vorgestellter PSM für den Einsatz als elektrische Traktionsantriebe (vgl. Tabelle A- 1 im Anhang)

2.2 Unwucht

Aufgrund von Materialinhomogenitäten sowie Fertigungs- und Montageabweichungen seiner Komponenten besitzt jeder Rotor eine Unwucht. Sie ist stark abhängig von der Konstruktion des Rotors, den gewählten Werkstoffen sowie den zugehörigen Fertigungs- und Montageprozessen (Schneider 2020, S. 35).

Vereinfacht kann eine Unwucht als Produkt des Radius r und der Masse u einer Unwuchtmasse beschrieben werden, die sich mit einer Drehzahl n bzw. einer Kreisfrequenz ω auf einer Kreisbahn um die Rotationsachse bewegt. In diesem Fall schneidet die Rotationsachse den Schwerpunkt S der Kreisbahn (2-2, Abbildung 2-4) (Schneider 2020, S. 81). Die Bewegung der Unwuchtmasse entlang der Kreisbahn führt zu einer umlaufenden Zentrifugalkraft, die von der Rotorlagerung aufgenommen werden muss (2-3). Die oszillierenden Lagerkräfte verursachen wiederum hör- und spürbare Schwingungen des gesamten Systems.

Analog kann eine Unwucht als das Produkt der Exzentrizität e des Schwerpunkts S' und der Gesamtmasse des Rotors m beschrieben werden (2-4, Abbildung 2-4). Eine gängige Einheit des Betrags einer Unwucht ist gmm. Sie resultiert aus dem Produkt einer Masse in g und eines Radius bzw. einer Schwerpunkts-Exzentrizität in mm. Die Winkellage bzw. Phase der Unwucht ist als Winkel φ in ° zwischen einer rotorfesten Nulllage und dem Vektor r bzw. e definiert (Schneider 2020, S. 82).

$$\vec{U} = u \vec{r} \quad 2-2$$

$$\vec{F}_z = m \vec{r} \omega^2 \quad 2-3$$

$$\vec{U} = m \vec{e} \quad 2-4$$

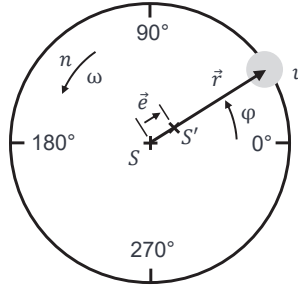


Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung einer Unwucht
(in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 81))

2.2.1 Arten von Unwuchten

Im vorherigen Abschnitt wurde der einfachste Fall einer Unwucht anhand eines zweidimensionalen, scheibenförmigen Körpers eingeführt. Dieser Fall ist allerdings nicht ausreichend, um den Unwuchtzustand des PM-Rotors eines elektrischen Traktionsantriebs zu beschreiben (Schneider 2020, S. 54). In den folgenden Abschnitten werden Arten von Unwuchten vorgestellt, die zur Beschreibung des Unwuchtzustands eines PM-Rotors relevant sind. Hierbei wird angenommen, dass ein PM-Rotor an zwei Positionen gelagert ist und sich sein Schwerpunkt symmetrisch zwischen beiden Lagerstellen befindet. Zudem überschreitet der Rotor im Betrieb nicht seine erste Biege-Eigenfrequenz und gilt somit als Rotor mit starrem Verhalten. Dies bedeutet, dass seine Unwucht als drehzahlunabhängig angenommen wird (Schneider 2020, S. 37).

2.2.1.1 Statische Unwucht

Eine rein statische Unwucht liegt vor, wenn an einem unwuchtfreien Rotor in der Schwerpunktsebene eine Unwuchtmasse u angebracht wird (Abbildung 2-5 a). Diese erzeugt aufgrund ihrer um r exzentrischen Lage eine statische Unwucht U_S , die zu gleichen Teilen in beiden Lagerstellen wirkt (2-5). Die Unwuchten U_A und U_B sind somit im Betrag und in der Winkellage gleich (Abbildung 2-5 b) und c). Alternativ kann dieser Unwuchtzustand als Exzentrizität e der Trägheitsachse des Rotors bezüglich seiner Rotationsachse dargestellt werden. Der Betrag dieses Versatzes ergibt sich nach 2-4 aus dem Quotienten des Betrags von U_S und der Gesamtmasse m des Rotors. Eine statische Unwucht liegt beispielsweise dann vor, wenn der Rotor einen Rundlauffehler aufweist (Abbildung 2-5 d). **Je höher der Rundlauf(fehler), desto höher die statische**

Unwucht des Rotors. Die Annahme einer rein statischen Unwucht findet insbesondere bei der Beschreibung der Unwucht eines scheibenförmigen Körpers Anwendung, dessen Außendurchmesser die axiale Länge deutlich übersteigt (Schneider 2020, S. 53). Diese Annahme ist bei PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe aufgrund ihrer axialen Länge in der Regel nicht ausreichend.

$$\vec{U}_A = \vec{U}_B = \frac{1}{2} \vec{U}_S$$

2-5

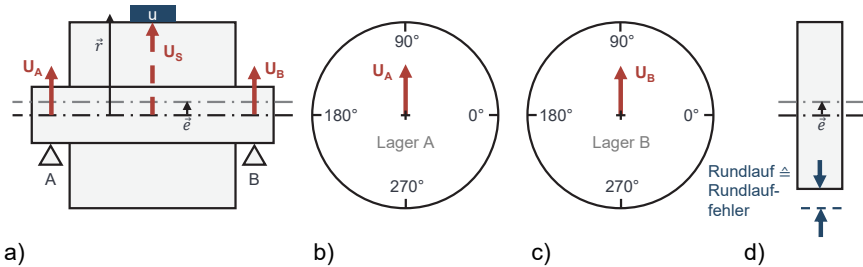


Abbildung 2-5: a) Darstellung eines Rotors mit rein statischer Unwucht sowie Unwuchtvektoren b) in Lagerebene A und c) in Lagerebene B. d) Definition eines Rundlauf(fehler) (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 81))

2.2.1.2 Momentenunwucht

Eine reine Momentenunwucht liegt vor, wenn sich zwei Unwuchtmassen u an axial unterschiedlichen Positionen auf gegenüberliegenden Winkellagen befinden (Abbildung 2-6 a). Die Unwuchtmassen ergeben ein Unwuchtpaar $[C, -C]$, welches in Abhängigkeit des axialen Abstands l der Unwuchtmassen eine Momentenunwucht P erzeugt (2-6). Die Momentenunwucht wirkt um einen senkrecht zur Rotationsachse stehenden Vektor und wird üblicherweise in der Einheit gmm^2 angegeben. In Abhängigkeit des Lagerabstands L ergeben sich in den Lagerstellen die Unwuchtvektoren $U_A = -U_B$ (2-7, Abbildung 2-6 b) und c). Diese sind gleichen Betrags, aber entgegengesetzter Winkellage. Es liegt eine Verdrehung der Trägheitsachse um den Schwerpunkt des Rotors vor. Diese kann bspw. aufgrund eines Planlauf(fehler) des Rotors vorliegen (Abbildung 2-6 d). **Je höher der Planlauf(fehler), desto höher die Momentenunwucht des Rotors.** Die Verdrehung der Trägheitsachse φ_{rot} berechnet sich bei kleinen Winkeln aus der Momentenunwucht P sowie den Trägheitsmomenten J_x und J_z (2-8). Im Falle eines idealen Hohlzylinders ergeben sich J_x und J_z entsprechend der 2-9 und 2-10 aus der Masse m , dem Außen- und Innendurchmesser D und d sowie der axialen Länge l_{ax} . Die z-

Achse ist hierbei als Symmetrieachse des Hohlzylinders definiert (Schneider 2020, S. 57–58).

$$\vec{P} = \vec{l} \times \vec{C} \quad 2-6$$

$$\vec{U}_A = -\vec{U}_B = -\vec{C} \cdot \frac{|\vec{l}|}{L} \quad 2-7$$

$$\vec{\varphi}_{\text{rot}} = \frac{\vec{P}}{J_x - J_z} \quad 2-8$$

$$J_x = \frac{m}{4} \left(\frac{D^2 + d^2}{4} + \frac{l_{ax}^2}{3} \right) \quad 2-9$$

$$J_z = \frac{m}{8} (D^2 + d^2) \quad 2-10$$

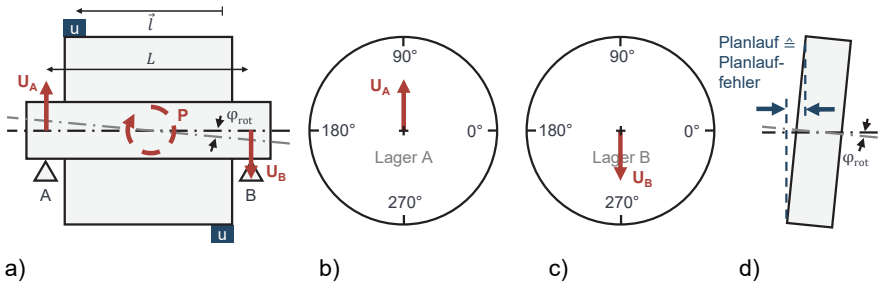


Abbildung 2-6: a) Darstellung eines Rotors mit reiner Momentenunwucht sowie Unwuchtvektoren b) in Lagerebene A und c) in Lagerebene B. d) Definition eines Planlauf(fehlers) (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 58))

Eine Momentenunwucht ist insbesondere dann zu berücksichtigen, wenn die Längsausdehnung eines Körpers gegenüber seiner Querausdehnung nicht vernachlässigbar ist. Liegt bei einem scheibenförmigen Rotor ein besonders hoher Planlauffehler vor, so kann auch bei diesem eine Momentenunwucht nicht vernachlässigt werden (DIN ISO 21940-14 2012, S. 11) (Schneider 2020, S. 53).

2.2.1.3 Dynamische Unwucht

Im Realfall liegt an einem PM-Rotor eine Überlagerung einer statischen Unwucht und einer Momentenunwucht vor. Jeder Rotor besitzt somit eine sogenannte dynamische Unwucht, bei der die Unwuchtvektoren $U_A \neq U_B$ sich sowohl im Betrag als auch in der Winkellage unterscheiden (Abbildung 2-7 b) und c). Die Trägheitsachse ist in diesem Fall bezüglich der Rotationsachse gleichzeitig exzentrisch und verdreht (Abbildung 2-7

a). Beide Achsen liegen dabei in der Regel zueinander windschief. Nur im Sonderfall einer sogenannten *resultierenden Unwucht*, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, schneiden sich die Trägheits- und Rotationsachse (Schneider 2020, S. 89–90).

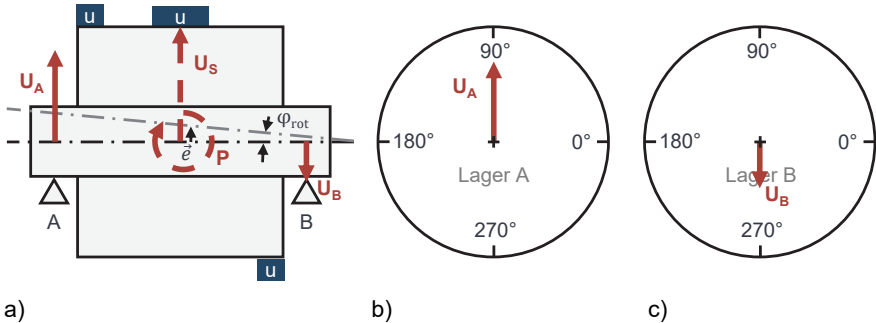


Abbildung 2-7: a) Darstellung der dynamischen Unwucht eines Rotors sowie Unwuchtvektoren b) in Lagerebene A und c) in Lagerebene B (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 90))

Wird ein Rotor aus beispielsweise fünf scheibenförmigen Körpern zusammengesetzt, so ergeben deren statische Unwuchten U_1 bis U_5 einerseits eine im Schwerpunkt wirkende resultierende statische Unwucht U_S (Abbildung 2-8 a) und b). Die axiale Verteilung der jeweiligen statischen Unwuchten bewirkt andererseits am gesamten Rotor eine Momentenunwucht, die in den Lagerebenen als Unwuchtpaar $[C, -C]$ dargestellt werden kann (Abbildung 2-8 b). Unter Verwendung der 2-11 und 2-12 können aus der resultierenden Unwucht U_S , dem Unwuchtpaar $[C, -C]$ sowie dem Verhältnis des axialen Abstands l des Unwuchtpaars und dem Lagerabstand L die in den Lagerstellen wirkenden Unwuchtvektoren U_A und U_B berechnet werden (Abbildung 2-8 c). In diesem Fall gilt vereinfacht $l/L = 1$. U_A und U_B werden als komplementäre Unwuchten bezeichnet. Das Ergebnis einer Unwuchtmessung wird in der Regel anhand der komplementären Unwuchten, also anhand von zwei Vektoren, angegeben. Mit ihren Beträgen in gmm und Winkellagen in $^\circ$ beschreiben sie den Unwuchtzustand eines Rotors (Schneider 2020, S. 89).

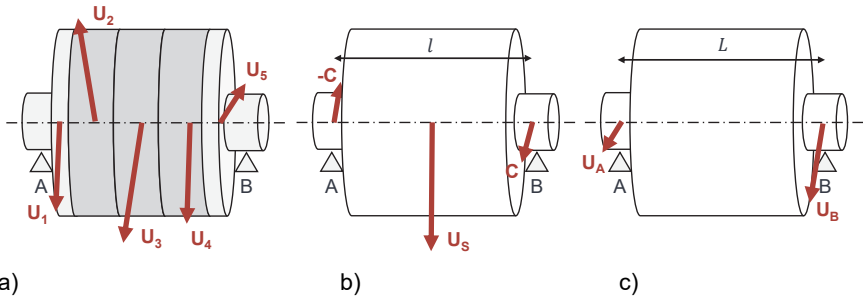


Abbildung 2-8: Unwuchtzustand eines Rotors, dargestellt durch a) statische Unwuchten der Rotorkomponenten, b) resultierende statische Unwucht und Unwuchtpaar, c) komplementäre Unwuchten in A und B (eigene Darstellungen in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 55) und (Schneider 2020, S. 92))

$$\vec{U}_A = \frac{\vec{U}_S}{2} - \vec{C} \frac{l}{L} \quad 2-11$$

$$\vec{U}_B = \frac{\vec{U}_S}{2} + \vec{C} \frac{l}{L} \quad 2-12$$

Die obigen Formeln können darüber hinaus verwendet werden, um ausgehend von den komplementären Unwuchten U_A und U_B die resultierende statische Unwucht U_S und das Unwuchtpaar $[C, -C]$ zu berechnen. So kann beispielsweise ausgehend vom Ergebnis einer Unwuchtmessung der Anteil einer statischen Unwucht und einer Momentenunwucht ermittelt werden. Der pro Lagerebene wirkende Anteil der statischen Unwucht $U_{A,S} = U_{B,S}$ ergibt sich aus 2-13 und 2-14. Der Anteil der Momentenunwucht $U_{A,P} = -U_{B,P}$ kann daraufhin mit 2-15 bestimmt werden. Durch diese Aufteilung ist eine erste Einschätzung möglich, in welchem Maße eine statische Unwucht oder eine Momentenunwucht vorliegt. Ein hoher Anteil einer **statischen Unwucht lässt auf einen ausgeprägten Rundlauffehler des Rotors schließen**. Ein gesteigerter Anteil einer **Momentenunwucht ist in der Regel auf einen Planlauffehler des Rotors zurückzuführen** (Schneider 2020, S. 188–192). Inwiefern Rund- und Planlauf eines Rotors sich auf dessen Unwuchtzustand auswirken und ab wann sie zu einer Überschreitung der zulässigen Unwucht führen, wird in Abschnitt 2.2.2 exemplarisch dargestellt.

$$\vec{U}_A + \vec{U}_B = \vec{U}_S \quad 2-13$$

$$\frac{1}{2} \vec{U}_S = \vec{U}_{A,S} = \vec{U}_{B,S} \quad 2-14$$

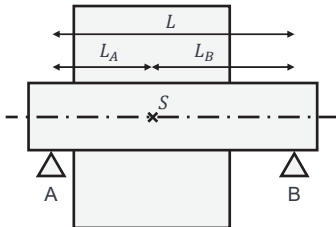
$$\vec{U}_A - \vec{U}_{A,S} = \vec{U}_{A,P} = -\vec{U}_{B,P} \quad 2-15$$

2.2.2 Zulässige Unwucht

In (DIN ISO 21940-11 2017) werden Gütestufen $G = e_{zul} \cdot 2\pi \cdot n_{max}$ definiert. In Abhängigkeit der Rotormasse m und der maximalen Betriebsdrehzahl n_{max} legen sie die zulässige Restunwucht U_{zul} fest (2-16). U_{zul} ist dabei als Betrag der resultierenden statischen Unwucht zu verstehen und definiert somit nach 2-13 den maximal zulässigen Betrag der Vektorsumme der komplementären Unwuchten U_A und U_B .

$$U_{zul} = e_{zul} m = \frac{G m}{2\pi n_{max}} \quad 2-16$$

Im Falle einer mittigen Lage des Schwerpunkts kann die pro Lagerebene zulässige Unwucht als $0,5 \cdot U_{zul}$ festgelegt werden. Anderenfalls ergibt sie sich aus den axialen Abständen der Lagerebenen zum Schwerpunkt $[L_A, L_B]$ sowie dem Lagerabstand L (Abbildung 2-9, 2-17 und 2-18).



$$U_{zul,A} = \frac{U_{zul} L_B}{L} \quad 2-17$$

$$U_{zul,B} = \frac{U_{zul} L_A}{L} \quad 2-18$$

Abbildung 2-9: Innenbord-Rotor mit unsymmetrischer Lage des Massenmittelpunktes (in Anlehnung an (DIN ISO 21940-11 2017, S. 18))

Die Festlegung der in der Rotorproduktion zu erreichenden Gütestufe G kann anhand einer Zuordnung zu einem Rotortyp, einer experimentellen Ermittlung, einer Bewertung zulässiger Lagerkräfte oder auf Basis von dokumentierten Erfahrungswerten erfolgen (DIN ISO 21940-11 2017, S. 13). Ersteres findet am häufigsten Anwendung und geschieht entlang des in Tabelle 2-1 dargestellten Auszuges von (DIN ISO 21940-11

2017). Für Rotoren elektrischer Traktionsantriebe ergibt dies in der Regel die Auswahl der Gütestufe G 2,5 bis G 6,3 (Nguyen-Schäfer 2016, S. 191).

Tabelle 2-1: Auszug aus (DIN ISO 21940-11 2017) zur Zuordnung von Rotortypen zu Auswucht-Gütestufen

<i>Maschinenart – Allgemeine Beispiele</i>	<i>Auswucht-Gütestufe</i>	<i>Betrag von $e_{zul} \cdot \omega$ (mm/s)</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Zentrifugen (Schleudern) - Elektromotoren und Generatoren mit mindestens 80 mm Wellenhöhe und höchster Nenn-drehzahl bis 950 min^{-1} - Elektromotoren mit einer Wellenhöhe unter 80 mm, Lüfter - Maschinen des allgemeinen Maschinenbaus - Werkzeugmaschinen - [...] 	G 6,3	6,3
<ul style="list-style-type: none"> - Kompressoren - Elektromotoren und Generatoren mit mindestens 80 mm Wellenhöhe und höchster Nenn-drehzahl über 950 min^{-1} - Werkzeugmaschinen-Antriebe - [...] 	G 2,5	2,5
<ul style="list-style-type: none"> - Antriebe von Audio- und Videogeräten - Schleifmaschinen-Antriebe 	G 1	1
<ul style="list-style-type: none"> - Kreisel - Spindeln und Antriebe von Präzisionsmaschinen 	G 0,4	0,4

Zur Veranschaulichung der Anforderungen, die eine Wuchtgüte G 2,5 an die Produktion des PM-Rotors eines elektrischen Traktionsantriebs stellt, dient folgendes Beispiel: Für einen Rotor der Masse 15 kg und einer maximalen Betriebsdrehzahl von 15.000 min^{-1} wird die Wuchtgüte G 2,5 gewählt. Nach Formel 2-15 ergibt sich eine zulässige resultierende Unwucht von 23,87 gmm. Bei mittiger Lage des Schwerpunktes entspricht dies pro Lagerebene einer zulässigen Unwucht von 11,94 gmm. Nach Formel 2-2 kann die zulässige resultierende Unwucht in einen maximal zulässigen radialen Versatz der Trägheitsachse zur Rotationsachse umgerechnet werden. Dieser beträgt hier $1,59 \text{ }\mu\text{m}$.

Diese Exzentrizität ohne Auswuchtprozess einzuhalten, würde – wenn überhaupt umsetzbar – eine besonders aufwendige Fertigung und Montage der Rotorkomponenten erfordern. Eine unwuchtminimale Rotormontage ermöglicht zwar die Reduzierung der Rotorunwucht, aufgrund verbleibender Mess- und Montageunsicherheiten erreicht sie

aber nicht in allen Fällen die Einhaltung der Wuchtgüte G 2,5 (Peter 2018; Wößner & Uhl et al. 2019). Für jeden Rotor ist somit ein individueller Auswuchtprozess erforderlich. Der folgende Abschnitt stellt Verfahren zur Ermittlung und zum Ausgleich einer Rotorunwucht vor.

2.2.3 Auswuchtprozess

Ein Auswuchtprozess erfordert zunächst die Kenntnis über den Ausgangszustand der Rotorunwucht. Sie wird durch eine erste Unwuchtmessung ermittelt, die pro Lagerebene einen Unwuchtvektor angibt. Diese beiden Unwuchtvektoren werden gemeinsam als Initialunwucht des Rotors bezeichnet. Der Betrag beider Unwuchtvektoren wird der pro Lagerebene zulässigen Unwucht gegenübergestellt (vgl. Abschnitt 2.2.2). In der Regel ist daraufhin in mindestens einer Lagerebene ein Unwuchtausgleich erforderlich. Dieser kann durch einen Abtrag, einen Auftrag oder eine Verlagerung von Auswuchtmassen erfolgen. Das Ergebnis des Unwuchtausgleichs wird anhand einer zweiten Unwuchtmessung überprüft und erneut der zulässigen Unwucht gegenübergestellt. Wird diese weiterhin überschritten, ist ein zweiter Unwuchtausgleich und eine dritte Unwuchtmessung erforderlich. Unwuchtmessung und -ausgleich werden so lange wiederholt, bis in beiden Lagerebenen die zulässige Unwucht eingehalten wird (Abbildung 2-10). Die am Rotor verbleibende Unwucht wird als Restunwucht bezeichnet (Schneider 2020, S. 224). Im Folgenden werden die zur Unwuchtmessung eingesetzte Messtechnik sowie zum Unwuchtausgleich anwendbare Verfahren vorgestellt.

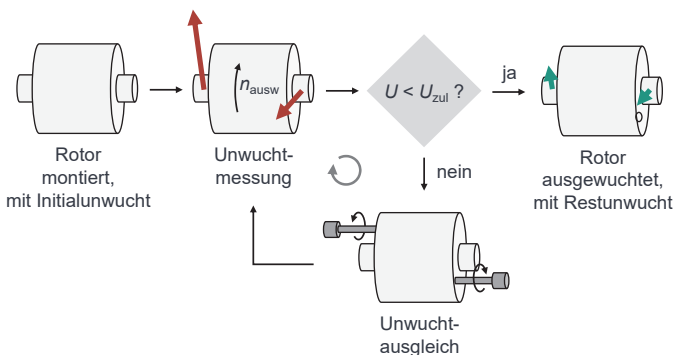


Abbildung 2-10: Auswuchtprozess am Beispiel von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 332))

Eine Besonderheit bei der Bestimmung einer Rotorunwucht liegt darin, dass nur ihre Auswirkungen, aber nicht sie selbst messtechnisch erfasst werden kann. Eine Unwucht kann somit nur indirekt gemessen werden. Soll eine statische Unwucht gemessen werden, ohne dabei den Rotor in Rotation versetzen zu müssen, kann eine Schwerpunktwage eingesetzt werden. Häufiger anzutreffen sind hingegen wegmessende und kraftmessende Auswuchtmaschinen, bei denen ein Rotor in vertikaler oder horizontaler Ausrichtung rotiert wird. Durch die Auswertung von Beschleunigungen bzw. Kräften in zwei unterschiedlichen Messebenen kann die dynamische Unwucht eines Rotors ermittelt werden (Schneider 2020, S. 235). Da kraftmessende Auswuchtmaschinen im Gegensatz zu wegmessenden seltener eine Kalibrierung des Messaufbaus erfordern, werden diese in der Serienproduktion von PM-Rotoren bevorzugt.

Entsprechende Auswuchtmaschinen lagern den Rotor in horizontaler Ausrichtung an dessen Lagerstellen und treiben ihn durch einen Riemen an. Dieser beschleunigt den Rotor auf eine konstante Messdrehzahl, welche mit bspw. 1.000 min^{-1} deutlich unterhalb der maximalen Betriebsdrehzahl von bspw. 15.000 min^{-1} liegt. **Eine Unwuchtmessung bei dieser vergleichsweise geringen Drehzahl ist ausreichend, da ein starres Rotorverhalten angenommen wird.** Das bedeutet, dass der Unwuchtzustand sich nicht in Abhängigkeit der Drehzahl verändert (Schneider 2020, S. 254). Zur Bestimmung des Betrags und der Winkellage der pro Lagerebene vorliegenden Unwucht wird die Messdrehzahl für eine vorgegebene Zeit gehalten (bspw. 30 s). Mittels Fourier-Transformation erfolgt währenddessen die Auswertung der Amplitude des Kraftsignals, das der Frequenz der Messdrehzahl entspricht. Eine Bewertung der Phasenverschiebung zwischen Kraftsignal und einem am Rotor erfassten Nulldurchgang erlaubt die Bestimmung der Winkellage der Unwucht. Insbesondere Kraftanregungen des Antriebsriemens und der Rollenlager der Auswuchtmaschine können die Unwuchtmessung beeinträchtigen (Schneider 2020, S. 266). Nach Ablauf der Messzeit wird der Rotor durch den Antriebsriemen bis zum Stillstand abgebremst. Im Anschluss kann der Unwuchtausgleich durchgeführt werden. Dieser kann durch Materialabtrag (subtraktiv), Materialauftrag (additiv) oder durch Materialverlagerung erfolgen (Abbildung 2-11).

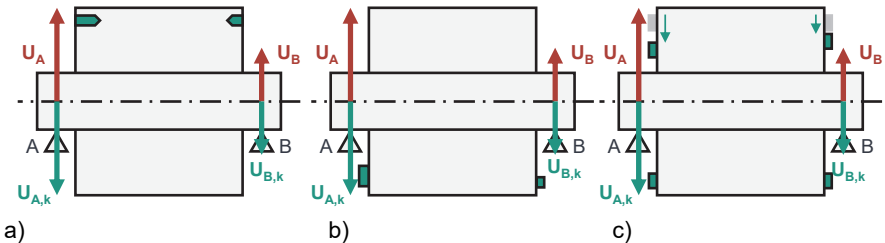


Abbildung 2-11: Unwuchtausgleich durch a) Masseabtrag (subtraktiv), b) Masseauftrag (additiv) und c) Masseverlagerung (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 307))

Ein subtraktives Auswuchten erfolgt in der Regel durch Bohren oder Fräsen in Komponenten des Rotors (Abbildung 2-11 a). Hierbei ist der maximal zulässige Materialabtrag zu berücksichtigen, ab dem eine kritische Beeinflussung der mechanischen und magnetischen Eigenschaften des Rotors eintritt. Gleichzeitig muss ein ausreichend hoher Materialabtrag möglich sein, um selbst hohe Initialunwuchten ausgleichen zu können (Schneider 2020, S. 310). Werden hohe Initialunwuchten erwartet und ist weder am Blechpaket noch an der Rotorwelle ein Materialabtrag möglich, so werden entsprechend dimensionierte Wuchtscheiben benötigt. Diese halten die zu entfernende Auswuchtmasse vor und können zusätzlich zur axialen Sicherung der Blechpakete eingesetzt werden. Sie steigern allerdings die Masse und den Bauraum des Rotors (Wölßner & Stoll et al. 2018, S. 207).

Ein additives Auswuchten ermöglicht es, selbst an axial dünnen Wuchtscheiben hohe Auswuchtmassen anzubringen (Abbildung 2-11 b). Die Höhe der maximal auszugleichenden Initialunwucht geht somit nicht direkt in den für die Wuchtscheibe erforderlichen Bauraum und ihre Masse ein. Die Auswuchtmassen müssen allerdings ausreichend gegen im Betrieb wirkende mechanische und thermische Lasten gesichert werden. Je nach Art der Fixierung eignet sich ein additives Auswuchten nur bedingt für einen vollautomatisierten Prozess. Additive Auswuchtverfahren finden daher häufig bei großen Rotoren (bspw. Generatoren oder Turbinen) Anwendung, bei denen Auswuchtmassen manuell angeschraubt werden (Schneider 2020, S. 311–312). Automatisierte

additive Auswuchtverfahren kommen bei besonders kleinen Rotoren zum Einsatz, bei denen bspw. Klebstoff in dafür vorgesehene Öffnungen eines Rotors eingefüllt wird.⁷

Ein Auswuchten mittels Verlagerung von Massen kann durch die Verschiebung einzelner Massen oder die relative Verdrehung zweier unwuchtiger Scheiben erfolgen (Abbildung 2-11 c). Dieses Prinzip wird bspw. bei manuellen Auswuchtprozessen von Fräs Werkzeugen eingesetzt, bei denen zwei unwuchtige Ringe in die Werkzeugaufnahme integriert sind. Durch Anziehen und Lösen einer Klemmschraube können die Ringe von Hand zueinander verdreht werden (Schneider 2020, S. 310–311). Automatische Auswuchtapparate, die bspw. in die Spindel einer Schleifmaschine integriert werden, verwenden ein ähnliches Prinzip. Bei diesen übernehmen kleine Stellantriebe die geeignete Verlagerung von Auswuchtmassen. Wenngleich diese Auswuchtapparate dazu geeignet wären, eine sich im Betrieb ändernde Unwucht auszugleichen, finden sie aufgrund des erforderlichen Bauraums und der mit ihnen verbundenen Kosten aktuell keine Anwendung bei Rotoren industriell hergestellter elektrischer Traktionsantriebe (Pan & Lu et al. 2020, S. 19).

Aufgrund der guten Automatisierbarkeit und der Sicherheit gegen ein Ablösen von Auswuchtmassen wird der PM-Rotor eines industriell hergestellten elektrischen Traktionsantriebs in der Regel subtraktiv ausgewuchtet. Nach bis zu drei Ausgleichsschritten erreicht dieser in der Regel die Wuchtgüte G 2,5. Neigt ein Rotor allerdings im Betrieb zu einer Veränderung seiner Unwucht, ist die Definition einer zulässigen Unwuchtänderung erforderlich.

2.2.4 Zulässige Unwuchtänderung

Bevor Ansätze zur Definition einer zulässigen Unwuchtänderung vorgestellt werden, werden zunächst die Definitionen eines Rotors mit starrem Verhalten, körperelastischem Verhalten und Setzungsverhalten erläutert: Die nach dem Auswuchten zulässige Restunwucht wurde in 2.2.2 unter der Annahme definiert, dass die Unwucht des PM-Rotors nur eine unwesentliche Drehzahlabhängigkeit aufweist. Sie ist zwischen Auswuchtdrehzahl und maximaler Drehzahl nahezu unverändert (Abbildung 2-12). Ein solcher Rotor wird als Rotor mit starrem Verhalten bezeichnet (Schneider 2020, S. 80). Erfahrungen aus dem tatsächlichen Einsatz von PM-Rotoren elektrischer

⁷ PMB - Präzisionsmaschinenbau Bobertag GmbH & DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA (2023), *PMB stellt neues additives Wuchtverfahren vor*. <https://pmb-bobertag.de/presse/neues-additives-auswuchtverfahren/> [03.10.2023]

Traktionsantriebe zeigen allerdings, dass deren Unwucht sich sowohl vorübergehend als auch dauerhaft ändern kann (Wößner & Lorenz et al. 2019, S. 467). Für PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe kann somit nicht grundsätzlich von einem starren Verhalten ausgegangen werden. Es ist einerseits ein körperelastisches Rotorverhalten anzunehmen. Dies bedeutet, dass im Betrieb wirkende mechanische, thermische und magnetische Belastungen vorübergehende Unwuchtänderungen hervorrufen können. Andererseits ist ein Setzungsverhalten zu berücksichtigen, da dauerhafte Änderungen der Rotorunwucht eintreten können (Abbildung 2-12). Ein wellenelastisches Verhalten des Rotors wird hingegen ausgeschlossen, da er unterhalb seiner ersten Biege-Eigenfrequenz betrieben wird (DIN ISO Nr.19499 2008, S. 8–12). Diese Eigenfrequenz sollte mindestens 30% oberhalb der maximalen Rotordrehzahl liegen (Binder 2012, S. 470).

Fazit: Zielsetzung der Auslegung und Produktion eines PM-Rotors ist nicht ausschließlich die Einhaltung einer zulässigen Restunwucht zum Ende der Rotorproduktion. Sie erfordert auch die Definition einer zulässigen Unwuchtänderung, die aufgrund eines körperelastischen Verhaltens und Setzungsverhaltens des Rotors zu erwarten ist (Schneider 2020, S. 100–102).

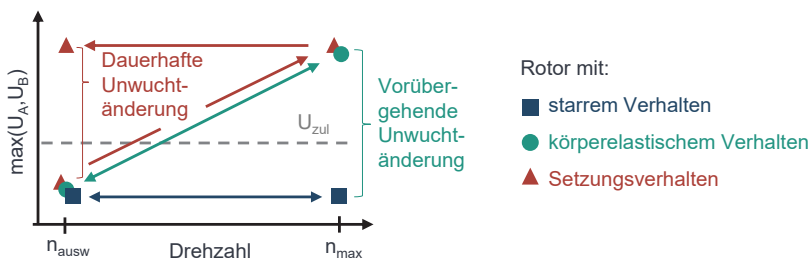


Abbildung 2-12: Vergleich der Drehzahlabhängigkeit der Unwucht von Rotoren mit starrem Verhalten, körperelastischem Verhalten und Setzungsverhalten (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 100–102))

Die Unwuchtänderung eines Rotors kann analog zu seiner dynamischen Unwucht durch zwei unabhängige Vektoren beschrieben werden. Die komplementären Unwuchten der Unwuchtänderung beziehen sich dabei pro Lagerebene auf die Differenz zwischen dem Eingangs- und Ausgangszustand der Rotorunwucht (Abbildung 2-13 a). Die Zeitpunkte 0 und 1 beschreiben den Zustand des Rotors zu Beginn und zum Ende seiner Lebensdauer (2-19 und 2-20).

Zur Definition der zulässigen Unwuchtänderung wird in der Regel ebenfalls auf die in (DIN ISO 21940-11 2017) definierten Wuchtgüten zurückgegriffen. So muss ein Rotor bspw. nach Abschluss der Rotorproduktion die Wuchtgüte G 2,5 einhalten. Während seiner Lebensdauer darf er diese überschreiten, muss aber bis zum Ende seiner Lebensdauer die Wuchtgüte G 6,3 einhalten (Abbildung 2-13 b). Gemäß des in Abschnitt 2.2.2 erwähnten Beispiels darf die zum Ende der Rotorproduktion zulässige Massenexzentrizität von 1,59 µm somit bis zum Lebensdauerende auf 4,01 µm ansteigen. Unter Annahme eines ideal ausgewuchteten Rotors dürfen Relativbewegungen und Verformungen, die während der Lebensdauer des Rotors an seinen Komponenten auftreten können, eine Verlagerung der Trägheitsachse um nicht mehr als 4,01 µm bewirken. Weist ein neu produzierter Rotor bereits eine Massenexzentrizität von 1,59 µm auf, so darf sich die Trägheitsachse in Richtung der bereits vorliegenden Exzentrizität um maximal 2,42 µm verlagern. Dies tritt näherungsweise dann ein, wenn der Rundlauffehler des Rotors an seinen Blechpaketen dauerhaft um mehr als 5 µm steigt.

$$\vec{U}_{\Delta A} = \vec{U}_{A,1} - \vec{U}_{A,0} \quad 2-19$$

$$\vec{U}_{\Delta B} = \vec{U}_{B,1} - \vec{U}_{B,0} \quad 2-20$$

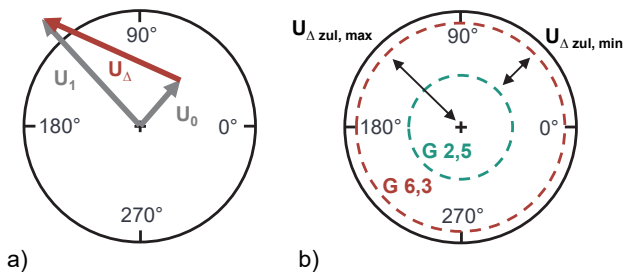


Abbildung 2-13: a) Definition einer pro Lagerebene auftretenden Unwuchtänderung und b) Grenzwerte für die zulässige Unwuchtänderung

Zusammenfassung: Sowohl die zulässige Restunwucht als auch die zulässige Unwuchtänderung stellen besonders hohe Anforderungen an Fertigungs-, Montage- und Auswuchtprozesse von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe. Setzbewegungen von wenigen µm können bereits unzulässige Unwuchtänderungen verursachen. Die Vielzahl an Komponenten eines PM-Rotors birgt zahlreiche mögliche Ursachen für Unwuchtänderungen. Der folgende Abschnitt geht daher auf die Auslegung, Fertigung und Montage der Komponenten eines PM-Rotors ein.

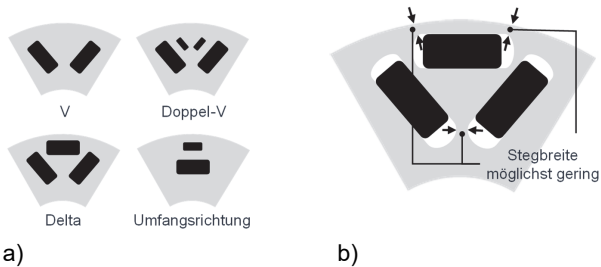
3 Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel wird zunächst erläutert, wie die in 2.1.2 beschriebenen Anforderungen die Auslegung und Konstruktion von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe beeinflussen. Entlang der Auslegungs-, Fertigungs- und Montageprozesse der Komponenten eines PM-Rotors werden daraufhin bereits bekannte Ursachen für Initialunwuchten und Unwuchtänderungen vorgestellt. Entsprechende Gegenmaßnahmen werden ebenfalls erläutert. Dabei identifizierte Defizite werden zum Forschungsbedarf dieser Arbeit zusammengefasst.

3.1 Auslegung und Konstruktion von Permanentmagnetrotoren

Die Auslegung elektrischer Maschinen erfolgt in der Regel durch eine iterative Bewertung von Erfahrungswerten, Simulationen und Validierungsergebnissen. Zielgrößen der Auslegung sind unter anderem die Steigerung des Wirkungsgrads und der Leistungsdichte sowie die Reduzierung des erforderlichen Magnetmaterials (Karle 2021, S. 53).

Je nach geforderter Ausprägung des Rotormagnetfelds, benötigter thermischer Beständigkeit und zulässigen Materialkosten können verschiedene Seltenerdmaterialien eingesetzt werden. Daraus hergestellte Permanentmagnete können innerhalb des Rotorblechpakets unterschiedlich angeordnet sein. Häufig eingesetzte Anordnungen sind die einfache oder doppelte V-Anordnung, die Delta-Anordnung sowie eine Anordnung in Umfangsrichtung (Abbildung 3-1 a) (Krings & Monissen 2020, S. 1810). Die Magnete bilden gruppenweise magnetische Pole, die in Umfangsrichtung abwechselnd als Nord- und Südpole ausgeführt sind. Bei der Gestaltung des Querschnitts des PM-Rotors ist sicherzustellen, dass erst ab dem 1,2-fachen der maximalen Drehzahl plastische Deformationen auftreten. Ein Bersten des Rotors ist erst ab dem 1,4-fachen der maximalen Drehzahl zulässig (DIN EN 60034-1 2015). Gerade an den Stegen des Querschnitts führt dies zu einem Optimierungsproblem: Der Steg zwischen zwei Magneten eines Pols soll die im Betrieb wirkenden Fliehkräfte aufnehmen, muss aber gleichzeitig als magnetische Flussbarriere dienen. Er wird daher so schmal wie möglich ausgeführt, muss aber eine ausreichend hohe Festigkeit aufweisen. Dies gilt ebenso für Stegbreiten am Außendurchmesser (Abbildung 3-1 b). Die Auslegung der Stegbreite sowie weiterer Abmessungen des Rotorblechschnitts erfolgt durch den Einsatz multiphysikalischer Simulationsmodelle, die die Auswirkungen im Betrieb wirkender mechanischer, thermischer und magnetischer Lasten berücksichtigen.



**Abbildung 3-1: a) Polweise Darstellung möglicher Magnetanordnungen,
b) Stege im Querschnitt eines PM-Rotors mit Delta-Anordnung
(in Anlehnung an (Krings & Monissen 2020, S. 1810))**

Zur Verringerung im Rotor auftretender Wirbelstromverluste ist der Magnetträger als Blechpaket ausgeführt (Binder 2012, S. 41). Dieses besteht aus aufeinander gestapelten und miteinander paketierte Elektroblechen. Sie weisen eine besonders hohe magnetische Permeabilität auf und sind beidseitig elektrisch isoliert. Zur Vermeidung einer Vorzugsrichtung des Magnetfelds, das sich durch die Magnete in den einzelnen Blechen ausbildet, wird nicht-kornorientiertes Elektroblech eingesetzt. Blechstärken industriell hergestellter PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe betragen 0,2 bis 0,3 mm (Krings & Monissen 2020, S. 1809). Die axiale Länge eines Rotorblechpakets entspricht in der Regel der Länge eines einzelnen Magneten und beträgt 20 bis 50 mm. Die Gesamtheit der Rotorblechpakete bildet das Rotorpaket (Abbildung 3-2).

Zur Herstellung von Blechpaketen wird aufgrund der hohen Produktivität in der Regel ein Stanzpaketiervorgang eingesetzt. Bei diesem werden die Einzelbleche in einem Folgeschnittwerkzeug sowohl gestanzt als auch paketierte. Die Paketierung erfolgt anhand eines Interlocks, der einen Formschluss zwischen zwei angrenzenden Einzelblechen bewirkt (Abbildung 3-2) (Imamori & Steentjes et al. 2017, S. 1). Die Bleche sind hierdurch punktuell miteinander verbunden. Soll eine vollflächige Verbindung vorliegen, kann in einem Folgeschnittwerkzeug ein thermisch unterstütztes Paketieren mittels Backlack eingesetzt werden (Kampker 2014, S. 145). Zur Kompensation ungleichmäßiger Blechstärken werden die Einzelbleche in der Regel während des Paketiervorgangs zueinander verdreht. Der kleinstmögliche Verdrehwinkel ist hierbei in der Regel der Winkel zwischen zwei magnetischen Polen des Rotors. Bei einem Rotor mit vier Polpaaren liegt dieser bei $360^\circ / (2 \cdot 4) = 45^\circ$.

Aufgrund des spröden Materialverhaltens der Seltenerdminerale und der Empfindlichkeit ihrer Beschichtung wird in der Regel ein Mindestfügespalt von 100 µm zwischen

Magneten und Magnettasche des Blechpakets gewählt⁸. Zur Umsetzung einer stoffschlüssigen Magnetfixierung wird dieser Fügespalt bspw. in einem Transfermolding-Prozess mit einer duroplastischen Vergussmasse gefüllt. Alternativ kann eine kraftschlüssige, federnde Fixierung umgesetzt werden (Abbildung 3-2). Diese kann durch ein Federelement oder die Integration von Blattfedern in eine Teilmenge der Bleche eines Blechpakets erreicht werden (Bachmeier & Klett et al. 2014; Ince & Khurshid et al. 2011; Klatte & Kupke et al. 2011; Gilde & Blaes 2020) (Wößner & Gürbüz et al. 2022, S. 670). Bewegliche Werkzeugeinsätze, die innerhalb desselben Werkzeugs das Stanzen zweier unterschiedlicher Blechschnitte ermöglichen, erlauben die Integration dieser Blattfedern. Eine Federfixierung begünstigt zum Ende der Lebensdauer des PM-Rotors die Demontage und das sortenreine Recycling seiner Seltenerdmagnete (Li & Kedous-Lebouc et al. 2019, S. 9).

Die Welle-Nabe-Verbindung (WNV) zwischen Blechpaket und Rotorwelle enthält in der Regel einen kraftschlüssigen Anteil, der das maximale Drehmoment des Rotors übertragen kann. Über die zugehörige Kontaktfläche werden die Blechpakete zur Rotorwelle zentriert. Zudem stellt die Kontaktfläche eine Wärmeabfuhr von den Blechpaketen zur

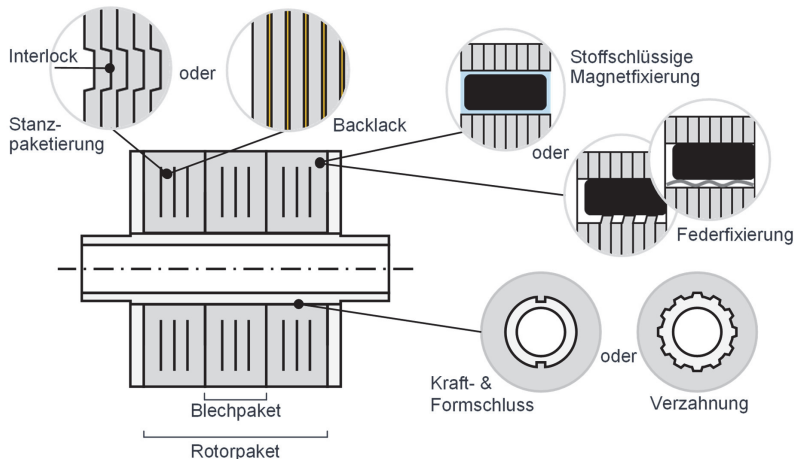


Abbildung 3-2: Auswahl konstruktiver Alternativen bei der Gestaltung von Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

⁸ Sumitomo Bakelite Co., Ltd., *Special Transfer Molding Compound for Electric Vehicle Motor (IPM) Magnet Fixing*. https://www.sumibe.co.jp/english/solution/mobility/electric_vehicle/ipm.html [03.10.2023]

Rotorwelle sicher. Zur Steigerung der Ausfallsicherheit wird die WNV üblicherweise um einen formschlüssigen Anteil ergänzt. Dieser kann Passfedern umfassen, die in den Querschnitt des Blechpakets integriert sind (Abbildung 3-2). Auch Kombinationen aus Kraft- und Formschluss finden durch Steckverzahnungen oder Rändelungen des Blechpakets und/oder der Rotorwelle Anwendung (Suchý & Leidich et al. 2018, S. 1).

Zur Verringerung der Rotormasse sowie zur Integration einer Rotorinnenkühlung ist die Rotorwelle in der Regel als Hohlwelle ausgeführt (Kampker 2014, S. 157). Möglichst gleichbleibend dünne Wandstärken werden dabei durch ein- oder mehrteilige Rotorwellen erreicht, deren Abschnitte umformend und spanend hergestellt werden (Wößner & Gürbüz et al. 2022, S. 669). Neben der Lagerung des gesamten Rotors übernimmt die Rotorwelle die Übertragung des Drehmoments an das Getriebe. Dies erfolgt in der Regel über eine koaxiale Innen- oder Außenverzahnung an der Abtriebsseite (A-Seite) der Rotorwelle. An der gegenüberliegenden B-Seite wird ein Rotorlagegeber zur fortlaufenden Erfassung der Winkelstellung des Rotors angebracht. Bei Einsatz einer Rotorinnenkühlung befindet sich auf der B-Seite zusätzlich eine Dichtung. Diese soll den Austritt von Kühlflüssigkeit verhindern.

Der subtraktive Unwuchtausgleich erfolgt in der Regel an Wuchtscheiben, die beidseitig an das Rotorpaket angrenzen. Zur Vermeidung einer Beeinflussung des Rotormagnetfelds wird für die Wuchtscheiben eine Aluminium- oder Edelstahllegierung eingesetzt. Die Wuchtscheiben können gleichzeitig als axiale Sicherung der Blechpakete eingesetzt werden und bei Bedarf mit Zugstäben axial miteinander verbunden werden. Mit einer axialen Länge von jeweils 5 bis 20 mm steigern sie allerdings die Rotormasse um bis zu 10 % (Wößner & Stoll et al. 2018, S. 207).

Zusammenfassung: Der PM-Rotor eines elektrischen Traktionsantriebs besteht aus einer Vielzahl an Komponenten. Die Einzelbleche der Blechpakete sind nur punktuell oder stoffschlüssig miteinander verbunden. Bei der Fixierung der Magnete sind Fügespalte vorzusehen. Daraus folgende Unwuchtbeiträge werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

3.2 Unwuchtbeiträge in der Produktion von Permanentmagnetrotoren

Die Montage der in Abschnitt 3.1 vorgestellten Rotorkomponenten kann in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt werden. Die Reihenfolgen unterscheiden sich hauptsächlich im Zeitpunkt der Fixierung der Magnete sowie deren Magnetisierung (Kampker 2014, S. 166). Für die automatisierte Montage von Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe wird in der Regel die in Abbildung 3-3 dargestellte Reihenfolge gewählt. Die Magnetisierung des Rotors erfolgt hierbei erst zum Ende der Rotormontage, um die Magnetmontage zu vereinfachen sowie die Anzahl der Prozesse mit Stör- und Gefährdungspotential des Rotormagnetfelds zu reduzieren (Colledani & Coupek et al. 2018, S. 13). Die folgenden Abschnitte fassen die entlang der Komponentenfertigung und Rotormontage bekannten Unwuchtbeiträge zusammen.

3.2.1 Wellenfertigung

Einen großen Einfluss auf die Wellenunwucht besitzen Koaxialitätsfehler der jeweiligen Wellenabschnitte (Abbildung 3-4) (Peter 2018, S. 31). Bei einteiligen Wellen können sie während der spanenden Bearbeitung durch die radiale Nachgiebigkeit der Rotorwelle verursacht werden. Bei mehrteiligen Wellen resultieren sie aus Ausrichtungsfehlern, die beim Fügevorgang vorliegen. Sie führen darüber hinaus bei der späteren Montage der Welle-Nabe-Verbindung zu einem exzentrischen Sitz der Blechpakete. Hieraus

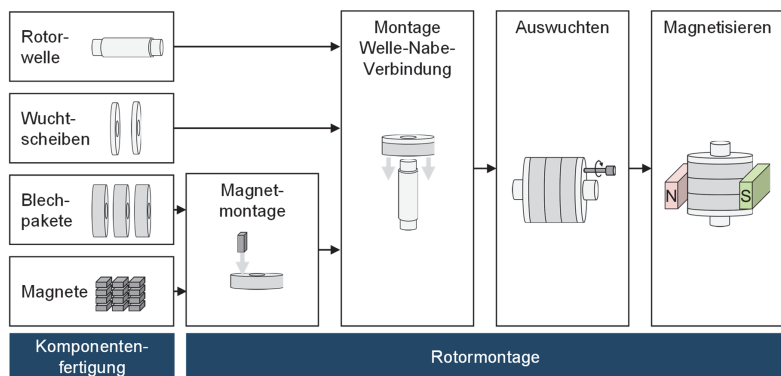


Abbildung 3-3: Prozesskette zur Produktion von Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe

resultiert ein zusätzlicher Unwuchtbeitrag, der sich aus dem Produkt der exzentrischen Lage und der Masse der Blechpakete ergibt. Dieser Unwuchtbeitrag läge auch dann vor, wenn die einzelnen Blechpakete aufgrund ideal massensymmetrischer Fertigung und Magnetmontage keine eigene Unwucht aufweisen würden. Die Masse der Blechpakete inklusive der darin montierten Magnete ist zwangsläufig vorhanden. Sie multipliziert sich mit der exzentrischen Lage zu einem Unwuchtbeitrag. Es ergibt sich zudem ein erhöhter Rundlauffehler des Rotors, der sich wiederum negativ auf die Homogenität des Luftspalts zwischen Rotor und Stator auswirkt (Weidenhiller 2013, S. 7). Es ist somit auf eine möglichst koaxiale Ausrichtung der Wellenabschnitte zu achten. Zur Einhaltung geforderter Koaxialitäten ist meist ein Schleifen der Lagerstellen sowie des Bereichs erforderlich, auf dem die Blechpakete montiert werden (Kampker 2014, S. 157) (Hofmann & Masuch et al. 2016, S. 30). Nur so können Toleranzklassen von IT6 und kleiner erreicht werden.

In (Peter 2018, S. 124–125) an Rotorwellen durchgeführte Unwuchtmessungen zeigen auf, dass deren Unwucht pro Lagerebene mit durchschnittlich 58,5 gmm das 1,6-fache der für den gesamten Rotor zulässigen Unwucht betragen kann. In diesem Fall verursacht hauptsächlich eine zentrisch verlaufende Tieflochbohrung die Unwucht der Rotorwellen. Das Drehen der initialen Kontur sowie die Herstellung der Steckverzahnung stellen hingegen nur geringfügige Unwuchtbeiträge dar. Rotorwellen können somit trotz einer massensymmetrischen Konstruktion einen bedeutenden Anteil der Initialunwucht eines Rotors darstellen.

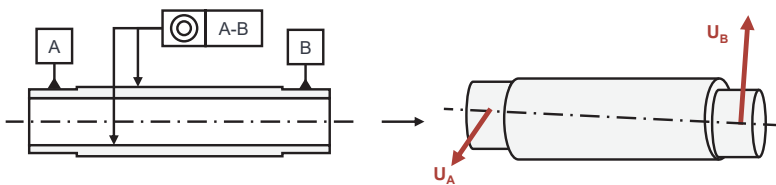


Abbildung 3-4: Fertigungsabweichungen mit besonders starkem Einfluss auf die Unwucht einer Rotorwelle

3.2.2 Blechpaketherstellung

Abweichungen in der relativen Lage der einzelnen Stufen des Folgeschnittwerkzeugs sowie Verschleiß des Werkzeugs können während des Stanzprozesses zu Lage-Abweichungen der Ausschnitte der Einzelbleche führen (Abbildung 3-5) (Kraemer & Stoll et al. 2015, S. 299). Der Stanzprozess hinterlässt zudem im Umfeld der Schnittkanten

plastische Verformungen, die die magnetischen und mechanischen Eigenschaften des Elektroblechs beeinträchtigen (Leuning & Steentjes et al. 2018, S. 5). Dies ist insbesondere bei stumpfen Stanzwerkzeugen der Fall. Zudem verbleibt an jedem Einzelblech nach dem Stanzprozess ein Grat, der einen elektrischen Kurzschluss zu angrenzenden Blechen bewirken kann (Kraemer & Veigel et al. 2016, S. 183). Dennoch werden alternative Trennverfahren wie das Laserschneiden aufgrund vergleichsweise hoher Schnittzeiten bisher nur im Bereich der Prototypenfertigung eingesetzt.

Nach der Paketierung mittels Interlock können zwischen den Einzelblechen Spalte verbleiben (Abbildung 3-5). Diese sind insbesondere dort ausgeprägt, wo Einzelbleche im Paketiervorgang zueinander verdreht wurden. Eine Verdrehung der Einzelbleche um bspw. 45° ist allerdings erforderlich, um trotz ungleichmäßiger Blechstärken ein Blechpaket mit möglichst geringem Planlaufehler herzustellen. Ein Rundlauffehler der hierfür im Stanzpaketierwerkzeug integrierten Verdreheinheit bewirkt einen radialen Versatz zwischen den Einzelblechen. Zudem reduziert jede Verdrehbewegung die Produktivität des Paketierprozesses, da sie nur langsamer als die Stanzbewegung durchgeführt werden kann. Einzelbleche werden daher in der Regel gruppenweise verdreht paketiert. Im Falle einer Paketierung mittels Backlacks sind aufgrund der vollflächigen stoffschlüssigen Verbindung der Einzelbleche keine Spalte zu erwarten. Ein weitergehender Vergleich dieser und weiterer Paketierv Verfahren kann (Ziegler & Brandl et al. 2021) entnommen werden.

Insbesondere bei stanzpaketierten Blechpaketen muss bei nachfolgenden Handhabungs- und Fügevorgängen in axialer Richtung ein stark nachgiebiges Verhalten berücksichtigt werden. Dieses ist in den Spalten begründet, die nach dem Stanzpaketieren zwischen den Einzelblechen verbleiben. Zudem bewirken Walz- und Beschichtungsprozesse, die bei der Herstellung des Elektroblechs eingesetzt wurden, ein anisotropes, anelastisches Materialverhalten des Rotorblechpakets (Arshad & Ryckebush et al. 2007, S. 101) (Luchscheider 2015, S. 32). Bei anelastischem Materialverhalten hängen Verzerrungen nicht alleinig von der aktuellen mechanischen Belastung, sondern auch von der Belastungshistorie ab. In der Regel kehrt ein anelastischer Körper nach Aufhebung der mechanischen Belastung nicht in den vorherigen, unverformten Zustand zurück. Nur unterhalb definierter Grenzwerte weisen anelastische Körper ein nahezu elastisches Materialverhalten auf (Mang & Hofstetter 2018, S. 69).

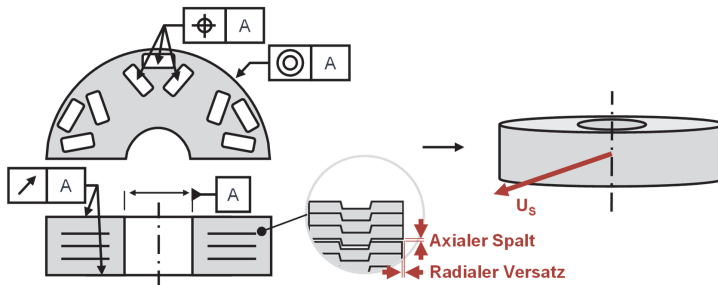


Abbildung 3-5: Fertigungsabweichungen mit besonders starkem Einfluss auf die Unwucht eines Rotorblechpakets

Die oben genannten Fertigungsabweichungen führen zu einer Unwucht des Rotorblechpakets. Auswirkungen des gewählten Trenn- und Paketierprozesses von Rotorblechpaketen auf deren Unwucht wurden bisher nicht systematisch untersucht. Nur in vereinzelten Arbeiten erfolgt die Quantifizierung der initialen statischen Unwucht einzelner Rotorblechpakete. In (Hofmann & Masuch et al. 2016; Wößner & Uhl et al. 2019; Masuch & Lindenfels et al. 2019) beträgt sie bis zu 20 gmm und überschreitet in der Regel die für den Rotor zulässige Unwucht. Auch in (Epskamp 2020, S. 150) übersteigt die dynamische Unwucht des druckgegossenen Kurzschlussläufers einer Asynchronmaschine mit bis zu 274 gmm deutlich die pro Lagerebene zulässige Rotorunwucht. Diese beträgt aufgrund der Wuchtgüte G 1,0, der Rotormasse 9,5 kg und der maximalen Drehzahl 30.000 min^{-1} lediglich 4 gmm. Unwuchten der Rotorblechpakete wirken sich somit aufgrund ihrer Fertigungsabweichungen maßgeblich auf die Initialunwucht des Rotors aus.

3.2.3 Magnetherstellung

Die Stärke der Magnetisierung eines Magneten kann über seine Remanenzflussdichte beschrieben werden. Sie ist ein Maß für die messbaren Kräfte, die an einem Magneten nach seiner Magnetisierung verbleiben. Die Koerzitivfeldstärke beschreibt die Stärke des magnetischen Gegenfeldes welches erforderlich ist, um einen Magneten vollständig zu entmagnetisieren (Binder 2012, S. 22). Da Permanentmagnete aus Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) selbst bei Temperaturen von bis zu 180°C hohe Remanenzflussdichten und Koerzitivfeldstärken erreichen, werden sie in elektrischen Traktionsantrieben bevorzugt eingesetzt (Bianchi & Bolognani et al. 2004, S. 1577). Entlang der Sinter-, Säge-, Schleif- und Beschichtungsprozesse der quaderförmigen

Permanentmagnete können Abweichungen in deren Homogenität, Abmessungen und Masse auftreten (Abbildung 3-6). Aus Masseabweichungen folgen ungleiche Unwuchtbeiträge der einzelnen Magnete (Simon-Sempere & Burgos-Payan et al. 2013, S. 5522) (Peter 2018, S. 107). In (Peter 2018, S. 107) führen die Magnete mit durchschnittlich 9,2 gmm zu höheren Unwuchtbeiträgen als Unwuchten der durch zwei-komponentigen Spritzguss hergestellten Magnetträger (durchschnittlich 6,5 gmm). Ein Wiegen der Magnete und deren geeignete Anordnung innerhalb der Magnetträger bzw. der Blechpakete ermöglicht eine unwuchtminimale Montage: Die Unwucht des Magnetträgers bzw. des Blechpakets kann durch die Magnetmontage um bis zu 41 % reduziert werden (Wößner & Stoll et al. 2018, S. 2) (Peter 2018, S. 128). Dieses Verhältnis ist allerdings stark abhängig von der statistischen Verteilung der Magnetmassen, der Unwuchten der Magnetträger bzw. der Blechpakete sowie des Fügspiels der Magnete innerhalb der Magnettaschen.

Abweichungen in der Magnetisierung der Magnete, die in der Regel zum Ende der Rotorproduktion erfolgt, führen zu Inhomogenitäten des Rotormagnetfelds. Inhomogenitäten wirken sich negativ auf das Rastmoment aus. Dieses bewirkt wiederum Schwankungen des Drehmoments des Antriebs und beeinträchtigt folglich die Laufruhe des elektrischen Antriebs (Colledani & Coupek et al. 2018, S. 14) (Meyer & Heyder et al. 2016, S. 356) .

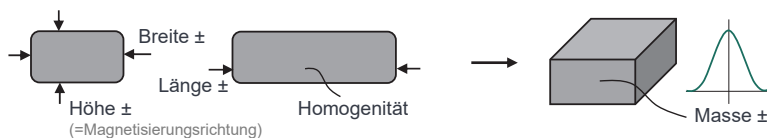


Abbildung 3-6: Fertigungsabweichungen führen zu einer statistisch verteilten Magnetmasse

3.2.4 Magnetmontage und -fixierung

Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben werden die Magnete im unmagnetisierten Zustand montiert. Ist eine stoffschlüssige Magnetfixierung der Magnete vorgesehen, erfolgt zunächst ein kraftfreies Einlegen der Magnete in die Magnettaschen. Dies kann durch das robotergestützte Einlegen einzelner Magnete (Franke & Hofmann et al. 2015, S. 727–728) oder das gleichzeitige Einlegen mehrerer Magnete über eine Fügemaske umgesetzt werden (Schmöz 2020). Ein häufig eingesetztes Verfahren zur stoffschlüssigen Fixierung der Magnete ist das Transfermolding. Bei diesem wird der Fügespalt

zwischen Magnet und Magnettaschen mit einer duroplastischen Vergussmasse gefüllt (Abbildung 3-7 a). Werden die Magnete federnd fixiert und sind die Federelemente Bestandteil des Blechpakets, müssen die Magnete zunächst bis zum ersten Federelement eingelegt werden. Anschließend erfolgt ein Einpressen des Magneten. Hierbei werden die Federelemente, die durch hervorstehende Laschen einer Teilmenge der Einzelbleche gestaltet sind, zurückgebogen (Abbildung 3-7 b). Aufgrund des spröden Materialverhaltens der Permanentmagnete sowie ihrer kratzempfindlichen Beschichtung ist die mechanische Belastung der Magnete bei allen Handhabungs- und Montageaufgaben auf ein Minimum zu reduzieren.

Unabhängig von der Art der Magnetfixierung treten bei der Magnetmontage Abweichungen der Magnete von ihrer Soll-Lage auf. Der Mindestfügespalt, maßliche Abweichungen der Magnete und der Magnettasche sowie Fehler bei der Ausrichtung der Magnete vor dem Einlegen oder Einpressen in die Magnettaschen beeinflussen diese Lage-Abweichungen. Inhomogenitäten der Vergussmasse oder des Klebstoffs, der für eine stoffschlüssige Magnetfixierung eingesetzt wird, beeinflussen ebenfalls den Unwuchtzustand des Blechpakets mit darin fixierten Magneten (Kampker 2014, S. 167). Eine geeignete Leitung der Vergussmasse durch Kavitäten des Blechpakets kann eingesetzt werden, um die Magnete unmittelbar vor deren Fixierung massensymmetrisch zu positionieren (Matsubayashi & Mabu et al. 2014; Sameshima & Ono et al. 2018; Fröhlich & Heise 2020). Hierdurch soll eine Reduzierung der Initialunwucht und des Rastmoments des Rotors erreicht werden. Zudem können Masseabweichungen der Magnete (siehe 3.2.3) gezielt eingesetzt werden, um Unwuchten des Blechpakets zumindest anteilig zu reduzieren. Lage-Abweichungen der Magnete innerhalb der Magnettaschen führen allerdings zu Differenzen zwischen der gewünschten und der erreichten resultierenden Unwucht des Blechpakets mit darin fixierten Magneten. In (Wößner & Uhl et al. 2019, S. 3) wird durch die Montage und Demontage derselben Magnete eines Blechpakets eine Standardunsicherheit von $6\text{ }\mu\text{m}$ für die Vorhersage der Lage des Massenmittelpunkts der Magnete ermittelt. Allein Montageabweichungen der Magnete übersteigen somit die für die Wuchtgüte G 2,5 zulässige Massenexzentrizität von $1,59\text{ }\mu\text{m}$ (wenn max. Drehzahl: 15.000 min^{-1}). Im Allgemeinen muss angenommen werden, dass die Unwucht des Blechpakets $U_{S, BP}$ sowie der Unwuchtbeitrag der Magnete $U_{S, mag}$ zu gleichen Teilen die resultierende Unwucht des Blechpakets mit darin fixierten Magneten $U_{S, res}$ beeinflussen (Abbildung 3-7 c).

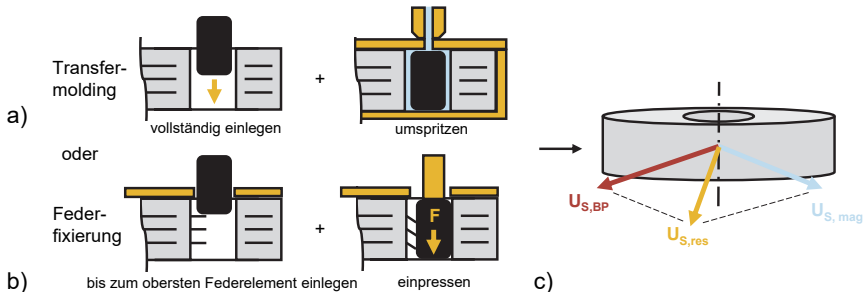


Abbildung 3-7: Montage und Fixierung vergrabener Magnete: a) Transfermolding als Beispiel für Stoffschluss, b) Federfixierung als Kraftschluss, c) resultierende statische Unwucht

3.2.5 Welle-Nabe-Verbindung

Das für die Drehmomentübertragung zwischen Welle und Blechpaketen benötigte Übermaß kann ein thermisch unterstütztes Fügen der Welle-Nabe-Verbindung (WNV) erfordern (Epskamp 2020, S. 143). Hierbei wird das Rotorpaket kurzzeitig induktiv erwärmt und auf die Rotorwelle aufgeschraubt. Bei Bedarf kann die Rotorwelle zusätzlich durch flüssigen Stickstoff abgekühlt werden.

Durch das Fügen der WNV überlagern sich die Unwuchtbeiträge der Blechpakete, Magnete, Wuchtscheiben und Rotorwelle. Sie besitzen somit einen direkten Unwuchtbeitrag. Ein indirekter Unwuchtbeitrag ergibt sich zudem aus einer exzentrischen Lage der Blechpakete und Wuchtscheiben auf der Rotorwelle. Weist eine Rotorwelle in Abschnitt, auf dem die Blechpakete und Wuchtscheiben montiert sind, einen Rundlauffehler von bspw. 10 μm auf, so ist dieser näherungsweise um 5 μm zur Rotationsachse exzentrisch. Selbst unwuchtfreie Blechpakete und Wuchtscheiben bewirken dann durch ihre Masse eine Massenexzentrizität des gesamten Rotors von nahezu 5 μm . Bezogen auf das Rechenbeispiel aus Abschnitt 2.2.2 entspricht dieser indirekte Unwuchtbeitrag bereits dem dreifachen der maximal zulässigen Unwucht.

Die in (Wößner & Uhl et al. 2019, S. 4) ermittelte Standardunsicherheit von 0,74 μm für die radiale Positionierung eines Blechpakets auf die Rotorwelle ist dagegen vergleichsweise gering. Allerdings wird ein besonders hoher Unwuchtbeitrag eines zufälligen Planlauffehlers festgestellt, der beim Aufpressen des Blechpakets auf die Rotorwelle erzeugt wird. Die Ursache hierfür wird in einem Winkelfehler der Fügeachse zur Auflage des Blechpakets vermutet. Allein der hierdurch erzeugte Planlauffehler führt bereits

zum Überschreiten der Wuchtgüte G 2,5. Soll dies nicht der Fall sein, müsste der Winkelfehler der Fügeachse von $0,15^\circ$ auf maximal $0,019^\circ$ reduziert werden. Eine Wuchtgüte von G 6,3 wurde durch eine unwuchtminimale Rotormontage hingegen in (Peter 2018) und (Hofmann & Masuch et al. 2016) erreicht. Bei der Montage der WNV zu berücksichtigende Unwuchtbeiträge sind somit die exzentrische Lage der Blechpakete und Wuchtscheiben auf der Rotorwelle sowie bei der Montage erzeugte Planlaufabweichungen (Abbildung 3-8). Insbesondere letztere können zufällige Abweichungen aufweisen und dazu führen, dass durch unwuchtminimale Rotormontage zwar die Wuchtgüte G 6,3, aber nicht die Wuchtgüte G 2,5 erreicht wird.

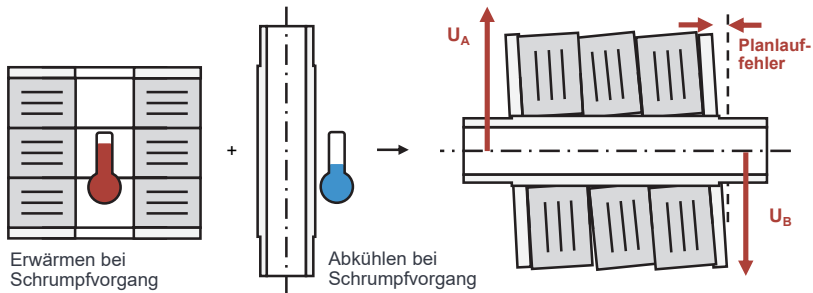


Abbildung 3-8: Abweichungen bei der Montage der Welle-Nabe-Verbindung führen zu unwuchtigem Zustand des Rotors

3.2.6 Auswuchten

Aufgrund der zuvor vorgestellten Fertigungs- und Montageabweichungen ist zur Einhaltung der geforderten Wuchtgüte für jeden Rotor ein individueller Auswuchtprozess erforderlich. Für PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe wird in der Regel ein subtraktives Auswuchten eingesetzt (Masuch & Lindenfels et al. 2019, S. 1) (Wößner & Stoll et al. 2018, S. 207). Positionierfehler bei der Übergabe des Rotors von der Unwuchtmessung an den Unwuchtausgleich erhöhen die nach dem Auswuchten verbleibende Restunwucht. Darüber hinaus muss der Verschleiß des für den Unwuchtausgleich eingesetzten Bohrers anlagentechnisch kompensiert werden, um einen präzisen Masseabtrag sicherzustellen. Im Bohrprozess entstehende Späne müssen während des Bearbeitungsprozesses abgesaugt werden (Abbildung 3-9). Je nach Höhe der Initialunwucht des Rotors sowie der Anlagentechnik zur Messung und zum Ausgleich der Rotorunwucht können zwei bis drei Unwuchtausgleiche erforderlich sein, bis ein Rotor die Wuchtgüte G 2,5 erreicht. Muss während des Betriebs mit einer Änderung der

Rotorunwucht gerechnet werden, so wird diesem Auswuchtschritt ein Vorwuchten und Schleudern des Rotors vorgelagert. Für den Schleuderprozess industriell eingesetzte Schleuderstände werden in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt.

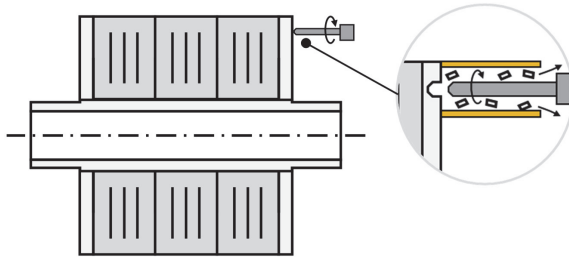


Abbildung 3-9: Für das subtraktive Auswuchten erforderliche Absaugung

3.2.7 Magnetisieren

Fertigungstoleranzen der Magnetisierungsspulen sowie Ausrichtungsfehler des Rotors in der Magnetisierungsspule können ein inhomogenes Rotormagnetfeld und somit ein höheres Rastmoment, stärkere Vibrationen und eine geringere Lebensdauer des Rotors hervorrufen (Galfarsoro & McCloskey et al. 2022, S. 708). (Meyer & Heyder et al. 2016) und (Colledani & Coupek et al. 2018) erarbeiteten Ansätze zur Kompensation magnetischer Abweichungen einzelner Magnete sowie ganzer Blechpakete. Unter Einsatz einer selektiven Montage können sie jeweils die Homogenität des Rotormagnetfelds verbessern, erfordern allerdings die Montage bereits magnetisierter Magnete oder von Blechpaketen mit magnetisierten Magneten. PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe werden allerdings bevorzugt nach ihrem Zusammenbau magnetisiert.

Zusammenhänge zwischen Abweichungen der magnetischen Eigenschaften des Rotors und dem Betriebsverhalten des elektrischen Antriebs sind für jedes Rotordesign einzeln zu bewerten (Galfarsoro & McCloskey et al. 2022, S. 708). Die Definition von Qualitätsmerkmalen, die der Magnetisierungsprozess einzuhalten hat, muss somit in der Regel experimentell erfolgen.

Zusammenfassung: Die Unwuchtbeiträge der Fertigungs- und Montageprozesse eines PM-Rotors addieren sich zu einer Initialunwucht, die die zulässige Unwucht in der Regel deutlich überschreitet. Es liegen sowohl direkte als auch indirekte Unwuchtbeiträge vor. Ein subtraktives Auswuchten reduziert die Rotorunwucht auf die Wuchtgüte G 2,5.

3.3 Unwuchtänderungen im Betrieb von Permanentmagnetrotoren

Der folgende Abschnitt beschreibt zunächst das im Betrieb des PM-Rotors eines elektrischen Traktionsantriebs wirkende Kollektiv mechanischer, thermischer und magnetischer Lasten. Daraufhin werden in Abschnitt 3.3.2 bereits bekannte Besonderheiten des mechanischen Verhaltens von PM-Rotoren beschrieben und ihre Bedeutung für Ursachen von Unwuchtänderungen diskutiert. Der Abschnitt 3.3.3 stellt bisher eingesezte Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen vor.

3.3.1 Belastung des Rotorblechpakets

Die Interaktion des Rotor- und Statormagnetfelds bewirkt im Luftspalt eine Tangentialkraft, die wiederum ein Drehmoment erzeugt und den Rotor in Rotation versetzt (Binder 2012, S. 196). Entsprechend des an der Welle anliegenden Lastmoments werden die Welle und die Blechpakete unter Torsion belastet. Gleichzeitig führen unter Rotation wirkende Fliehkräfte zu hauptsächlich radial ausgerichteten Zugspannungen innerhalb des Blechpakets (Abbildung 3-10). Diese wirken Druckspannungen der Welle-Nabe-Verbindung (WNV) entgegen, die am Innendurchmesser des Blechpakets vorliegen. Eine fliehkraftbedingte Aufweitung des Blechpakets führt somit zu einer Verringerung des Fugendrucks der WNV und somit zu einer Reduzierung des übertragbaren Drehmoments.

Vom Stator abgestrahlte Wärme, Luftreibung innerhalb des Luftspalts sowie Wirbelstromverluste innerhalb der Magnete und der Blechpakete bewirken zudem eine thermische Belastung (Abbildung 3-10). Rotortemperaturen können bis zu 180 °C betragen und sind bei der Auslegung der zulässigen mechanischen Belastung der Rotorkomponenten zu berücksichtigen. Das Magnetmaterial muss derart gewählt werden, dass thermische Lasten nicht zu einer dauerhaften Entmagnetisierung der Magnete führen. Ungleiche thermische Ausdehnungskoeffizienten der Rotorkomponenten rufen zudem thermisch bedingte Spannungen und Verformungen hervor (Shen & Qin et al. 2018, S. 6). Dies ist insbesondere beim Einsatz einer stoffschlüssigen Magnetfixierung der Fall, deren Polymeranteil andere thermische Ausdehnungskoeffizienten als metallische Rotorkomponenten aufweist.

Das dauerhafte Magnetfeld der Magnete ist im Betrieb dem magnetischen Feld des Stators ausgesetzt (Abbildung 3-10). Um eine dauerhafte Entmagnetisierung der

Magnete aufgrund des Gegenfelds des Stators zu vermeiden, müssen Magnete mit einer ausreichend hohen Koerzitivfeldstärke gewählt werden (Binder 2012, S. 611). Eine ungleichmäßige Magnetisierung des Rotors sowie ein nicht konstanter Luftspalt bewirken darüber hinaus eine magnetische Unwucht des Rotors. Sie wird auch als einseitiger magnetischer Zug bezeichnet und erzeugt entlang des Luftspalts einen ungleichmäßigen Verlauf der zwischen Rotor und Stator wirkenden Anziehungskräfte. Gemeinsam mit der Restunwucht des Rotors beeinflusst sie das Schwingungsverhalten des elektrischen Traktionsantriebs (Clappier 2021, S. 105).

Unter Berücksichtigung des oben beschriebenen Kollektivs aus mechanischen, thermischen und magnetischen Lasten wird das Rotorblechpaket derart ausgelegt, dass an diesem erst beim 1,2-fachen der maximalen Drehzahl plastische Verformungen auftreten (DIN EN 60034-1 2015). Gleichzeitig müssen Stege des Blechschnitts, die als magnetische Flussbarrieren wirken sollen, möglichst schmal ausgeführt sein. Zudem dürfen elastische Aufweitungen keinesfalls die Breite des Luftspalts zwischen Rotor und Stator übersteigen. Entsprechend des in Abbildung 3-10 dargestellten Beispiels ergibt dies bei der Drehzahl von $1,2 \cdot 15.000 \text{ min}^{-1} = 18.000 \text{ min}^{-1}$ und der Streckgrenze 420 MPa (Elektroblech NO30-1500H) eine Stegbreite von 0,8 mm. Dieser überträgt anteilig die bei der maximalen Drehzahl von 15.000 min^{-1} an den drei Magneten eines Pols insgesamt wirkende Fliehkraft von 994 N (3-1 und 3-2). Der aus möglichst dünnen Stegbreiten bestehende **Blechschnitt ist somit besonders hohen mechanischen Belastungen** ausgesetzt.

$$r \cdot m \cdot \left(\frac{n \cdot 2\pi}{60} \right)^2 = F_z \quad 3-1$$

$$(2 \cdot 37,63 + 45,08) \text{ mm} \cdot 3,349 \text{ g} \cdot \left(\frac{15.000 \frac{1}{s} \cdot 2\pi}{60} \right)^2 \approx 994 \text{ N} \quad 3-2$$

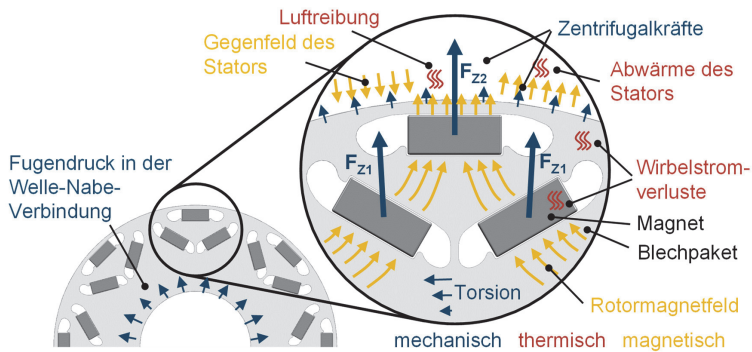


Abbildung 3-10: Am Blechpaket wirkendes Lastkollektiv aus mechanischen, thermischen und magnetischen Lasten

3.3.2 Mögliche Verformungen und Relativbewegungen

Es folgt eine Zusammenfassung der Verformungen und Relativbewegungen, die sich aus dem zuvor vorgestellten Lastkollektiv ergeben können. Die Zusammenfassung erfolgt vorrangig für Blechpakete, da einerseits an ihnen das gesamte Lastkollektiv wirkt und sie andererseits durch ihren hohen Anteil an der Rotormasse eine zentrale Bedeutung für die Unwucht des Rotors und ihre Veränderung einnehmen. Es wird jeweils diskutiert, inwiefern unsymmetrische Verformungen und Relativbewegungen zu Veränderungen der Rotorunwucht führen können.

3.3.2.1 Verformungen des Blechpakets

Bisherige Veröffentlichungen haben vorrangig die radiale elastische und plastische Aufweitung von Rotorblechpaketen unter Einwirkung einer Fliehkraft bewertet. So wird in (G. K. Sakkas & A. G. Kladas 2022, S. 11–12) und (Chai & Wu et al. 2019, S. 2–4) die Auswirkung einer elastischen Aufweitung des Blechpakets auf den zum Stator verbleibenden Luftspalt untersucht. Es erfolgt allerdings keine Validierung der Berechnungsergebnisse und keine Berücksichtigung einer möglicherweise unsymmetrischen Aufweitung des Blechpakets.

(Hu & Li et al. 2021, S. 1183) führen allerdings eine Validierung durch, indem ein PM-Rotor bei seiner maximalen Drehzahl von 30.000 min^{-1} geschleudert wird. Der Außendurchmesser des Rotors wird jeweils vor und nach dem Schleuderversuch erfasst. Die nach dem Schleuderversuch beobachtete plastische Aufweitung von $33 \text{ }\mu\text{m}$ wird nicht

auf ihre Symmetrie und ihre Auswirkung auf die Rotorunwucht überprüft. Bei der gewählten Wuchtgüte G 0,63 würde eine radiale Verlagerung der Trägheitsachse von $0,2\text{ }\mu\text{m}$ bereits ein Überschreiten der Wuchtgüte bewirken. Eine Unwuchtmessung wird zwar vor, aber nicht nach dem Schleuderversuch durchgeführt. Eine Änderung der Rotorunwucht wurde möglicherweise nicht festgestellt bzw. messtechnisch überprüft, weil der Rotor vertikal hängend geschleudert wurde. In diesem Fall zentriert sich der Rotor prinzipbedingt um seine eigene Trägheitsachse, wodurch sie stets mit der Rotationsachse übereinstimmt und unwuchtbedingte Fliehkräfte minimiert werden.

In (Karthaus & Hameyer 2017, S. 2) wird während eines Schleuderprozesses bei bis zu 10.000 min^{-1} die radiale Aufweitung einzelner Rotorblechpakete gemessen. Wie erwartet wird deutlich, dass an den magnetischen Polen deutlich stärkere Aufweitungen auftreten als zwischen den Polen. Dies liegt darin begründet, dass das Blechpaket an den Polen aufgrund dünner Stegbreiten eine reduzierte radiale Steifigkeit aufweist. Die Verklebung der Magnete bewirkt eine Versteifung des Blechpakets gegenüber seiner radialen Aufweitung. Der Betrag der Aufweitung verhält sich wie erwartet proportional zum Quadrat der Schleuderdrehzahl. Eine zyklische Belastung mit bis zu 10.000 Lastzyklen zeigt keine messbare Änderung der Aufweitung des Blechpakets. Es erfolgt keine Bewertung, inwiefern die am Blechpaket mit verklebten Magneten gemessene Aufweitung von $4\text{ }\mu\text{m}$ symmetrisch um die Rotationsachse verteilt ist. Es werden keine Ergebnisse von Planlauf- oder Unwuchtmessungen der Blechpakete beschrieben.

Die in (Gerlach & Zajonc et al. 2021, S. 106) an einem PM-Rotor mit Oberflächenmagneten bei bis zu 55.000 min^{-1} gemessene Aufweitung legt eine unsymmetrische Verteilung bezüglich der Rotationsachse nahe (Abbildung 3-11). Ab einer Schleuderdrehzahl von 40.000 min^{-1} – und somit unterhalb der maximalen Drehzahl von 50.000 min^{-1} – tritt eine plastische Aufweitung von $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ auf. Die Ursache der plastischen Verformungen wird einerseits in Setzbewegungen der Magnete und deren Verklebung unterhalb der Carbon-Bandagierung sowie andererseits im nichtlinear-elastischen Verhalten des Blechpakets vermutet. Ein vergleichbares Verhalten wird am Rotor einer Asynchronmaschine beobachtet, der in einem Schleuderversuch ab 20.000 min^{-1} eine plastische Aufweitung aufweist. Auch hier wird in der polaren Darstellung der Messergebnisse deutlich, dass sich die plastische Aufweitung unsymmetrisch um die Rotationsachse verteilt. Eine daraus folgende **Unwuchtänderung wird in der Arbeit vermutet, aber nicht messtechnisch überprüft**. Beide Rotoren wurden vertikal hängend geschleudert. Die in (Loos 2019, S. 64) festgestellte Differenz zwischen der experimentell

ermittelten und simulierten Berstdrehzahl (25.000 min^{-1} und 23.050 min^{-1}) wird auf ein Ausknicken der Einzelbleche aus der Radialebene zurückgeführt. Neben radialen Verformungen sind daher **auch Änderungen des Planlaufs zu erwarten**. Diese werden allerdings nicht näher beschrieben und somit nicht bezüglich ihres Einflusses auf Unwuchtänderungen bewertet.

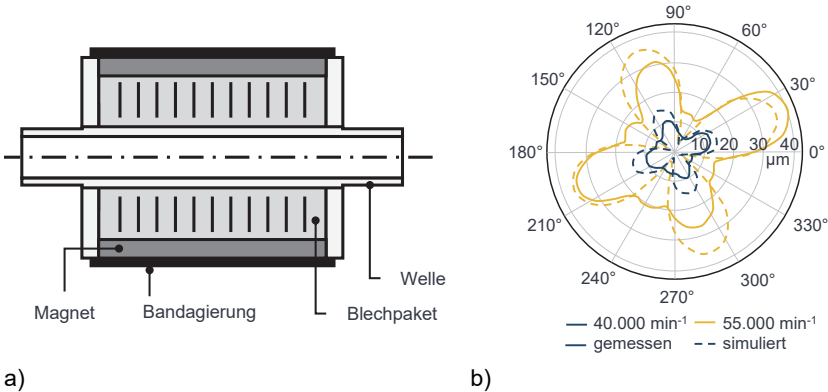


Abbildung 3-11: a) In (Gerlach & Zajonc et al. 2021) ausgelegter PM-Rotor mit Oberflächenmagneten sowie b) daran gemessene unsymmetrische Aufweitungen (in Anlehnung an (Gerlach & Zajonc et al. 2021, S. 97))

Das in (Gerlach & Zajonc et al. 2021, S. 106) erwähnte nichtlinear-elastische Verhalten eines Rotorblechpakets wird in (Clappier 2021, S. 52) untersucht, um die Genauigkeit der Vorhersage des hör- und spürbaren Schwingungsverhaltens eines elektrischen Traktionsantriebs zu verbessern. Dies soll unter anderem durch die Modellierung und die experimentelle Bewertung des Dämpfungsverhaltens des PM-Rotors erfolgen. Nach Clappier wird das Dämpfungsverhalten maßgeblich durch die Fügestellendämpfung der Rotorkomponenten beeinflusst. Bei metallischen Werkstoffen ist die Fügestellendämpfung im Allgemeinen 10 bis 100 Mal höher als die gleichzeitig vorliegende Materialdämpfung (Gasch & Nordmann et al. 2002, S. 96). Darüber hinaus liegen gerade bei Blechpaketen zwischen den Einzelblechen eine besonders hohe Anzahl an Fügestellen vor. Nach (Ehrlich 2016) weisen tangentialbelastete Fügestellen eine deutlich höhere Dämpfung als normalbelastete Fügestellen auf. Im Falle des Rotorblechpakets entsprechen die Fügestellen den mit der Fliehkraft F_z radial belasteten Stanzpaketierungen. Die Normal- bzw. Axialkraft der Fügestelle F_{Ax} entspricht dabei der durch die Wuchtscheiben eingestellten Vorspannkraft (Abbildung 3-12 a). Nach (Lenz 1997)

äußert sich die Fügestellendämpfung eines Blechpakets durch Mikro- und Makroschlupf zwischen seinen Einzelblechen. Mikroschlupf bezeichnet das gleichzeitige Auftreten lokaler Gleit- und Haftbereiche aufgrund elastisch-plastischer Verschiebungen der Kontaktfläche (Abbildung 3-12 b), Schritt 3). Makroschlupf liegt vor, wenn aufgrund steigender Tangentiallasten und -verschiebungen ein vollständiges Abgleiten der Kontaktfläche eintritt (Abbildung 3-12 b), Schritt 4). Experimentelle Untersuchungen in (Ehrlich 2016) legen nahe, dass sich das Verhalten einer tangential belasteten Fügestelle bei geringen Belastungsamplituden zunächst linear beschreiben lässt. Ab größeren Lastamplituden und daraus folgendem Mikro- und Makroschlupf tritt allerdings ein anelastisches Materialverhalten auf. Dieses bildet sich in einer lanzettenförmigen Hysteresekurve der auftretenden Verformungen ab (Abbildung 3-12 b), unten rechts) (Luchscheider 2015, S. 82) (Mayer 2007). Blechpakete weisen somit ein anelastisches Materialverhalten auf. **Inwiefern sich Mikro- und Makroschlupf zwischen den Einzelblechen eines Blechpakets auf dessen Unwuchtzustand auswirken, wurde bisher nicht untersucht.**

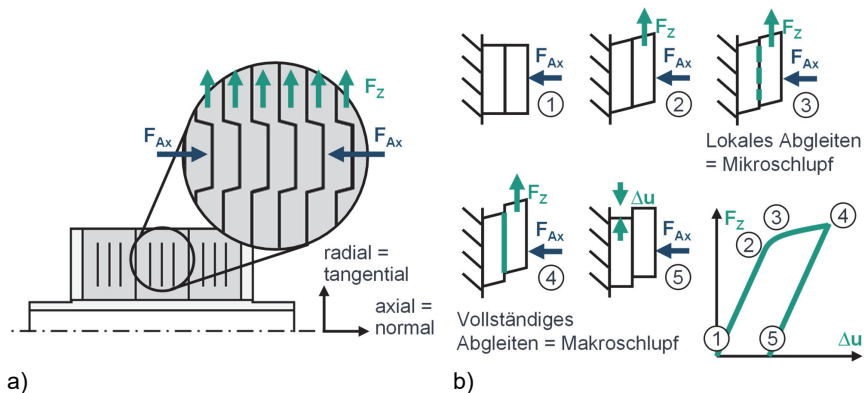


Abbildung 3-12: a) Stanzpaketierung als tangential belastete Fügestelle, b) Mikro- und Makroschlupf innerhalb eines tangential belasteten Reibkontakts (in Anlehnung an (Lenz 1997))

Neben einem anelastischen Verhalten liegt an Blechpaketen aufgrund von Walz-, Trenn- und Paketierprozessen zudem ein anisotropes Materialverhalten vor: Die Steifigkeit in axialer Richtung ist geringer als in radialer Richtung. Eine Oberflächenwelligkeit der Einzelbleche verringert die axiale Steifigkeit zusätzlich und steigert gleichzeitig die im Blechpaket auftretende Dämpfung (Clappier 2021, S. 62). Auch die Beschichtung

des Elektrobands beeinflusst mit ihrer Rauheit und ihrem viskoelastischen Verhalten das Auftreten von Mikroschlupf zwischen aufeinander gestapelten Einzelblechen. Unter quasistatischer Druckbelastung folgt hieraus nach 15 Stunden ein Setzen des Stapels um 1 % seiner axialen Höhe (Luchscheider 2015, S. 56). Wiederholte axiale Druckbelastungen zeigen elastisch-plastische Verformungen auf, deren plastischer Anteil nach der Erstbelastung deutlich abnimmt (Abbildung 3-13 a) (Luchscheider 2015, S. 50) (Loos & Barti et al. 2019, S. 1193). Mit steigender Anzahl wiederholter axialer Belastungen und dem Vorliegen eines Paketierdrucks nähert sich das zunächst visko-elastische Verhalten des Blechpakets einem linear-elastischen Verhalten an (Abbildung 3-13 b). Mittels Shaker angeregte axiale und tangentielle Belastungen zeigen ein vergleichbares Verhalten (Luchscheider 2015, S. 50) (Clappier 2021, S. 92–93). In beiden Arbeiten erfolgt allerdings **keine Untersuchung einer quasistatischen Tangentialbelastung**, die an einem unter Fliehkraft belasteten Rotorblechpaket vorliegt.

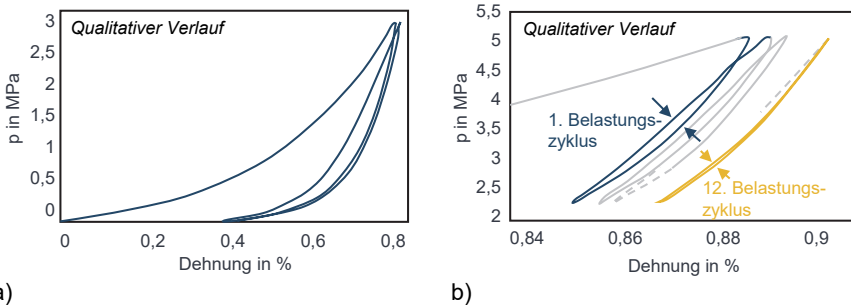


Abbildung 3-13: a) Zyklische axiale Be- und Entlastung eines Stapels von Elektrolechen, b) Zyklische Belastung unter Einwirkung eines Paketierdrucks (nach (Luchscheider 2015, S. 50))

Unter oszillierender Belastung kann Mikroschlupf nicht nur zwischen den Einzelblechen eines Blechpakets, sondern auch in Schruppsitzen und Schraubverbindungen eines Rotors auftreten (Gasch & Nordmann et al. 2002, S. 93). Der Einfluss des Schrupfverbands auf das mechanische Verhalten des Rotors wird in (Epskamp 2020, S. 147) bewertet: Es wird ein rein zylindrischer Querpressverband gewählt, um lokale Spannungsüberhöhungen an Passfedernuten zu vermeiden. Unsymmetrische Verformungen und daraus folgende Unwuchtänderungen sollen so vermieden werden. Gleichzeitig können Stanzgrate oder beim Laserschneiden entstehende Oxidränder Spannungsspitzen der axialen Vorspannung des Rotorblechpakets verursachen (Jungiewicz 2013,

S. 163). Auch Abweichungen bei der Montage der Rotorblechpakete auf die Rotorwelle und deren Vorspannung durch Wuchtscheiben können lokale, axiale Spannungsspitzen hervorrufen (Clappier 2021, S. 145). Nach (Luchscheider 2015, S. 50) kann eine nicht zentrische axiale Vorspannung ein wiederum radiales, durch Mikroschlupf bedingtes, **Abgleiten der Einzelbleche** bewirken. Es erfolgt allerdings **keine Bewertung der Auswirkung dieses Effekts auf den Unwuchtzustand** eines Rotorblechpakets.

Inhomogene Spannungsverteilungen können zudem durch thermische Belastungen hervorgerufen werden. Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten der in PM-Rotoren eingesetzten Werkstoffe können überlagert mit Fertigungsabweichungen bezüglich der Rotationsachse zu unsymmetrischen thermischen Dehnungen führen (Shen & Qin et al. 2018, S. 6). Zudem ist bei ungleicher Verteilung im Rotor auftretender Wirbelstromverluste sowie bei einem ungleichmäßigen Luftspalt eine lokale Überhitzung des Rotors möglich (Shen & Qin et al. 2018, S. 6) (Li & Liu et al. 2021, S. 118). Diese Arbeiten untersuchen keine Auswirkungen auf die Rotorunwucht. Allerdings werden in (Brecher & Weck 2021, S. 400) thermisch bedingte Unwuchten an hochdrehenden Fräsmaschinenspindeln beschrieben. Eine mögliche Ursache sind fertigungsbedingte Dickenabweichungen der Einzelbleche der Rotorblechpakete, die unter thermischer Belastung zu unterschiedlichen axialen Ausdehnungen und einer Durchbiegung des Rotors führen (Binder 2016, S. 10).

3.3.2.2 Relativbewegungen der Rotorkomponenten

Neben mechanisch und thermisch bedingten elastisch-plastischen Verformungen des Blechpakets können auch Relativbewegungen einzelner Rotorkomponenten Unwuchtänderungen verursachen. Bereits bekannte Wirkzusammenhänge werden im Folgenden zusammengefasst.

Analog zu den Rotorblechpaketen unterliegen auch die darin befindlichen Magnete besonders hohen Fliehkräften. Eine zuverlässige Fixierung der Magnete, die aufgrund ihres spröden Materialverhaltens nur mit einem Fügenspiel oder einer möglichst reduzierten Druckbelastung montiert werden können, ist somit besonders herausfordernd (Franke & Tremel et al. 2011, S. 3). Bei Verwendung einer stoffschlüssigen Magnetfixierung (bspw. durch Kleben oder Transfermolding) ist über die Lebensdauer des PM-Rotors mit einer Degradation der Verbindungsfestigkeit zu rechnen (Jung & Lee et al. 2012, S. 912). Dies ist insbesondere bei thermisch hoch belasteten Rotoren zu erwarten (Rasche 2012, S. 534). Bei der mechanischen Auslegung eines PM-Rotors wird

daher in der Regel der Ausfall der Magnetfixierung angenommen. Hierdurch kann ein Worst-Case berücksichtigt werden, bei welchem sämtliche an den Magneten wirkende Fliehkräfte von den Stegen des Rotorblechpakets aufgenommen werden müssen. Fliehkraftbedingte Translationen und Rotationen der Magnete innerhalb der Magnetta-schen werden dabei zwar simuliert, aber bezüglich der Rotationsachse als massensymmetrisch angenommen (Abbildung 3-14) (Epskamp 2020, S. 91). Auch bei Oberflächenmagneten, die anhand einer Faserbandage fixiert sind, werden radiale Setzef-fekte angenommen aber massensymmetrisch simuliert (Zubkov & Vereshagin 2021, S. 416). Allerdings ist produktionsbedingt mit stochastisch verteilten Fügspielen der Mag-nete zu rechnen, die ein unsymmetrisches Setzen der Magnete bewirken (Wölßner & Uhl et al. 2019, S. 3). Zudem **können Magnete aufgrund im Betrieb vorliegender Biegebelastungen brechen**. Dieses Verhalten wurde in (Hu & Li et al. 2021, S. 1184) nach dem 1,2-fachen der maximalen Drehzahl (36.000 min^{-1}) an einem Rotor mit verklebten, vergrabenen Magneten festgestellt. Eine daraufhin zu erwartende **Änderung der Unwucht wurde hingegen nicht quantifiziert**. Auch bei Axialflussmaschinen sind aufgrund axialer Anziehungskräfte zwischen Rotor und Stator Relativbewegungen der Magnete zu erwarten. Sie können in axialer Richtung bis zu $0,033 \text{ mm}$ betragen, werden aber auch dort nicht hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Rotorunwucht unter-sucht (Schäfer & Baranowski et al. 2023, S. 126).



Abbildung 3-14: Unter Fliehkraft massensymmetrisch angenommene Verlagerung der Magnete eines PM-Rotors (in Anlehnung an (Epskamp 2020, S. 91))

Werden zur Steigerung der axialen Steifigkeit des Rotorpakets Zugstäbe eingesetzt, so können sich auch diese relativ zur Rotationsachse bewegen. Fliehkraftbedingte Setzeffekte an unzureichend fixierten Zugstäben werden in (Schneider 2020, S. 102) beschrieben. Zudem kann eine ungleichmäßige Relaxation der axialen Verschraubungen einer Flanschkupplung zu einer Rotorbiegung und folglich einer Änderung der Rotorunwucht führen (Xu & Yang et al. 2021, S. 10) (Zhao & Zhang et al. 2022, S. 1). Setzeffekte axial verlaufender Kupferstäbe des Kurzschlussläufers einer Asynchronmaschine führen in (Epskamp 2020, S. 160) oberhalb der maximalen Drehzahl ($>30.000 \text{ min}^{-1}$) zu einer dauerhaften Änderung der Rotorunwucht (Abbildung 3-15 a) und b). Die Kupferstäbe wurden mittels Druckguss in das Rotorblechpaket eingebracht. Die Ursache für Abweichungen zwischen der simulierten und gemessenen Aufweitung des Rotors wird in nicht hinreichend genau definierbaren Kontaktbedingungen zwischen den Kupferstäben und dem Rotorblechpaket vermutet. Zudem wird innerhalb der fünf geschleuderten Rotoren eine **hohe Streuung der gemessenen radialen Aufweitungen festgestellt** (Abbildung 3-15 b). Auch axial verlaufende Wicklungen des Rotors einer fremderregten Synchronmaschine können sich unter Fliehkraft in radiale Richtung setzen und eine Unwuchtänderung bewirken (DIN ISO 21940-12 2016, S. 45).

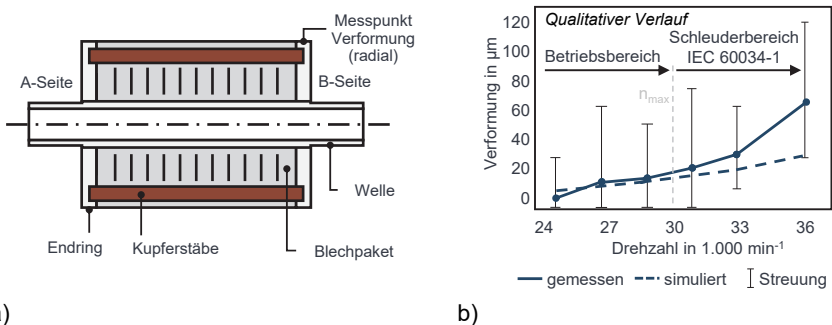


Abbildung 3-15: a) Rotor einer hochdrehenden Asynchronmaschine und b) bei Schleuderversuchen an der B-Seite gemessene Aufweitungen (nach (Epskamp 2020, S. 160))

Darüber hinaus können an der Rotorwelle Vorkrümmungen vorliegen, die durch Eigen- spannungen, plastische Verformungen aus unsachgemäßem Transport sowie durch thermischen Verzug hervorgerufen werden (Gasch & Nordmann et al. 2002, S. 53). Eine Abnutzung der Rotorwelle an den Lagerstellen oder ein Verschleiß der Rotorlager

kann über die Lebensdauer ebenfalls zu einer fortschreitenden Änderung der Rotorunwucht führen (Cameron & Thomson et al. 1986, S. 156).

Zusammenfassung: Eine Veränderung der Rotorunwucht ist maßgeblich durch Verformungen des Blechpakets sowie Relativbewegungen einzelner Rotorkomponenten zu erwarten. Aufgrund von Mikroschlupf, der in stanzpaketierte Blechpaketen zwischen den Einzelblechen auftritt, weisen diese ein anelastisches Materialverhalten auf. Insbesondere bei Erstbelastungen führt dies zu einem hohen Anteil plastischer Dehnungen. Auch ungleichmäßige Vorspannungen sowie thermische Lasten können zu Verformungen des Blechpakets führen. Relativbewegungen der Komponenten eines PM-Rotors sind hauptsächlich an den Permanentmagneten sowie Zugstäben zu erwarten. Sie werden bei der Auslegung des Rotors in der Regel vereinfacht als massensymmetrisch angenommen. Auswirkungen unsymmetrischer Verformungen und Relativbewegungen auf die Rotorunwucht wurden bisher nur in wenigen Fällen untersucht.

3.3.3 Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen

Im Folgenden wird zwischen proaktiven und reaktiven Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen unterschieden. Proaktive Maßnahmen werden bereits während der Auslegung, Fertigung und Montage von PM-Rotoren ergriffen. Sie erfordern in der Regel ein Verständnis der Ursachen im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen. Reaktive Maßnahmen kommen erst während des Schleuderns, Auswuchtens, Magnetisierens und Betriebs von PM-Rotoren zum Einsatz (Abbildung 3-16).

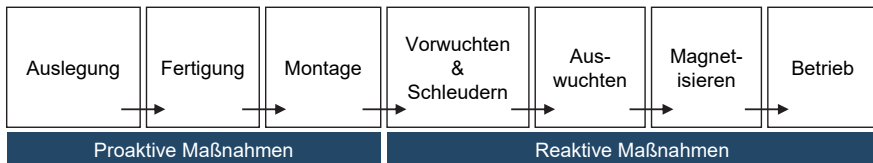


Abbildung 3-16: Unterscheidung zwischen proaktiven und reaktiven Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen

3.3.3.1 Proaktive Maßnahmen

Im Sinne einer möglichst geringen Initialunwucht erfolgt eine **massensymmetrische Konstruktion des Rotors**. Bei der mechanischen Auslegung aller Rotorkomponenten wird als Randbedingung definiert, dass erst ab dem 1,2-fachen der maximalen Drehzahl

plastische Deformationen auftreten dürfen (DIN EN 60034-1 2015). Hieraus werden insbesondere die Mindeststegbreiten des Blechschnitts der Rotorblechpakete abgeleitet. Bleibende Änderungen der Rotorunwucht unterhalb der maximalen Betriebsdrehzahl sollen somit ausgeschlossen werden. Zur Verringerung lokaler Spannungsspitzen, die zu vorübergehenden und/oder dauerhaften unsymmetrischen Verformungen führen können, werden im Blechschnitt und an den Permanentmagneten Verrundungen vorgesehen (Epskamp 2020, S. 147) (Riemer & Lessmann et al. 2010, S. 3980). Eine Verdrehung der Einzelbleche während des Paketierprozesses soll Initialunwuchten, inhomogene Spannungsverteilungen und ungleichmäßige thermische Ausdehnungen reduzieren, die durch Dickenabweichungen der Einzelbleche verursacht werden (Hansen 1989, S. 3).

Zur massensymmetrischen Positionierung der Magnete innerhalb der Magnettaschen wurden verschiedene Ansätze entwickelt: Einerseits ist während des Transfermolding-Prozesses die gezielte Einleitung der Vergussmasse an der Seite der Magnettasche möglich, die der Rotationsachse zugewandt ist. Beim Einstromen der Vergussmasse soll der Magnet somit an eine von der Rotationsachse abgewandte Seite bewegt und dort fixiert werden. Während in (Sameshima & Ono et al. 2018) ein axiales Einstromen erfolgt, ist dieses in (Fröhlich & Heise 2020) radial gerichtet. Diese Ansätze dienen hauptsächlich der Verringerung des Rastmoments des Rotors. Ihr Einfluss auf die Initialunwucht oder fliehkraftbedingte Setzeffekte der Magnete wird nicht beschrieben. In (Gilde & Blaes 2020) und (Bensing & Stammer et al. 2022) werden die **Magnete gezielt in einer der Rotationsachse am entferntesten Lage positioniert**. Hierzu werden federnde Elemente eingesetzt, die an bis zu zwei Flächen des Magneten mit ihm in Berührung stehen. Die Federelemente können im Blechpaket als Blattfedern integriert oder bei der Magnetmontage zusätzlich eingebracht sein. Aufgrund der erreichten Positionierung sind sowohl eine reduzierte Initialunwucht als auch reduzierte Setzbewegungen der Magnete zu erwarten.

Die Patentschrift (Wurster 2021) berücksichtigt die Planlaufabweichungen der auf eine Welle zu montierenden Blechpakete. Dadurch soll **vermieden werden, dass zwei angrenzende Blechpakete an Winkelstellungen eines maximalen Planlauffehlers in Kontakt stehen** und dort Spannungsüberhöhungen auftreten. Diese führten bei einer Erwärmung des Rotors zu einer ungleichen thermischen Ausdehnung der Blechpakete, einer Durchbiegung der Welle und folglich einer Veränderung der Rotorunwucht. Der Montageprozess soll anhand der in den Patentschriften (Wurster & Lamparsky 2021a)

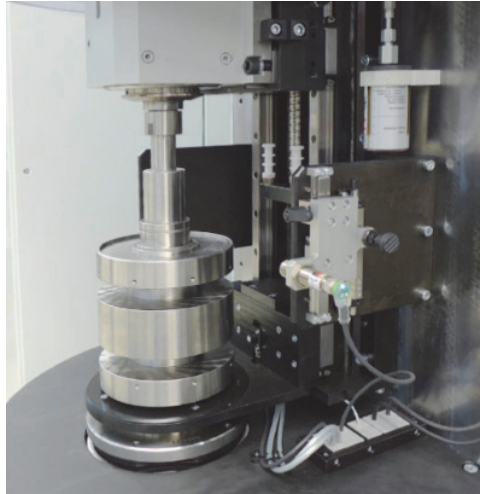
und (Wurster & Lamparsky 2021b) vorgestellten Vorrichtungen und Werkzeuge umsetzbar sein.

3.3.3.2 Reaktive Maßnahmen

Können Unwuchtänderungen nicht durch eine geeignete Auslegung, Fertigung und Montage ausgeschlossen werden, können sie durch einen geeigneten Auswuchtprozess adressiert werden. Wenn hauptsächlich vorübergehende Unwuchtänderungen auftreten und diese in Betrag und Winkellage vorhergesagt werden können, kann der Rotor für einen definierten Betriebszustand ausgewuchtet werden (DIN ISO 21940-12 2016, S. 26). Dies kann bspw. durch Gegengewichte erfolgen, die ein ähnliches mechanisches Verhalten wie der Rotor aufweisen. Sie werden entgegen der Winkellage, in der die Änderung der Unwucht erwartet wird, angebracht. Ist eine Vorhersage nicht möglich, erfolgt die Unwuchtmessung bei der Drehzahl und Temperatur, bei der der Rotor die erforderliche Wuchtgüte einhalten soll. Dieser Ansatz wird als **Kompromissauswuchtung** bezeichnet, da der Rotor bei anderen Betriebsdrehzahlen nicht zwangsläufig die gewünschte Wuchtgüte einhält (Schneider 2020, S. 101).

Für Rotoren mit Setzungsverhalten (vgl. Abbildung 2-12) wird in (DIN ISO 21940-12 2016, S. 26) ein Auswuchten bei einer Drehzahl empfohlen, ab der keine weiteren Unwuchtänderungen auftreten. Bei Bedarf kann die hierfür erforderliche Fliehkraftbelastung in einem **gesonderten Schleuderprozess** erfolgen (Schneider 2020, S. 100–102). Dies ist die Praxis der industriellen Produktion von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe. Der Schleuderprozess erfolgt bspw. in einem vertikal ausgeführten Schleuderstand⁹. Ein PM-Rotor wird im Schleuderstand am unteren Wellenende eingespannt, am oberen Wellenende über einen Rollenspannkopf zentriert und von einem unterseitigen Antrieb auf die geforderte Schleuderdrehzahl beschleunigt. Zur Verringerung der mechanischen Belastung eines Schleuderstands ist in der Regel ein Vorwuchten des Rotors erforderlich. Dies kann umgangen werden, wenn der Rotor im Schleuderstand an beiden Wellenende eingespannt ist und ein aktives Auswuchtsystem eingesetzt wird. Nach Abschluss des Schleuderprozesses wird der Rotor entnommen und einem subtraktiven Auswuchtprozess übergeben.

⁹ Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG (2023), *Vertikaler Schleuderstand Typ ESV25-AR*. <https://www.hofmann-global.com/produkte/spezial-auswuchtloesungen/auswuchtmaschinen-automotive/auswuchtmaschinen-fuer-elektromotoren-hybridkuefer.html> [03.10.2023]



*Abbildung 3-17: Beispiel eines industriell eingesetzten Schleuderstands
(Quelle: Firma Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG⁹)*

Ist während des Betriebs mit zusätzlichen Änderungen der Rotorunwucht zu rechnen, ist ein Nachwuchten des Rotors erforderlich. Dies ist der Fall, wenn an Verdichterrädern Schmutzablagerungen (Wielsch & Kreuter et al. 2021, S. 35), an Propellerflügeln Abnutzungen (Pan & Lu et al. 2020, S. 1) oder an Gasturbinen Verschleiß durch kurzzeitigen Kontakt zwischen Rotor und Stator auftreten (Lechner & Seume 2019, S. 545). An letzteren kann auch die Ausbreitung von Rissen eine über mehrere Tage fortlaufende Änderung der Unwucht bewirken (Popaleny & Blackwell et al. 2022, S. 5). Kann oder soll ein Rotor hierfür nicht ausgebaut werden, ist im eingebauten Zustand sowohl eine Messung als auch ein Ausgleich der Rotorunwucht erforderlich. Zum jetzigen Stand werden **keine industriell produzierten elektrischen Traktionsantriebe** beschrieben, die eine für den Unwuchtausgleich **erforderliche Zugänglichkeit des Rotors** vorsehen.

Automatische Auswuchtssysteme, die dauerhaft auf dem Rotor verbaut sind und über die Verlagerung fester oder fluidischer Massen eine sich ändernde Unwucht kompensieren können, kommen primär in nicht-automobilen Anwendungen zum Einsatz: Anwendungsfelder sind unter anderem Frässpindeln für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung (Dörgeloh & Beinbauer et al. 2016, S. 188) (Foremny & Schenck et al. 2016, S. 323) und Propellerantriebe elektrisch betriebener Flugzeuge (Pan & Lu et al. 2020, S.

1). Auch aktive Magnetlager können durch eine geeignete Anpassung der Rotationsachse eine veränderte Rotorunwucht kompensieren. Ein mögliches Anwendungsgebiet ist die Lagerung besonders hochdrehender Schwungradspeicher (Li & Mittelstedt et al. 2022, S. 7). Neben gesteigerten Kosten erfordern aktive Magnetlager allerdings deutlich mehr Bauraum als üblicherweise eingesetzte Rillenkugellager. Passive Auswuchtsysteme, die weder Messung noch aktive Korrektur des Unwuchtzustands erfordern, können in der Regel nur bei einem überkritischen Betrieb der Maschine eingesetzt werden (Drach & Royzman et al. 2021, S. 45). Da elektrische Traktionsantriebe allerdings möglichst weit unterhalb der ersten Biege-Eigenfrequenz des Rotors betrieben werden, sind sie dort nicht einsetzbar.

3.4 Forschungsbedarf

Bisher sind nur vereinzelte Ursachen im Betrieb auftretender Verformungen und Relativbewegungen bekannt (Tabelle 3-1). Proaktive Maßnahmen gegen Unwuchtänderungen wurden bisher kaum untersucht. PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe, an denen im Betrieb Unwuchtänderungen zu erwarten sind, müssen daher in der industriellen Produktion einem zeit- und kostenintensiven Schleuderprozess unterzogen werden. Auf diese reaktive Maßnahme gegen Unwuchtänderungen soll in Zukunft verzichtet werden. Hierfür bedarf es einer umfassenden Untersuchung unter mechanischen und thermischen Lasten **auftretender Verformungen und Relativbewegungen**. Daraus gewonnene Erkenntnisse können in **proaktive Maßnahmen** zur Vermeidung von Unwuchtänderungen überführt werden. Die hierfür definierten Zielsetzungen werden im folgenden Kapitel erläutert.

Tabelle 3-1: Übersicht des ermittelten Forschungsbedarfs

	Rotorunwucht	Verformungen und Relativbewegungen		Maßnahmen gegen Unwuchtänderungen	
	Ursachen	Auswirkungen	Ursachen	Proaktiv	Reaktiv
Peter 2018	●	○	○	○	○
Sakkas 2022	○	☉	○	○	○
Chai & Wu 2019	○	☉	○	○	○
Hu & Li 2021	●	●	●	○	○
Karthaus & Hameyer 2017	○	●	●	○	○
Gerlach & Zajonc 2021	○	●	●	○	○
Loos 2019	●	●	●	☉	○
Clappier 2021	●	●	●	●	○
Gasch & Nordmann 2002	●	●	●	○	○
Luchscheider 2015	○	●	●	○	○
Epskamp 2020	○	●	●	○	○
Shen & Qin 2018	○	●	☉	○	○
Schneider 2020	●	●	●	☉	●
Cameron & Thompson 1983	●	●	●	○	○
Sameshima & Ono 2018	☉	○	☉	☉	○
Fröhlich & Heise 2020	☉	○	☉	☉	○
Gilde & Blaes 2020	☉	○	☉	☉	○
Bensing & Stammer 2022	☉	○	☉	☉	○
Wurster 2021	☉	○	☉	☉	○
DIN ISO 21940-12 2016	☉	○	●	☉	●
Dörgeloh 2016	○	○	○	○	●
Hofmann 2023	○	○	○	○	●

○ nicht betrachtet

● validiert

☉ diskutiert

● validiert, mit Bezug

● simuliert

auf Unwuchtänderung

Ursachen nur vereinzelt
untersuchtKaum proaktive
Gegenmaßnahmen

4 Zielsetzungen und Vorgehensweise

Entsprechend des in Abschnitt 3.4 dargestellten Forschungsbedarfs liegen keine ausreichenden Erkenntnisse vor, wie die Neigung von Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe zu Unwuchtänderungen durch eine geeignete Auslegung, Fertigung und Montage reduziert werden kann. In dieser Arbeit soll daher zunächst ein **Verständnis der Ursachen** im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen erarbeitet werden (Abbildung 4-1 oben). Darauf aufbauend sollen proaktive Maßnahmen abgeleitet werden, die zur **Reduzierung von Unwuchtänderungen** eingesetzt werden können (Abbildung 4-1 unten). Aus diesen Zielsetzungen abgeleitete Forschungsfragen sowie zu deren Untersuchung gewählte Methoden werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

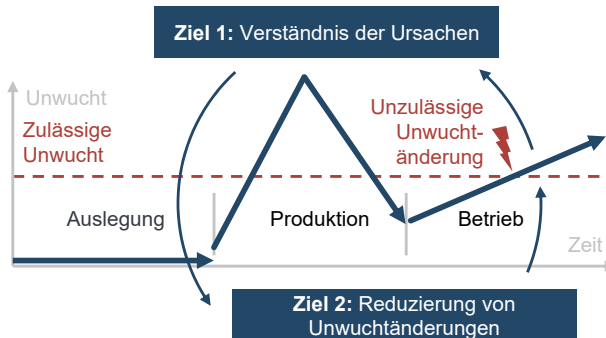


Abbildung 4-1: Zielsetzungen der Arbeit

4.1 Verständnis im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen

Unwuchtänderungen können sowohl Verformungen als auch Relativbewegungen der Rotorkomponenten zugrunde liegen. Ein Verständnis im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen erfordert somit zunächst eine systematische Analyse, wie die Auslegung, Fertigung und Montage von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe entsprechende Verformungen und Relativbewegungen begünstigen. Aufgrund der Vielzahl der Komponenten eines PM-Rotors sind zahlreiche unterschiedliche Verformungen und Relativbewegungen zu erwarten. Die erste Forschungsfrage bezieht sich daher auf die Priorisierung des Einflusses erwarteter Verformungen und Relativbewegungen auf daraus folgende Unwuchtänderungen:

Forschungsfrage 1:

Welche **Verformungen und Relativbewegungen** weisen den **größten Einfluss** auf im Betrieb **erwartete Unwuchtänderungen** auf?

Anschließend soll untersucht werden, durch welche Belastungen diese besonders kritischen Verformungen und Relativbewegungen im Betrieb eines PM-Rotors hervorgerufen werden. Dabei wird danach unterschieden, ob sie vorübergehend und/oder dauerhaft auftreten. Als Belastungen werden die Drehzahl, Temperatur und die Dauer der Belastung definiert. Die Bewertungen sollen primär experimentell erfolgen, um bisher am Stand der Forschung und Technik durchgeführte simulative Untersuchungen zu ergänzen. Die Bearbeitung der ersten und zweiten Forschungsfrage sollen das Verständnis im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen ermöglichen.

Forschungsfrage 2:

Aufgrund welcher **Fertigungs- und Montageabweichungen** und welcher **Belastungen** (Drehzahl, Temperatur, Dauer der Belastung) treten diese Verformungen und Relativbewegungen **vorübergehend und/oder dauerhaft** auf?

4.2 Reduzierung im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen

Um im Betrieb auftretende Unwuchtänderungen zu vermeiden, muss nach jetzigem Stand der Technik ein Schleuderprozess durchgeführt werden. Dieser erfolgt in der Regel parallel an mehreren Schleuderprüfständen, um geringe Taktzeiten einhalten zu können. Der Verzicht auf einen Schleuderprozess bietet somit ein erhebliches Potential zur Reduzierung der mit der Rotorproduktion verbundenen Investitionskosten. Im Betrieb auftretende Unwuchtänderungen sollen daher bereits durch eine geeignete Auslegung, Fertigung und Montage von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe reduziert werden. Die dritte Forschungsfrage ist folgendermaßen definiert.

Forschungsfrage 3:

Wie kann durch eine geeignete **Auslegung, Fertigung und Montage** von PM-Rotoren deren **Neigung zu Unwuchtänderungen reduziert** werden?

4.3 Vorgehensweise

Zur Bearbeitung der drei Forschungsfragen wird das in Abbildung 4-2 dargestellte Vorgehensmodell erarbeitet. Es basiert auf der Annahme, dass Fertigungs- und Montageabweichungen unter Belastungen zu Verformungen und Relativbewegungen führen und daraus Unwuchtänderungen resultieren. Die folgenden drei Abschnitte stellen pro Forschungsfrage diejenigen Methoden vor, die zur Bearbeitung dieser Ursache-Wirkungskette eingesetzt werden.

4.3.1 Priorisierung erwarteter Unwuchtänderungen (Forschungsfrage 1)

Als Voraussetzung für die Bearbeitung der ersten Forschungsfrage werden zunächst produkt- und prozessseitige Randbedingungen definiert. Produktseitige Parameter beziehen sich insbesondere auf die geometrischen Eigenschaften der zu berücksichtigenden PM-Rotoren. Diese Parameter sollen in Anlehnung an aktuell industriell hergestellte PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe gewählt werden. Prozessseitige Randbedingungen beschreiben die Gestaltung der Fertigungs- und Montageprozesse

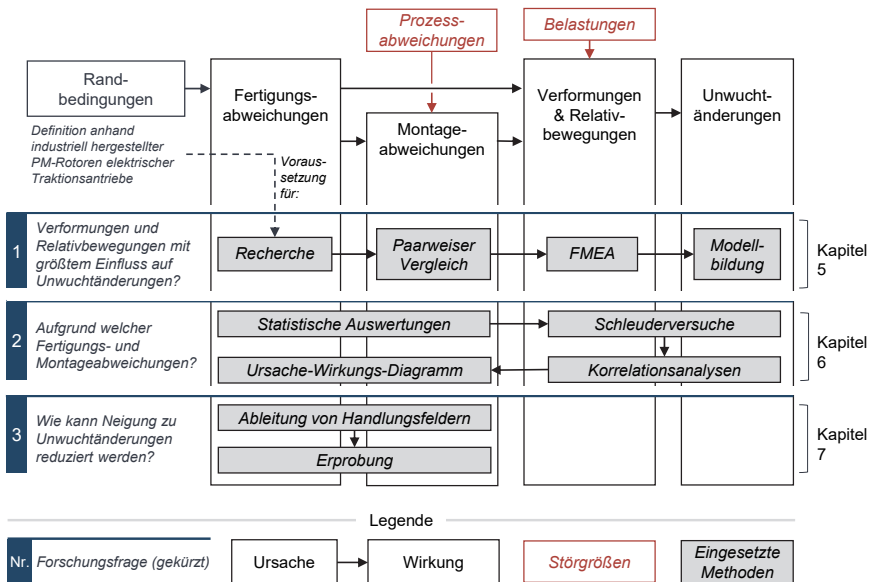


Abbildung 4-2: Vorgehensmodell zur Bearbeitung der drei Forschungsfragen

der Rotorkomponenten. Im Sinne eines Bottom-Up-Ansatzes werden zunächst die während der Fertigung der Rotorkomponenten zu erwartenden Fertigungsabweichungen analysiert. Anhand einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) werden diejenigen Fertigungsabweichungen identifiziert, die unter Einwirkung von Belastungen (Drehzahl, Temperatur, Belastungsdauer) zu Verformungen und/oder Relativbewegungen führen können. Ein paarweiser Vergleich analysierter Fertigungsabweichungen ergibt parallel dazu diejenigen Fertigungsabweichungen, die unter der Einwirkung von Prozessabweichungen zu Montageabweichungen führen. In einer zweiten FMEA werden diejenigen Montageabweichungen identifiziert, die unter Einwirkung von Belastungen zu zusätzlichen Verformungen und Relativbewegungen führen. Erwartete Verformungen und Relativbewegungen werden folglich quantifiziert, um ihren Einfluss auf Unwuchtänderungen berechnen zu können. Hierzu wird ein in (Peter 2018) validiertes analytisches Starrkörpermodell weiterentwickelt. Die Quantifizierung der Eingangsgrößen des Starrkörpermodells erfolgt auf Basis von Literaturrecherchen, Industrie-Befragungen, Berechnungen und experimentellen Untersuchungen. Als kritisch identifizierte Verformungen und Relativbewegungen werden zur Bearbeitung der zweiten Forschungsfrage übergeben.

4.3.2 Validierung auftretender Unwuchtänderungen (Forschungsfrage 2)

Analog zu Abschnitt 4.3.1 basiert auch die Validierung auftretender Unwuchtänderungen auf der schrittweisen Analyse von Randbedingungen, Fertigungs- und Montageabweichungen sowie unter Last auftretender Unwuchtänderungen. Entsprechend der zuvor definierten produkt- und prozessseitigen Randbedingungen sowie der identifizierten kritischen Verformungen und Relativbewegungen erfolgt zunächst die Auslegung einer Referenzgeometrie. Sie soll eine hohe Vergleichbarkeit zu aktuell industriell hergestellten PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe aufweisen. Gleichzeitig soll sie keiner Vertraulichkeitsvereinbarung mit Dritten unterliegen, um alle geometrischen Eigenschaften sowie Versuchsergebnisse veröffentlichen zu können.

Die Planung und Vorbereitung experimenteller Versuchsreihen umfassen insbesondere die Entwicklung und Inbetriebnahme eines Schleuderprüfstands. Durch die Aufprägung mechanischer und thermischer Lasten werden ausgewählte Betriebsbedingungen des elektrischen Antriebs nachgebildet. Bei Schleuderversuchen erfasste Messdaten werden statistisch ausgewertet und zuvor erwarteten Verformungen und Relativbewegungen gegenübergestellt. Eine zyklische Drehzahlbeanspruchung mit zwischenzeitigen

Intervallen niedriger Drehzahl ermöglicht die Unterscheidung zwischen vorübergehenden und dauerhaften Veränderungen der Rotorkomponenten. Korrelationen zwischen Messdaten, die an einzelnen Rotorkomponenten vor, während und nach Schleuderversuchen aufgenommen werden, werden daraufhin bezüglich ihres kausalen Zusammenhangs untersucht. Gewonnene Erkenntnisse werden Schleuderversuchen an industriell hergestellten Rotorblechpaketen gegenübergestellt und in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm zusammengefasst.

4.3.3 Maßnahmen zur Reduzierung im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen (Forschungsfrage 3)

Zur Erarbeitung neuer Ansätze, die die Neigung von PM-Rotoren zu Unwuchtänderungen reduzieren sollen, erfolgt zunächst die Ableitung von Handlungsfeldern entlang ihrer Auslegung, Fertigung und Montage. Die Handlungsfelder sollen sowohl Lösungsansätze für bereits bestehende Produktionslinien als auch für die Neuauslegung elektrischer Traktionsantriebe enthalten. Hierdurch soll eine hohe Übertragbarkeit der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf aktuelle und zukünftige Generationen elektrischer Traktionsantriebe erreicht werden.

5 Priorisierung erwarteter Unwuchtänderungen

Zur Bearbeitung der ersten Forschungsfrage wurde die in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Methodik erarbeitet. Sie setzt im ersten Schritt die Definition produkt- und prozesseitiger Randbedingungen voraus. Die Ergebnisse der jeweiligen Teilschritte werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt und in Abschnitt 5.5 zusammengefasst.

5.1 Definition produkt- und prozesseitiger Randbedingungen

Zur Definition produktseitiger Randbedingungen werden zunächst die geometrischen Eigenschaften des PM-Rotors eines elektrischen Traktionsantriebs parametrieren. Dadurch sollen an einem PM-Rotor erwartete Unwuchtänderungen modelliert werden können. Die Parametrierung erfolgt in Anlehnung an die in (Peter 2018, S. 64–66) und (Meyer 2022, S. 5–9) vorgestellten Ansätze. In dieser Arbeit bezieht sich die Parametrierung allerdings nicht auf PM-Rotoren mit Oberflächenmagneten, sondern auf PM-Rotoren mit vergrabenen Magneten (Abbildung 5-1). Es wird eine Delta-Anordnung gewählt, da diese einerseits häufig eingesetzt wird und andererseits eine Kombination der V-Anordnung und der Anordnung in Umfangsrichtung darstellt (vgl. Abbildung 3-1 a). Es wird daher erwartet, dass mit der Delta-Anordnung gewonnene Erkenntnisse in hohem Maße auf andere Magnetanordnungen übertragen werden können.

Die jeweiligen Rotorkomponenten werden als Zylinder und Quader dargestellt. Sie werden über ihre Abmessungen, Lage, Orientierung, Masse und Unwucht parametrieren. Dies betrifft insbesondere die Wellenabschnitte der Rotorwelle, die Blechpakete und ihre Magnettaschen, die Wuchtscheiben, die Zugstäbe sowie die Magnete selbst. Komponenten, die keinem zylindrischen oder quaderförmigen Grundkörper zugrunde liegen, werden in diesem Beschreibungsmodell vereinfacht als Punktmasse definiert. Dies ist bei einer stoffschlüssigen Magnetfixierung der Fall, bei der die Masse der Vergussmasse pro Magnettasche als Punktmasse zusammengefasst wird. Wie in (Peter 2018, S. 64–66) können Geometrieprimitive zu Gruppen zusammengeführt werden. So sind bspw. die axialen Abschnitte der Rotorwelle zu einer Baugruppe zusammengefasst. Die Magnete, die zu ihrer Fixierung eingesetzte Vergussmasse, die Magnettaschen und das Blechpaket sind ebenfalls als gemeinsame Baugruppe definiert.

Um eine Übertragbarkeit der folgenden Untersuchungen auf eine möglichst hohe Anzahl unterschiedlicher PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe zu erreichen, wurden Produktparameter aktuell eingesetzter Antriebe recherchiert. Die in Tabelle 5-1 und

Tabelle 5-2 dargestellten Parameter sind derart gewählt, dass sie eine möglichst hohe Übereinstimmung mit 13 bereits industriell hergestellten PM-Rotoren aufweisen (vgl. Tabelle A- 2 im Anhang). Sofern sie dort verfügbar waren, wurden Geometriedaten der Online-Datenbank A2Mac1 entnommen und deren Mittelwert gerundet.¹⁰ Die symmetrische Lage des Schwerpunkts zwischen den Lagerebenen vereinfacht die Berechnung der Anteile von statischer Unwucht und Momentenunwucht. Es erfolgt keine Betrachtung der Rotorlagerung, da deren Betriebsverhalten unter anderem in (Nguyen-Schäfer 2016, S. 185–205) bereits umfassend untersucht wurde. Der Rotor wird somit in dem Zustand modelliert, in dem er sich während eines Schleuder- und Auswuchtprozesses befindet.

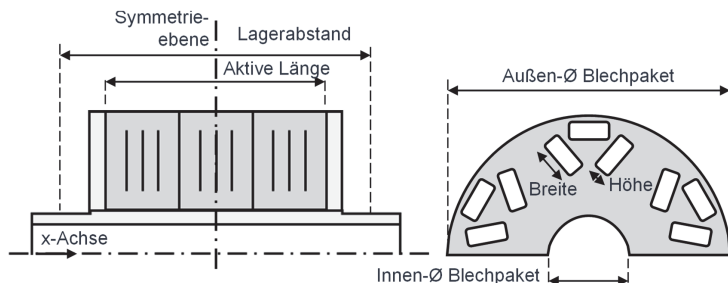


Abbildung 5-1: Beschreibungsmodell zur geometrischen Parametrierung eines PM-Rotors eines elektrischen Traktionsantriebs mit vergrabenen Magneten

Tabelle 5-1: Auswahl von Produkt-Parametern (Teil 1 von 2)

Komponente	Parameter	Wert	Einheit
Rotor	Rotormasse	15	kg
	Maximale Drehzahl	15.000	min ⁻¹
	Maximale Rotortemperatur	150	°C
	Geforderte Wuchtgüte nach Produktion	G 2,5	m/s
	Geforderte Wuchtgüte nach Lebensdauerende	G 6,3	m/s
	Anzahl Blechpakete	4	[-]
	Aktive Länge	120	mm
	Anzahl Magnete	96	[-]
	Anzahl Zugstäbe	4	[-]

¹⁰ A2Mac1 (2021), Platform. <https://www.a2mac1.com/> [02.12.2021]

Tabelle 5-2: Auswahl von Produkt-Parametern (Teil 2 von 2)

Komponente	Parameter	Wert	Einheit
Welle	Durchmesser Trägerabschnitt	50	mm
	Lagerabstand	200	mm
Blechpaket	Innendurchmesser	50	mm
	Außendurchmesser	150	mm
	Axiale Länge	30	mm
	Blechstärke	0,3	mm
	Anzahl Magnete pro Blechpaket	24	[-]
	Anzahl Magnete pro Magnettasche	1	[-]
	Anzahl unterschiedlicher Magnetabmessungen	1	[-]
	Anzahl Polpaare	4	[-]
	Magnetanordnung	Delta	[-]
Magnet	Höhe	5	mm
	Breite	18	mm
	Länge	30	mm
Wuchtscheibe	Innendurchmesser	50	mm
	Außendurchmesser	150	mm
	Axiale Länge	10	mm

Prozessseitige Randbedingungen werden in Anlehnung an Fertigungs- und Montageprozesse definiert, die für die industrielle Produktion von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe eingesetzt werden (vgl. Abschnitte 3.1 und 3.2). Als Herstellungsverfahren der Rotorblechpakete wird ein Stanzpaketierprozess definiert, bei welchem ein Elektroband der Blechstärke 0,3 mm verwendet wird. Die Welle wird als Drehteil aus 42CrMo4 angenommen. Ein Aluminium-Druckguss mit anschließender spanender Nachbearbeitung bildet die Referenz zur Fertigung der Wuchtscheiben. Für die Magnete aus Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) wird ein Sinterprozess mit anschließender Epoxy-Beschichtung festgelegt. Die Montage der Magnete erfolgt im unmagnetisierten Zustand durch ein automatisiertes Einlegen in die Magnettaschen und deren stoffschlüssige Fixierung durch ein Transfermolding der einzelnen Blechpakete (sogenanntes Single-Stack-Molding). Zur Montage der Blechpakete inkl. fixierter Magnete sowie der Wuchtscheiben auf die Rotorwelle wird ein thermisch unterstützter

Querpressverband gewählt. Die Welle-Nabe-Verbindung ist als rein zylindrischer Pressverband gestaltet. Axial durch die Wuchtscheiben und Blechpakete verlaufen Zugstäbe, die zwischen Schraubenkopf und Mutter eine axiale Vorspannung des Blechpakets erzeugen.

5.2 Identifikation zu erwartender Verformungen und Relativbewegungen

Ziel dieses Abschnitts ist die Identifikation derjenigen Verformungen und Relativbewegungen der Komponenten eines PM-Rotors, bei denen ein Einfluss auf die Änderung der Rotorunwucht erwartet wird. Zur Bewertung des Ursprungs dieser Verformungen und Relativbewegungen erfolgt zunächst die Analyse der an den einzelnen Rotorkomponenten zu erwartenden Fertigungsabweichungen. Hierbei liegt der Fokus auf Fertigungsabweichungen an Geometrieelementen, die bereits einen Einfluss auf die Initialunwucht und Unwuchtänderung des Rotors aufweisen. Entsprechend der in Abbildung 5-2 dargestellten Methodik werden aus den identifizierten Fertigungsabweichungen Montageabweichungen abgeleitet. Sie werden wiederum in erwartete Verformungen und Relativbewegungen überführt. Die Analysen erfolgen unter Berücksichtigung der im vorherigen Abschnitt definierten produkt- und prozesseitigen Randbedingungen.

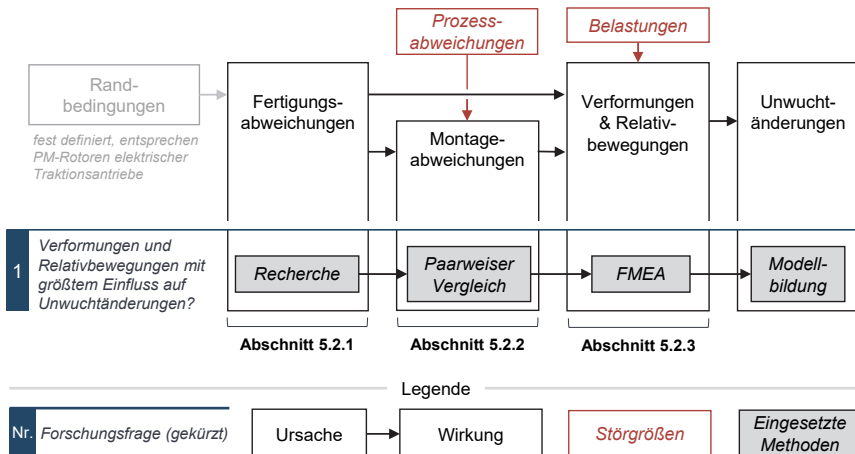


Abbildung 5-2: Identifikation zu erwartender Verformungen und Relativbewegungen

5.2.1 Analyse erwarteter Fertigungsabweichungen

Basierend auf den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Unwuchtbeiträgen werden diejenigen Geometrieelemente der Rotorkomponenten identifiziert, die voraussichtlich die Initialunwucht und die Unwuchtänderung des Rotors beeinflussen. Sie werden in der Tabelle 5-3 und Abbildung 5-3 zusammengefasst. Nach Abschnitt 3.2.5 beeinflusst eine exzentrische Position des Wellenabschnitts, auf welchem sich die Blechpakete befinden, die Initialunwucht des Rotors. Das Geometrieelement „Träger Blechpaket“ ist daher in Tabelle 5-3 enthalten. Ebenso kann der Planluffehler eines Blechpakets zu einer Momentenunwucht des Rotors führen. Aus diesem Grund ist das Geometrieelement „Planfläche“ des Blechpakets gelistet. Für die im weiteren Verlauf der Arbeit geplante Modellierung des Rotors werden den Geometrieelementen Geometrieprimitive zugeordnet. Ein Zylinder kann gleichzeitig das Geometrieelement *Planfläche* sowie *Innen-* und *Außendurchmesser* abbilden. Innendurchmesser werden als Zylinder mit negativer Masse modelliert.

Tabelle 5-3: Geometrieelemente der Rotorkomponenten, bei deren Fertigungsabweichungen ein Einfluss auf die Initialunwucht und Unwuchtänderung erwartet wird

Rotor-Komponente	Anzahl	Geometrieelement	Nr. in Abbildung 5-3	Geometrieprimitiv
Rotorwelle	1	Lagersitz A	①	Zylinder
		Träger Blechpakete	②	Zylinder
		Lagersitz B	③	Zylinder
Blechpaket	4	Innendurchmesser	④	Zylinder
		Außendurchmesser	⑤	Zylinder
		Planfläche	⑥	
		Magnettasche	⑦	Quader
Magnet	96	Gesamtkörper	⑧	Quader
Magnetfixierung	96	Gesamtmasse	⑨	Punktmasse
Wuchtscheibe	2	Innendurchmesser	⑩	Zylinder
		Außendurchmesser	⑪	Zylinder
		Planfläche	⑫	
Zugstab	4	Gewinde und Schaft	⑬	Zylinder

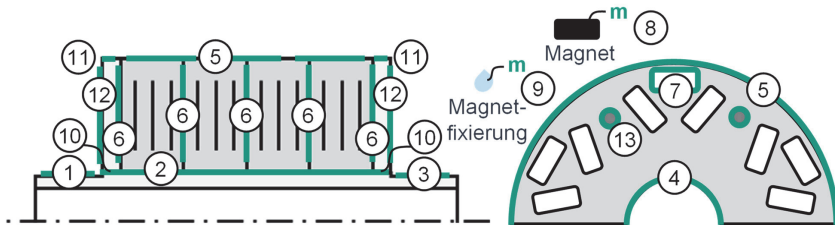


Abbildung 5-3: Darstellung der in Tabelle 5-3 aufgelisteten Geometrieelemente

Im nächsten Schritt werden an den in Tabelle 5-3 ausgewählten Geometrieelementen jeweils erwartete Fertigungsabweichungen analysiert: Hierzu werden die (DIN ISO 2768-2 1991; DIN ISO 2768-1 1991; DIN EN ISO Nr.1101 2017; DIN EN ISO 21920-1 2022; DIN EN ISO 21920-2 2022) definierten Fertigungsabweichungen klassifiziert und um eine Unwucht sowie eine Massenabweichung ergänzt. Tabelle A- 3 stellt im Anhang dar, welche Fertigungsabweichungen auf welche Geometrieelemente anwendbar sind. Aus dieser Gegenüberstellung sowie den 13 in Tabelle 5-3 gelisteten Geometrieelementen ergeben sich 117 mögliche Fertigungsabweichungen. Bei 12 von ihnen wird erwartet, dass sie unter Einwirkung der maximalen Rotordrehzahl (15.000 min^{-1}) und der maximalen Rotortemperatur ($150 \text{ }^{\circ}\text{C}$) direkt zu Verformungen und Relativbewegungen führen. Diese 12 Fertigungsabweichungen sind in Tabelle 5-4 aufgeführt. Sie wurden aufgrund folgender erwarteter Wirkzusammenhänge ausgewählt: Fertigungsbedingte Eigenspannungen der Rotorwelle können unter Drehzahl und Temperatur zu unsymmetrischen Verformungen der Welle und folglich einer Verlagerung der Blechpakete führen. Ein Koaxialitätsfehler des Trägers der Blechpakete kann unter Drehzahl eine zusätzliche Koaxialität bewirken. Unter Einwirkung von Fliehkräften ist eine Änderung des Planlaufs der Wuchtscheiben und Blechpakete zu erwarten. Planlauffehler können unter thermischer Belastung zu einer unsymmetrischen Verformung der Blechpakete und der Welle führen. Eine Delamination kann nach erhöhter Betriebsdauer zur Verlagerung einzelner Bleche führen. Das anisotrope Materialverhalten des Blechpakets sowie darin vorliegende Eigenspannungen können unter Drehzahl und Temperatur unsymmetrische Verformungen bewirken. Zudem wird erwartet, dass das viskoelastische Verhalten der stoffschlüssigen Magnetfixierung unter andauernder Einwirkung von Drehzahl und Temperatur Setzbewegungen der Magnete zulässt. Der Umfang dabei erwarteter Verformungen und Relativbewegungen wird in Abschnitt 5.2.3 quantifiziert.

Tabelle 5-4: Fertigungsabweichungen mit direktem Einfluss auf Verformungen und Relativbewegungen

Rotor-Komponente	Geometrie-element	Art der Fertigungs-abweichung	Eigenschaft
Rotorwelle	Träger Blechpakete	Werkstoff	Eigenspannung
		Ort	Koaxialität (für Mittellinien)
Wucht-scheibe	Planfläche	Lauf	Gesamtlauf an Blechpaket zugewandter Seite
			Delamination
Blechpaket	Allgemein	Werkstoff	Anisotropie
	Innen-durchmesser		Eigenspannung
	Außen-durchmesser	Ort	Koaxialität (für Mittellinien)
	Planfläche	Werkstoff	Anisotropie
		Lauf	Eigenspannung
		Lauf	Gesamtlauf Seite A
Magnet-fixierung	keine definierte Form	Werkstoff	Gesamtlauf Seite B
			Viskosität

5.2.2 Analyse erwarteter Montageabweichungen

Die in Abschnitt 5.2.1 als kritisch identifizierten 117 Fertigungsabweichungen werden in einem paarweisen Vergleich einander gegenübergestellt. Dadurch kann bewertet werden, ob die Interaktion zweier Fertigungsabweichungen zu einer Montageabweichung führt. Dabei werden nur die Interaktionen der Fertigungsabweichungen zweier Komponenten berücksichtigt, die im Rotor miteinander in Kontakt stehen. Bei 64 Interaktionen von Fertigungsabweichungen wird ein Einfluss auf Montageabweichungen erwartet. So führt bspw. eine Maßabweichung der Höhe der Magnet tasche zusammen mit einer Maßabweichung der Höhe des Magneten zu einer Lageabweichung des Magneten innerhalb der Magnet tasche. Ebenso können Zylindrizitätsfehler der Rotorwelle und des Innendurchmessers der Blechpakete eine ungleichmäßige Vorspannung der Welle-Nabe-Verbindung bewirken. Da Interaktionen unterschiedlicher Fertigungsabweichungen zu gleichen Montageabweichungen führen können, ist die Anzahl identifizierter Interaktionen (64) höher als die Anzahl erwarteter Montageabweichungen. Es ergeben sich 30 Montageabweichungen, deren Ursache in 33 unterschiedlichen Fertigungsabweichungen erwartet wird.

Zudem wird bewertet, welche Prozessabweichungen während der Magnetmontage und -fixierung sowie beim Fügen der Welle-Nabe-Verbindung auftreten können. Bei der

Magnetmontage und -fixierung wird eine Abweichung der Magnete von ihrer Soll-Position sowie ein inhomogener Auftrag der Magnetfixierung erwartet. Beim Fügen von Welle und Nabe wird mit einer nicht zentrischen und nicht planen Montage von Blechpaketen und Wuchtscheiben auf der Rotorwelle gerechnet. Hieraus resultieren sechs zu erwartende Montageabweichungen. Diese überdecken sich anteilig mit den 30 Montageabweichungen, die auf Interaktionen von Fertigungsabweichungen beruhen. Eine Gegenüberstellung ergibt die in Tabelle 5-5 zusammengefassten 21 Montageabweichungen.

Tabelle 5-5: Montageabweichungen, die aufgrund von Fertigungs- und Prozessabweichungen erwartet werden

Montageschritt	Montageabweichung
Magnetmontage und -fixierung	Fügespiel - Breite
	Fügespiel - Höhe
	Fügespiel - Länge
	Lageabweichung - Breite
	Lageabweichung - Höhe
	Gesamtlänge zweier Magnete
	Inhomogenität bei Auftrag
	Entmischung bei Auftrag
	Füllgrad der Kavitäten nach Aushärtevorgang
	Abweichung von Zeit-Temperatur-Profil bei Aushärtevorgang
Fügen der Welle- Nabe-Verbindung	Vorspannung der Verbindung bei Blechpaket
	Ungleichmäßige Vorspannung der Verbindung
	Exzentrische Position des Blechpakets
	Planlauf negatives Ende an mehreren Durchmessern des Blechpakets zu Bezug A-B
	Planlauf positives Ende an mehreren Durchmessern des Blechpakets zu Bezug A-B
	Gesamter Planlauf bzgl. A-B - Gegenseitige Beeinflussung
	Vorspannung der Verbindung bei Wuchtscheibe
	Exzentrische Position der Wuchtscheibe
	Gesamter Planlauf der Planfläche der Wuchtscheibe zu Bezug A-B
	Kontakt zwischen Magnet und Wuchtscheibe (bei überstehendem Magneten)
	Längenabweichung des gesamten Aktivteils

5.2.3 Ableitung erwarteter Verformungen und Relativbewegungen

Zur Identifikation der im Betrieb erwarteten Verformungen und Relativbewegungen werden die zuvor analysierten Fertigungs- und Montageabweichungen den im Betrieb auftretenden Belastungen gegenübergestellt. Die Belastungen umfassen eine mechanische Beanspruchung unter Drehzahl, eine thermische Belastung aufgrund sich einstellender Rotortemperatur sowie eine kombinierte, zeitlich andauernde Belastung. Hierbei wird die konservative Annahme getroffen, dass ein Versagen der Magnetfixierung möglich ist und der lamellare Aufbau der Blechpakete insbesondere in axialer Richtung eine geringe Steifigkeit aufweist.

So kann sich bspw. der Planauflfehler eines einzelnen Blechpakets unter Fliehkraft aufgrund einer elastischen Verformung verringern. Ebenso kann aus einer Lage-Abweichung der Magnete innerhalb der Magnettaschen unter andauernder mechanischer und thermischer Belastung eine Setzbewegung innerhalb der Magnettaschen auftreten. Die durchgeführte Gegenüberstellung ergibt insgesamt elf erwartete Verformungen und Relativbewegungen (Tabelle 5-6).

Tabelle 5-6: Im Betrieb erwartete Verformungen und Relativbewegungen der Rotorkomponenten

Rotorkomponente	Beschreibung
Welle	Unsymmetrische Aufweitung der Welle
	Unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets
Blechpaket	Axiale Verlagerung der Blechpakete
	Verkipfung des Blechpakets
Magnet	Setzen des Magneten (in Richtung der Höhe)
	Setzen des Magneten (in Richtung der Breite)
Magnetfixierung	Setzen der Magnetfixierung (Breite)
	Setzen der Magnetfixierung (Höhe)
Wuchtscheibe	Unsymmetrische Aufweitung der Wuchtscheibe
	Verkipfung der Wuchtscheibe
Zugstab	Setzen des Zugstabs (radial)

5.3 Quantifizierung erwarteter Verformungen und Relativbewegungen

Die in Abschnitt 5.2.3 erwarteten Verformungen und Relativbewegungen werden im Folgenden quantifiziert. Dies stellt den Zwischenschritt zur Berechnung erwarteter Unwuchtänderungen dar (Abbildung 5-4). In den folgenden Abschnitten erfolgt die Quantifizierung pro Komponente, an der laut Tabelle 5-6 kritische Verformungen und/oder Relativbewegungen erwartet werden.

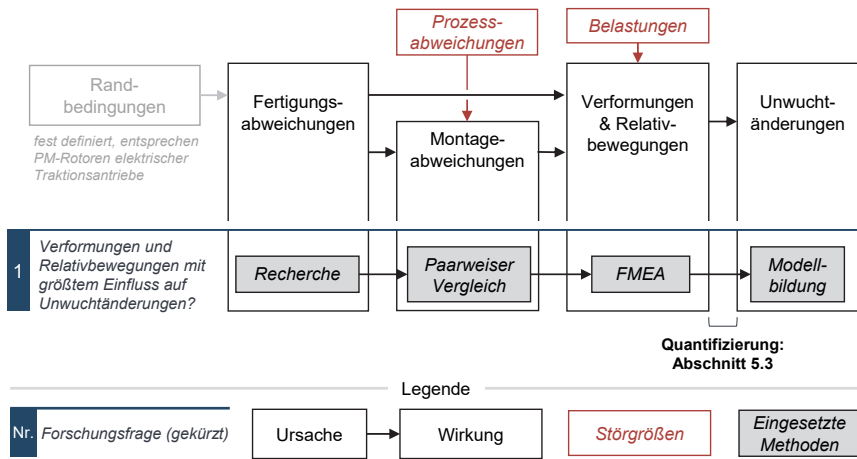


Abbildung 5-4: Quantifizierung von Verformungen und Relativbewegungen für die anschließende Berechnung erwarteter Unwuchtänderungen

5.3.1 Rotorwelle

Es wird erwartet, dass sich ein fertigungsbedingter Koaxialitätsfehler der Rotorwelle unter Einwirkung einer Fliehkraft erhöht. Zur Abschätzung der sich ergebenden zusätzlichen Exzentrizität erfolgt eine analytische Berechnung einer elastischen Biegung. Die sich aufgrund der Masse und der statischen Unwucht der Blechpakete ergebende Fliehkraft wird als radiale Linienlast angenommen. Unter Berücksichtigung der in 5.1 definierten Randbedingungen sowie einer Recherche der für diese Abmessungen zu erwartenden Fertigungsabweichungen werden die in Tabelle 5-7 aufgeführten Parameter verwendet. Nach 5-1 und 5-2 ergibt sich eine zusätzliche Exzentrizität von 1,096 µm. Um diesen Wert ist unter Fliehkraftbelastung eine radiale Translation der Gesamtheit der Blechpakete, Wuchtscheiben und Zugstäbe zu erwarten. Als konservative

Abschätzung bzw. Vereinfachung wird die eigentlich entlang eines Bogens auftretende radiale Biegung als parallele Verschiebung zur Rotationsachse modelliert. Die Winkel-lage dieser Exzentrizität wird als gleichverteilt zwischen 0° und 360° angenommen.

Tabelle 5-7: Parameter für die Berechnung der Durchbiegung der Rotorwelle

Rotor-Komponente	Parameter	Wert	Einheit
Rotorwelle	Außendurchmesser	50	mm
	Wandstärke	8	mm
	Art der Lagerung	Fest-Los-Lagerung	-
	Initiale Exzentrizität	3	µm
	E-Modul von 42CrMo4	210	GPa
	Lagerabstand	200	mm
Blechkpakete	Anzahl	4	-
	Statische Unwucht pro Blechkpaket	30	gmm
	Masse pro Blechkpaket	3,5	kg
Rotor	Drehzahl	15.000	min ⁻¹

$$w\left(\frac{l_b}{2}\right) = \frac{5 q l_b^4}{384 E I} \quad 5-1$$

$$w(100\text{mm}) = \frac{5 \cdot 2,66 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \cdot (200\text{mm})^4}{384 \cdot 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 2,41 \cdot 10^5 \text{mm}^4} = 1,096\mu\text{m} \quad 5-2$$

5.3.2 Blechkpaket

Am Blechkpaket werden eine unsymmetrische radiale Aufweitung, eine Verkipfung und eine Änderung der axialen Position auf der Rotorwelle erwartet. Zur Quantifizierung dieser Effekte werden zunächst an stanzpaketierten Blechkpaketen auftretende Fertigungsabweichungen analysiert. Hierzu wurden Angaben drei unterschiedlicher Hersteller stanzpaketierter Rotorblechkpakete eingeholt und gegenübergestellt (Abbildung 5-5 a). Dabei fällt auf, dass axial gerichtete Fertigungsabweichungen deutlich stärker ausgeprägt sind als radial gerichtete. Während radiale Konturen durch ein vergleichsweise präzise gefertigtes Stanzpaketierwerkzeug vorgegeben werden, unterliegen axiale Abmessungen des Blechkpakets Dickenschwankungen des Elektroblechs. Diese summieren sich über die 100 Bleche eines bspw. 30 mm hohen Blechkpakets mit Einzelblechen der Stärke 0,3 mm auf. Toleranzweiten der axialen Länge und des Planlaufs liegen hierdurch im Bereich mehrerer Zehntel Millimeter.

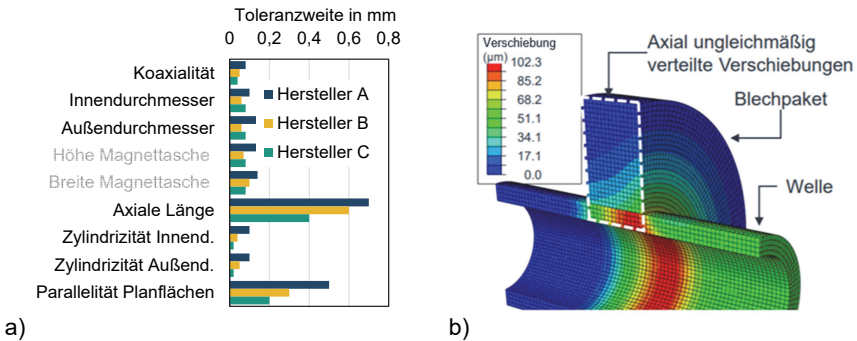


Abbildung 5-5: a) An einem stanzpaketierten Rotorblechpaket zu erwartende Fertigungsabweichungen, b) FE-Simulation der durch Fertigungsabweichungen des Blechpakets bedingten Verformungen

Zur Ermittlung der unter Rotation und Erwärmung am Blechpaket zu erwartenden unsymmetrischen Aufweitung und Verkipfung wird das Blechpaket mit seinen Fertigungsabweichungen in einem Finite-Elemente-Modell abgebildet. Für eine konservative Abschätzung der Fertigungsabweichungen werden dabei – mit Ausnahme der Magnettaschen – Maximalwerte der in Abbildung 5-5 a) dargestellten Befragungsergebnisse verwendet. Das Materialverhalten des Blechpakets wird mittels des in (Baloglu 2021, S. 164) erarbeiteten, homogenisierten Materialmodells eines stanzpaketierten Blechpakets abgebildet. Zur generalisierten Bewertung auftretender Verformungen wird das Blechpaket ohne Magnettaschen modelliert. In einem ersten Simulationsschritt erfolgt ein Aufschrumpfen des Blechpakets auf eine Hohlwelle. An dieser werden keine Fertigungsabweichungen modelliert, um Ursachen von unsymmetrischen Verformungen ausschließlich auf Fertigungsabweichungen des Blechpakets zurückführen zu können. In einem zweiten Simulationsschritt wird eine Drehzahl von 15.000 min^{-1} sowie eine homogen verteilte Rotortemperatur von 150 °C aufgeprägt. Es ergeben sich die in Abbildung 5-5 b) dargestellten, in axialer Richtung ungleichmäßigen Verformungen. Die elastische radiale Verlagerung des Blechpakets beträgt 27 µm . Die ebenfalls elastische Änderung des Planlaufs um $0,12 \text{ mm}$ auf dem Teilkreisdurchmesser 150 mm entspricht einer Verkipfung um $0,046^\circ$. Beide Berechnungsergebnisse werden in Abschnitt 5.4 für eine radiale Translation und eine Rotation einzelner Blechpakete verwendet. Die Winkellage der Änderung des Rundlaufs und des Planlaufs wird als jeweils gleichverteilt zwischen 0° und 360° angenommen. Es wird erwartet, dass diese Verformungen zunächst vorübergehend unter Belastung auftreten, aber aufgrund des in 3.3.2.1

beschriebenen anelastischen Verhaltens des Blechpakets auch einen plastischen Anteil hinterlassen. Der Anteil plastischer Verformungen wird in Kapitel 6 experimentell untersucht. Weitere Details zum Aufbau des Simulationsmodells werden in (A_Walter 2021) und (Wößner & Heim et al. 2021) vorgestellt.

Eine Abschätzung der erwarteten Veränderungen der axialen Länge einzelner Blechpakete erfolgt auf Basis der in (Luchscheider 2015, S. 50) durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Diese ergaben an einem Stapel von neun Elektroblechen der Materialstärke 0,65mm nach einer einmaligen Druckbelastung von 3 MPa zunächst eine mittlere axiale Stauchung von 0,752 %. Unter andauernder Druckbelastung von 3 MPa wurde nach 15 Stunden eine axiale Stauchung von ca. 1 % festgestellt. Es wird daher angenommen, dass während der Lebensdauer des Rotors eine dauerhafte axiale Stauchung der Blechpakete um bis zu 1 % auftreten kann. Die halbe Länge der Stauchung wird in Abschnitt 5.4 als axiale Translation des Massenmittelpunkts eines Blechpakets modelliert. Im Falle einer axialen Länge von 30 mm entspricht dies einer Translation um $30 \text{ mm} \cdot 1 \% \cdot 0,5 = 0,15 \text{ mm}$.

5.3.3 Magnete

An Magneten erwartete Relativbewegungen werden getrennt in Richtung der Breite, Höhe und Länge des Magneten quantifiziert. Die Höhe entspricht hierbei der Magnetisierungsrichtung des Magneten und die Länge seinem Abmaß in axialer Richtung (Abbildung 5-6). Nach Abbildung 5-5 a) ist für die Breite und Höhe der Magnettasche ein Toleranzfeld von $\pm 0,07 \text{ mm}$ zu berücksichtigen. Für die Breite, Höhe und Länge der Magnettaschen ist nach Angabe des Herstellers Ningbo Songke mit einem Toleranzfeld von $\pm 0,05 \text{ mm}$ zu rechnen. Unter der Annahme eines für die Magnetfixierung erforderlichen Mindestfügespalts von umlaufend 0,05 mm ergibt sich ein Fügenspiel von 0,1 bis 0,34 mm (Tabelle 5-8). Unter der Annahme, dass nach andauernder mechanischer und thermischer Belastung die Magnetfixierung versagt, kann die Setzbewegung in Richtung der Breite und der Höhe jeweils maximal 0,34 mm betragen (Abbildung 5-6). Aufgrund des Toleranzfelds $+0^{+0,6} \text{ mm}$ für die axiale Länge des Blechpakets ergibt sich ein axiales Fügenspiel von 0,1 bis 0,8 mm. Details zur Modellierung dieses Setzverhaltens werden in Abschnitt 5.4 vorgestellt. Da am Magneten keine axial wirkende mechanische und thermische Belastung erwartet wird, erfolgt keine Bewertung der in dieser Richtung möglichen Setzbewegungen.

*Tabelle 5-8: Mindest- und Maximalwerte des Fügespiels, die sich aus den Toleranzfeldern der Magnettasche und der Magnete ergeben.
OT = obere Toleranz, UT = untere Toleranz*

in mm	Blechpaket			Magnet			Fügespalt		
	Nenn	OT	UT	Nenn	OT	UT	Min	Nenn	Max
Breite	18	+0,07	-0,07	17,78	+0,05	-0,05	0,1	0,22	0,34
Höhe	5	+0,07	-0,07	4,78	+0,05	-0,05	0,1	0,22	0,34
Länge	30	+0,6	0	29,85	+0,05	-0,05	0,1	0,15	0,8

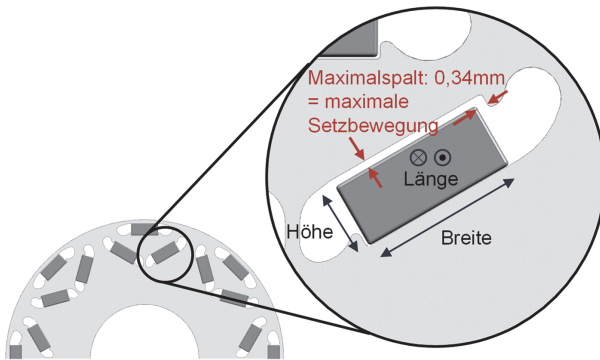


Abbildung 5-6: Definition der Breite, Höhe und Länge eines Magneten sowie Darstellung der aufgrund des Maximalspalts maximal möglichen Setzbewegung

5.3.4 Magnetfixierung

Analog zu Setzeffekten der Magnete werden auch an der Magnetfixierung Relativbewegungen ihres Massenmittelpunkts erwartet. Unter Berücksichtigung der gewählten produktseitigen Randbedingungen sowie einer Dichte der Magnetfixierung von $1,2 \text{ g/cm}^3$ ergibt sich pro Magnettasche eine Masse von 1 g. Zur konservativen Abschätzung einer inhomogenen Verteilung der Magnetfixierung wird für ihren Massenmittelpunkt pro Magnettasche eine Abweichung von maximal $\pm 0,1 \text{ mm}$ erwartet. Die Abweichung gilt jeweils in Richtung der Breite und Höhe der Magnettasche. Es wird angenommen, dass sich die Magnetfixierung in Richtung der Breite und Höhe des Magneten um denselben Betrag (bis zu 0,1 mm) setzen kann.

5.3.5 Wuchtscheibe

Aufgrund des im Gegensatz zum Blechpaket linear-elastischen und näherungsweise isotropen Materialverhaltens der druckgegossenen Aluminium-Wuchtscheiben werden

an ihnen deutlich geringere unsymmetrische Verformungen erwartet. Da die Wuchtscheiben in axialer Richtung allerdings in direktem Kontakt mit einem Blechpaket stehen, wird damit gerechnet, dass Verkipnungen der Blechpakete ebenfalls eine Verkipfung der Wuchtscheiben bewirken. Es wird daher konservativ angenommen, dass diese sich in gleichem Maße wie die Blechpakete verformen. Es wird daher eine unsymmetrische Aufweitung der Wuchtscheiben um bis zu 27 μm und eine Verkipfung um bis zu 0,046° erwartet (vgl. Abschnitt 5.3.2).

5.3.6 Zugstab

Aufgrund des innerhalb der Wuchtscheiben und Blechpakete vorhandenen Schraubenfreiraums wird bei der Montage der Zugstäbe eine Lage-Abweichung erwartet. Unter Annahme eines Schraubenfreiraums von 0,2 mm kann die Abweichung $\pm 0,1$ mm in radialer Richtung der Bohrung betragen. Im Falle einer Relaxation der Schraubverbindung wird erwartet, dass sich die Zugstäbe innerhalb ihrer Bohrungen unter Einwirkung einer Fliehkraft jeweils an die Position mit dem größten radialen Abstand zur Rotationsachse setzen. An den Zugstäben werden somit Relativbewegungen von bis zu 0,2 mm erwartet.

5.4 Bewertung zu erwartender Unwuchtänderungen

Im Folgenden soll der Einfluss quantifizierter Verformungen und Relativbewegungen auf im Betrieb erwartete Unwuchtänderungen bewertet werden (Abbildung 5-7). Hierzu wird zunächst ein analytisches Starrkörper-Modell aufgebaut, welches initiale Fertigungsabweichungen sowie erwartete Verformungen und Relativbewegungen abbildet und einen resultierenden Unwuchtzustand berechnet. Verformungen und Relativbewegungen werden als Translationen und Rotationen starrer Zylinder, Quader und Punktmassen modelliert. Ein numerischer Versuchsplan wird eingesetzt, um Einflüsse der jeweiligen Verformungen und Relativbewegungen auf die Änderung der Rotorunwucht zu berechnen. Diese werden in einem Pareto-Diagramm zusammengefasst und ermöglichen die Identifikation der Verformungen und Relativbewegungen mit dem stärksten Einfluss auf Unwuchtänderungen.

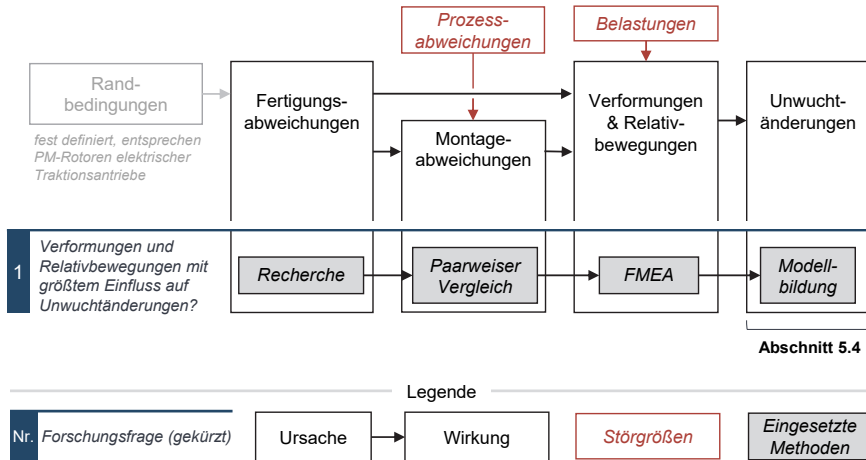


Abbildung 5-7: Bewertung zu erwartender Unwuchtänderungen

5.4.1 Modellierung möglicher Unwuchtänderungen

Zur Berechnung erwarteter Unwuchtänderungen wird das in (Peter 2018) validierte analytische Starrkörpermodell weiterentwickelt. Erweiterungen umfassen insbesondere die Flexibilisierung der Parametrierung der Rotorgeometrie sowie die Modellierung von Setzbewegungen der Magnete, Magnetfixierung und Zugstäbe. Die Implementierung erfolgt in der Software MATLAB.

Die in Abschnitt 5.3 quantifizierten Verformungen und Relativbewegungen werden in einem dreidimensionalen Starrkörpermodell eines PM-Rotors als Translation und Rotation seiner Komponenten abgebildet. Abbildung 5-8 a) stellt beispielhaft die modellierte Setzbewegung eines Magneten innerhalb seiner Magnettasche dar. Die Differenz zwischen dem Zustand des Rotors vor und nach der Aufprägung erwarteter Translationen und Rotationen ergibt die erwartete Unwuchtänderung. Sie wird wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben durch zwei unabhängige Vektoren $U_{\Delta A}$ und $U_{\Delta B}$ in beiden Lagerebenen dargestellt (Abbildung 5-8 b). Unter Verwendung der 2-13 bis 2-15 kann diese Unwuchtänderung für weitere Auswertungen in ihre Anteile einer statischen Unwucht und einer Momentenunwucht aufgeteilt werden.

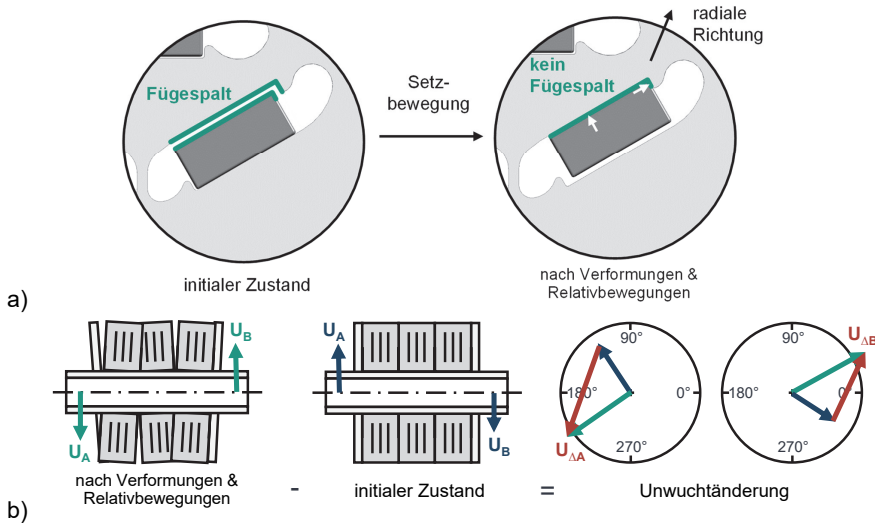


Abbildung 5-8: Zustand des modellierten Rotors vor und nach der Aufprägung von Translationen und Rotationen seiner Komponenten

5.4.2 Numerische Versuchsplanung

Zur Auswahl und Detaillierung eines geeigneten numerischen Versuchsplans werden zunächst Zielgrößen und Faktoren sowie deren Faktorstufen definiert. Als Zielgrößen werden die Beträge der Anteile der statischen Unwucht U_{AS} und der Momentenunwucht P_A der Unwuchtänderung ausgewählt. Die Winkellage dieser Änderungen wird zwar berechnet, ist aber zur Vereinfachung der späteren Auswertungen nicht Teil der Zielgrößen. Denn die Winkellage einer Unwucht wird in der Regel nicht bei der Frage berücksichtigt, ob die geforderte Wuchtgüte eingehalten wird. In Abschnitt 5.4.3 wird überprüft, ob der Ausschluss der Winkellagen aus den Zielgrößen eine zulässige Vereinfachung darstellt.

Die in Abschnitt 5.3 quantifizierten Verformungen und Relativbewegungen werden als Faktoren des numerischen Versuchsplans übernommen. Die Faktoren dienen jeweils zur statistischen Beschreibung der erwarteten Verformungen und Relativbewegungen. Die pro Faktor gewählten Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden in Tabelle 5-9 zusammengefasst. Grundsätzlich werden Normal-Verteilungen angenommen. Rayleigh-Verteilungen werden verwendet, wenn es sich um den Betrag eines zufällig verteilten Vektors handelt. Faktoren, die nur zwei unterschiedliche Werte annehmen können,

werden als Binomial-Verteilung abgebildet. Bei Rayleigh- und Normalverteilungen wird als maximale Faktorstufe die Standardabweichung derart gewählt, dass näherungsweise 95% der berechneten Verformungen und Relativbewegungen die quantifizierten Werte nicht überschreiten. Die maximale Standardabweichung der unsymmetrischen Aufweitung der Welle (0,548 μm) entspricht daher bspw. der Hälfte des in Abschnitt 5.3.1 ermittelten Wertes von 1,096 μm . Bei Binomialverteilungen beschreibt die gewählte Faktorstufe, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich bspw. ein einzelner Magnet setzt. Im Falle der Wahrscheinlichkeit = 1 setzen sich alle Magnete. Minimalwerte der Faktorstufen stellen jeweils die Hälfte des Maximums dar.

Tabelle 5-9: Für den numerischen Versuchsplan gewählte Faktoren und Faktorstufen

Bauteil	Beschreibung	Statistische Verteilung	Faktorstufen		Einheit
			Min.	Max.	
Welle	Unsymmetrische Aufweitung der Welle	Rayleigh	0,274	0,548	μm
Blechpaket	Unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets	Rayleigh	6,755	13,51	μm
	Axiale Verlagerung der Blechpakete	Normal	37,5	75	μm
	Verkipfung des Blechpakets	Normal	0,0116	0,0231	°
Magnet	Setzen des Magneten (in Richtung der Höhe)	Binomial	0,5	1	-
	Setzen des Magneten (in Richtung der Breite)	Binomial	0,5	1	-
Magnetfixierung	Setzen der Magnetfixierung (in Richtung der Breite)	Normal	0,025	0,05	mm
	Setzen der Magnetfixierung (in Richtung der Höhe)	Normal	0,025	0,05	mm
Wuchtscheibe	Unsymmetrische Aufweitung der Wuchtscheibe	Rayleigh	6,755	13,51	μm
	Verkipfung der Wuchtscheibe	Normal	0,0116	0,0231	°
Zugstab	Setzen des Zugstabs (in radiale Richtung)	Binomial	0,5	1	-

Als Versuchsplan wird ein definitives Screening ausgewählt, da dieses selbst bei einer hohen Anzahl an Faktoren eine effiziente Berechnung von Haupteffekten und Zweifachwechselwirkungen ermöglicht. Die Verwendung von drei Faktorstufen pro Faktor ermöglicht zudem die Darstellung nicht-linearer Zusammenhänge zwischen Faktoren und Zielgrößen. Weitere Details zum Aufbau von definitiven Screening-Versuchsplänen können (Siebertz & van Bebber et al. 2017) entnommen werden. Da die Faktoren statistisch verteilte Eigenschaften eines Rotors beschreiben, sind mehrere Replikationen derselben Faktorkombination zu berechnen. Eine Konvergenzanalyse der pro Faktorkombination gewählten Replikationen ergibt eine Mindestanzahl von 400 Replikationen. Ab dieser Anzahl an Replikationen tritt bei erneuter Ausführung der Berechnungen keine Änderung der Reihenfolge der wichtigsten Haupteffekte auf.

5.4.3 Ergebnisse des numerischen Versuchsplans

Eine im Betrieb erwartete Änderung der statischen Unwucht wird maßgeblich durch eine unsymmetrische radiale Aufweitung der Blechpakete hervorgerufen (Abbildung 5-9). Einflüsse weiterer Verformungen und Relativbewegungen – darunter auch Setzeffekte der Magnete – liegen unterhalb der Signifikanzgrenze von 1,96 gmm. Der vergleichsweise geringe Einfluss von Setzbewegungen der Magnete liegt vermutlich darin, dass ihre initiale Lageabweichung innerhalb des Rotors statistisch verteilt ist und sich somit die Unwuchtbeiträge ihrer Setzbewegungen gegenseitig kompensieren. Zudem stellen die Magnete mit 11 % im Vergleich zu den Blechpaketen (73 %) einen relativ geringen Anteil der Rotormasse dar. Kann während der Magnetmontage allerdings keine symmetrisch verteilte Lage der Magnete um ihre Soll-Lage sichergestellt werden, muss mit einem höheren Einfluss von Setzbewegungen auf Unwuchtänderungen gerechnet werden. Dies ist der Fall, wenn die Magnete durch Handhabungsprozesse vor ihrer Fixierung bspw. unter Einwirkung der Schwerkraft oder starker Beschleunigungen in eine Vorzugslage gebracht werden.

Eine Verkipfung der Blechpakete ist die stärkste Einflussgröße bezüglich der Änderung der Momentenunwucht (Abbildung 5-10). Dies entspricht einer Änderung ihres Planlaufs. Nahezu ebenso stark ausgeprägt ist der Einfluss einer unsymmetrischen Aufweitung der Blechpakete: Die statistisch gleichverteilte Winkellage der unsymmetrischen Aufweitung der Blechpakete führt entlang der Rotationsachse zu einer Änderung der Momentenunwucht. Der Einfluss des Setzens der Magnete in Richtung der Höhe erreicht nicht die Signifikanzgrenze. Der Einfluss soll aber aufgrund seiner Nähe zur

Signifikanzgrenze in weitere Untersuchungen einbezogen werden. Sowohl bezüglich der statischen Unwucht als auch bezüglich der Momentenunwucht ist bei keinem Faktor ein Einfluss auf die Winkellage der Unwuchtänderung zu erkennen. Die zuvor gewählte Vereinfachung, die Winkellage nicht als Zielgröße zu verwenden, ist somit zulässig.

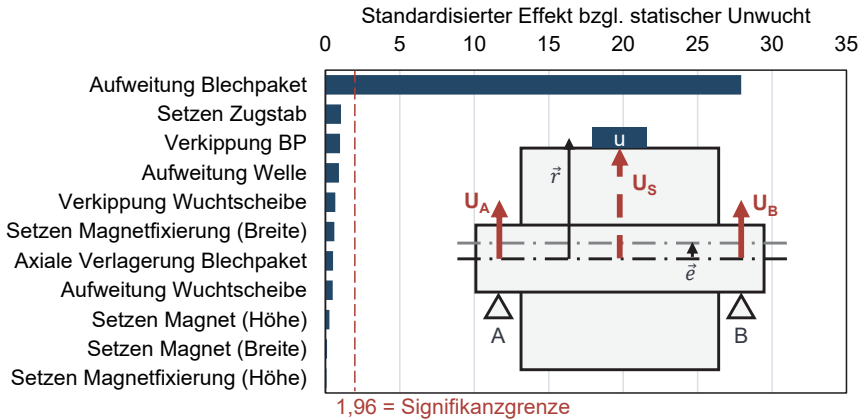


Abbildung 5-9: Einflüsse erwarteter Verformungen und Relativbewegungen auf die Änderung der statischen Unwucht

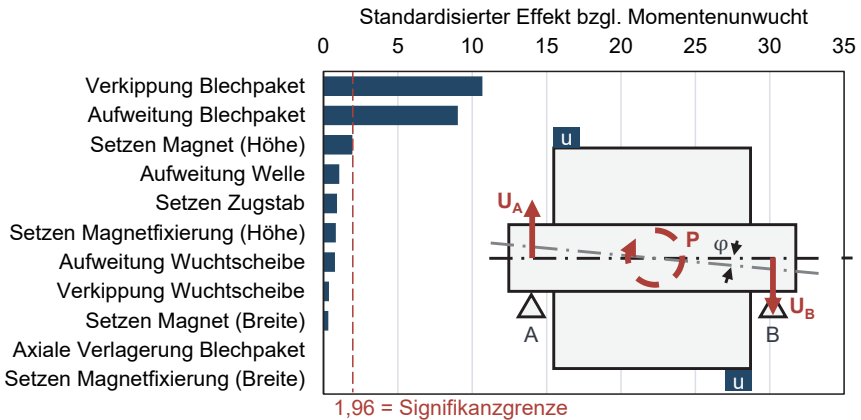


Abbildung 5-10: Einflüsse erwarteter Verformungen und Relativbewegungen auf die Änderung der Momentenunwucht

5.5 Zusammenfassung

Basierend auf PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe, die aktuell industriell hergestellt werden, erfolgte die Definition produkt- und prozesseitiger Randbedingungen. Es wurden elf Verformungen und Relativbewegungen identifiziert, die aufgrund von Fertigungs-, Montage- und Prozessabweichungen unter Einwirkung von Fliehkraft, Temperatur und Betriebsdauer zu Unwuchtänderungen führen können. Entsprechend der Berechnungsergebnisse eines analytischen Starrkörpermodells wird eine Änderung der statischen Unwucht maßgeblich durch eine unsymmetrische Aufweitung der Blechpakete verursacht. Aufgrund ihrer pro Blechpaket zufälligen Winkellage wirkt sich die Aufweitung gleichzeitig signifikant auf eine Änderung der Momentenunwucht aus. Eine Änderung der Momentenunwucht wird nahezu ebenso stark durch eine Verkipfung des Blechpakets und in geringem Maße durch Setzbewegungen der Magnete beeinflusst. Die erste Forschungsfrage wird somit folgendermaßen beantwortet und in Abbildung 5-11 grafisch zusammengefasst.

Forschungsfrage 1:

*Welche **Verformungen und Relativbewegungen** weisen den **größten Einfluss** auf im Betrieb **erwartete Unwuchtänderungen** auf?*

1. *Unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets* (Abbildung 5-11 a)
2. *Verkipfung des Blechpakets bzw. Änderung seines Planlaufs* (Abbildung 5-11 b)
3. *Setzbewegung der Magnete in Richtung der Höhe* (Abbildung 5-11 c)

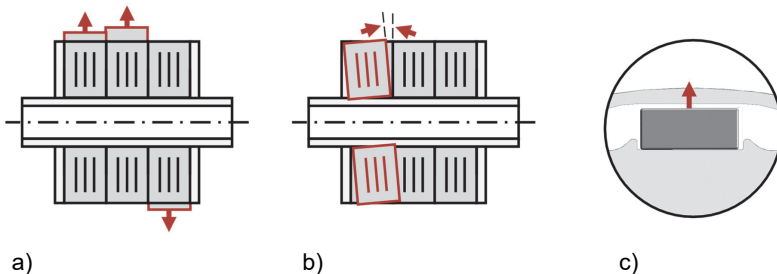


Abbildung 5-11: Als besonders kritisch identifizierte Verformungen und Relativbewegungen: a) unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets, b) Verkipfung des Blechpakets und c) Setzbewegung der Magnete in Richtung der Höhe

6 Validierung auftretender Unwuchtänderungen

In diesem Kapitel wird untersucht, unter welchen Belastungen die drei in Abbildung 5-11 dargestellten Verformungen und Relativbewegungen vorübergehend und/oder dauerhaft auftreten. Zudem wird analysiert, durch welche Fertigungs- und Montageabweichungen diese begünstigt werden. Ergebnisse werden durch die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage in Abschnitt 6.8 zusammengefasst.

6.1 Auslegung einer Referenzgeometrie

Die in Abschnitt 5.5 als kritisch identifizierten Verformungen und Relativbewegungen stellen Verformungen des Blechpakets oder Relativbewegungen innerhalb seiner Magnet Taschen dar. Bei der Auslegung der Referenzgeometrie, die für die folgenden experimentellen Untersuchungen eingesetzt wird, liegt daher der Fokus auf der Nachbildung des mechanischen Verhaltens des Blechpakets. Dies bedeutet insbesondere, dass das Blechpaket durch eine Stanzpaketierung, einen sogenannten Interlock, zu paketieren ist. Details der in Abbildung 6-1 dargestellten Referenzgeometrie werden im Folgenden vorgestellt.

Zur Reduzierung von Werkzeugkosten, die mit einem Stanzpaketierwerkzeug verbunden sind, wird ein modularer Paketierprozess der Püttmer GmbH gewählt. Bei diesem erfolgt die Herstellung der Einzelbleche durch Laserschneiden, gefolgt von einem

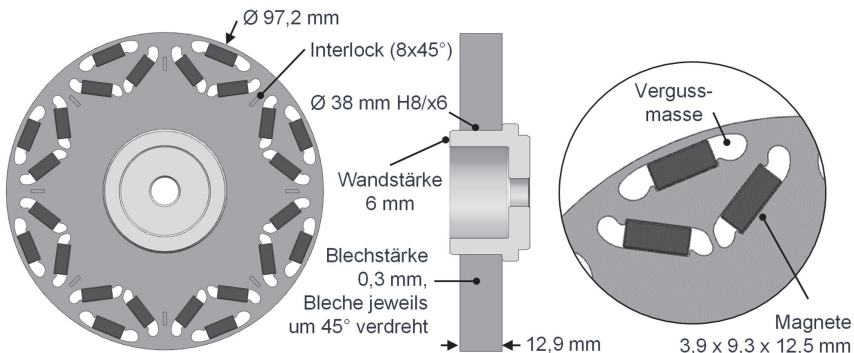


Abbildung 6-1: Konstruktion einer Referenzgeometrie zur experimentellen Validierung an einzelnen Blechpaketen erwarteter Relativbewegungen und Verformungen

automatisierten Paketieren mittels Interlock.¹¹ Dabei kann auf ein bestehendes Paketierwerkzeug zurückgegriffen werden. Dieses definiert einen Außendurchmesser von 97,2 mm sowie die Positionen und Abmessungen der acht Interlocks. Zur Kompensation von Dickenschwankungen der Einzelbleche wird beim Paketieren ein automatisches Verdrehen aller Bleche um jeweils 45° gewählt. Der Innendurchmesser der Referenzgeometrie wird in Anlehnung an das Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser des Rotors des VW ID.3 auf 38 mm festgelegt.

Für die Magnete werden die Abmessungen 3,9 x 9,3 x 12,5 mm gewählt. Diese stimmen mit Abmessungen überein, die im DFG-Projekt Optima¹² eingesetzt wurden. Dadurch soll eine Vergleichbarkeit neuer Erkenntnisse mit bereits durchgeführten Untersuchungen ermöglicht werden. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.1 definierten Blechstärke von 0,3 mm, den Fertigungstoleranzen der Magnete ($\pm 0,05$ mm) und des Paketierprozesses ($\pm 0,3$ mm) ergibt sich für die axiale Höhe des Blechpakets ein Nennmaß von 12,9 mm. Als Elektroband wird NO30-1500H¹³ der Tata Steel Private Limited Company verwendet.

Die Gestaltung der in 5.1 definierten Delta-Anordnung der Magnete erfolgt unter Berücksichtigung mechanischer und thermischer Randbedingungen. Da an den Magneten im Rahmen dieser Arbeit kein Magnetisierungsprozess und folglich kein Betrieb in einem Stator erfolgt, wird auf eine elektromagnetische Auslegung der Referenzgeometrie verzichtet. Die Magnettaschen werden dennoch in Anlehnung an die Anordnung der Magnete des Antriebs des VW ID.3 gestaltet, um eine industrielle Relevanz der Magnetanordnung sicherzustellen. Die Stegbreite wird so weit reduziert, bis bei dem 1,2-fachen der maximalen Drehzahl ($1,2 \cdot 15.000 \text{ min}^{-1} = 18.000 \text{ min}^{-1}$) eine Vergleichsspannung von 355 MPa erreicht wird. Dies ermöglicht es, das Blechpaket nicht nur aus dem Elektroband NO30-1500H herzustellen, sondern auch als Vollkörper aus Stahl der Güte S355 zu fertigen. Zur Vermeidung lokaler Spannungsüberhöhungen eines Formschlusses wird ein rein zylindrischer Querpressverband ausgewählt. In Anlehnung an Übermaße, die üblicherweise bei PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe eingesetzt

¹¹ Püttmer GmbH (2023), *Sondermaschinenbau zur Bearbeitung von Elektroblechen*. <https://www.puettmer-gmbh.de/produkte/sondermaschinenbau> [03.10.2023]

¹² Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer (2020), *Modellbasierte Montageoptimierung zur unwuchtminimalen Produktionsautomatisierung von E-Motoren*, DFG – Projektnummer 350459107. <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/350459107> [23.10.2023]

¹³ Tata Steel Private Limited Company (2023), *NO30-1500H Data sheet, thin non-oriented electrical steel*. <https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/tata-steel-hi-lite-electrical-steel-no30-1500h-datasheet-en.pdf> [23.10.2023]

werden, wird die Passung 38 H8/x6 ausgewählt. Diese Passung entspricht auf dem Nenndurchmesser von 38 mm einem Übermaß von 41 µm bis 96 µm.

Die Welle der Referenzgeometrie wird als Hohlwelle ausgeführt. Für ihre Wandstärke wird mit 5 mm zum Außendurchmesser 38 mm ein ähnliches Verhältnis gewählt wie beim in 5.1 definierten Verhältnis von 8 mm zu 50 mm. Auch bei maximalem Übermaß wird bei dieser Wandstärke die Streckgrenze von 480 MPa für 42CrMo4 (DIN EN 10132:2022 2022) nicht überschritten. Die Welle wird in zwei axialen Längen konstruiert, um sowohl ein als auch zwei Blechpakete aufnehmen zu können.

Da auch ein automatisches Einlegen unmagnetisierter Magnete zu einer zufälligen Lage dieser in den Magnettaschen führt, werden die Magnete manuell eingelegt (Abbildung 6-2). Es wird zur rein stoffschlüssigen Fixierung das Epoxydharz Elan-tron® EC 5000 mit dem Härter W 5690 der ELANTAS GmbH eingesetzt, da diese Kombination bereits in industriellen Verguss-Prozessen zur Fixierung von Magneten eingesetzt wird. Mit einer zeitgesteuerten, pneumatischen Dosiereinheit wird pro Magnettasche 0,47 g Vergussmasse eingefüllt und anschließend ein Magnet eingelegt. Unter Einwirkung der Schwerkraft sinkt der Magnet in die Magnettasche ab und verdrängt dabei die Vergussmasse in die Hohlräume der Magnettasche. Überschüssiger Klebstoff wird an der Oberfläche des Blechpakets mit einem Tuch entfernt. Die Unterseite des Blechpakets ist mit zwei Lagen einer Teflon-Folie abgedichtet, an die das Blechpaket mit einer axialen Schraube gepresst wird. Die Magnettaschen werden im Gegensatz zum industriellen Standard nicht unter Druck mit der Vergussmasse gefüllt, um den Spannungszustand des Blechpakets möglichst nicht zu verändern. Die Aushärtung der Vergussmasse erfolgt in einem Ofen für drei Stunden bei 120 °C, um eine Glasübergangstemperatur von 135-145 °C zu erreichen.¹⁴

¹⁴ ELANTAS Gruppe (2023), *Technisches Datenblatt Elan-tron® EC 5000/W 5690*. <https://scheining.de/wcms/ftp/s/scheining.de/uploads/elan-tron-ec5000.pdf>, [03.10.2023]

Funktionen	Ausprägungen	gewählte Kombination			industrieller Standard
Magnetisierung	unmagnetisiert	magnetisiert			
Magnet einlegen	manuell	automatisch			
Prinzip der Magnetfixierung	Formschluss	Kraftschluss	Stoffschluss		Kraft- & Stoffschluss
Werkstoff der Magnetfixierung	2K-Klebstoff	2K-Epoxidharz	Elektroblech		Federstahl
Einfüllen der Magnetfixierung	drucklos	unter Druck			
Aushärten	bei Raumtemperatur	durch UV-Strahlung	thermisch unterstützt		

Abbildung 6-2: Gewählter Prozess zur Magnetmontage und -fixierung im Vergleich zum industriellen Standard

Die Wellen und das Blechpaket werden – entsprechend des industriellen Standards – in vertikaler Orientierung gefügt (Abbildung 6-3). Es wird ein einzelnes Blechpaket gefügt, um Veränderungen an diesem ohne den Einfluss anderer Blechpakete beobachten zu können. Zur Herstellung des Kraftschlusses wird das Blechpaket in einem Ofen innerhalb von 45 min auf 150 °C erwärmt und die Welle in flüssigem Stickstoff innerhalb einer Minute auf ca. -150 °C abgekühlt. Auf eine zusätzliche formschlüssige Verbindung, die beim Ausfall der kraftschlüssigen Verbindung die Drehmomentübertragung sicherstellen könnte, wird verzichtet. Hierdurch sollen Störeinflüsse von Kerbwirkungen in Passfedernuten vermieden werden. Das Blechpaket wird von Hand auf der Welle eingefädelt und auf der axialen Schulter der Welle abgelegt. Somit kann sich das Blechpaket während des Schrumpfprozesses sowohl axial als auch radial selbständig ausrichten. Es werden keine zusätzlichen Vorrichtungen eingesetzt, die das Blechpaket in seiner Bewegungsfreiheit einschränken würden. Ein Zusammenbau aus einem Blechpaket bzw. einem Stahlkörper und einer Welle wird im Folgenden vereinfacht als *Prüfkörper* bezeichnet.

Funktionen	Ausprägungen	● - - - ● gewählte Kombination			industrieller Standard
Orientierung der Welle	vertikal	horizontal			
Anzahl Fügepartner auf der Welle	einzelnes Blechpaket	alle Blechpakete und Wuchtscheiben eines Rotors			
Prinzip der Wellen-Nabe-Verbindung	nur Formschluss	nur Kraftschluss	nur Stoffschluss	Form- und Kraftschluss	
thermische Unterstützung	keine	Welle abkühlen	Blechpaket erwärmen	Welle abkühlen und Blechpaket erwärmen	
axiale Ausrichtung	durch Schwerkraft bis Wellenschulter	durch Schwerkraft bis Werkzeug	von Fügeachse auf Position gefahren	von Fügeachse axial verpresst	
radiale Zentrierung	Selbstzentrierung	radiale Einspannung			

Abbildung 6-3: Gewählter Prozess zur Herstellung der Welle-Nabe-Verbindung im Vergleich zum industriellen Standard

Die Referenzgeometrie wird mit und ohne Magnettaschen sowohl als Stahlkörper als auch als Blechpaket hergestellt. Dies soll bei der späteren Auswertung der Versuchsergebnisse die Differenzierung zwischen Effekten ermöglichen, die mit und ohne geblechten Aufbau der Referenzgeometrie auftreten. Blechpakete ohne Magnettaschen ermöglichen zudem eine detaillierte Untersuchung ihres anelastischen Materialverhaltens. Es ergeben sich die in Abbildung 6-4 dargestellten Arten von Prüfkörpern. Der in Abbildung 6-4 unten links dargestellte Stahlkörper mit Magnettaschen besitzt am Außendurchmesser fertigungsbedingt zwei gegenüberliegende Abflachungen. Diese wurden für eine verbesserte Einspannung in Fräs- und Erodierprozessen verwendet.



Abbildung 6-4: Für experimentelle Validierung ausgelegte und hergestellte Prüfkörper

6.2 Zielsetzungen, Messgrößen und Belastungsparameter der experimentellen Validierung

Zunächst sollen Fertigungs- und Montageabweichungen quantifiziert werden, die an den Komponenten der Referenzgeometrie auftreten. Daraufhin soll untersucht werden, in welchem Maße in Schleuderversuchen vorübergehende und dauerhafte Verformungen und Relativbewegungen der Prüfkörper auftreten. Zudem soll analysiert werden, wie sich diese auf eine Änderung der Rotorunwucht auswirken und durch welche Fertigungs- und Montageabweichungen sie begünstigt werden. Gewonnene Messdaten sollen hierfür einerseits statistisch ausgewertet und andererseits Korrelationsanalysen unterzogen werden. Zur automatisierten Identifikation besonders starker Korrelationen wird ein Python-Programm entwickelt, welches innerhalb der Messdaten aus allen möglichen Einfach-Korrelationen die Korrelationen nach dem Betrag ihres Korrelationskoeffizienten sortiert. Zur Messung der unsymmetrischen radialen Aufweitung und Verkipfung des Blechpakets ist eine Messung der Änderung des Rund- und Planlaufs des

Blechkpakets notwendig. Setzbewegungen der Magnete sollen durch eine Unwuchtmessung erfasst werden. Zudem ermöglicht eine Unwuchtmessung die Bewertung des Einflusses von Änderungen des Rund- und Planlaufs auf die Unwucht eines Prüfkörpers. Unwucht, Rundlauf und Planlauf sollen pro Prüfkörper jeweils vor, während und nach einem Schleuderversuch gemessen werden.

Zur Nachbildung mechanischer und thermischer Lasten wird für einen Schleuderprüfstand eine Maximaldrehzahl von 15.000 min^{-1} und eine maximale Rotortemperatur von 150 °C definiert. Zudem ist ein sicherer und automatischer Betrieb des Prüfstands über mindestens 10 Minuten erforderlich, um Effekte beobachten zu können, die erst nach andauernder Belastung auftreten. Um den zeitlichen Verlauf dauerhafter Verformungen und Relativbewegungen erfassen zu können, wird ein Drehzahlprofil definiert, bei welchem vor, zwischen und nach Belastungsläufen eine vergleichsweise niedrige Referenzdrehzahl angefahren wird. Dieser Prüfablauf wird im Folgenden als *Schleuderversuch* bezeichnet. Er enthält fünf Belastungsläufe bei 15.000 min^{-1} und sechs Referenzläufe bei 2.000 min^{-1} . Die Drehzahlen werden jeweils für 15 Sekunden gehalten. Nur der erste und letzte Referenzlauf werden auf 40 Sekunden verlängert, um insbesondere dort den Einfluss zufälliger Messabweichungen zu reduzieren. Ein Schleuderversuch soll mit und ohne Temperaturbelastung durchgeführt werden können.

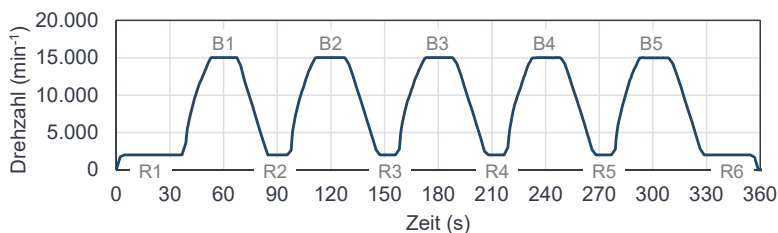


Abbildung 6-5: Drehzahlprofil eines Schleuderversuchs
(Referenzläufe: R1 bis R6 und Belastungsläufe B1 bis B5)

6.3 Aufbau eines Schleuderprüfstands

In Anlehnung an (VDI Nr.2221 1993, S. 9) werden zunächst Anforderungen an den Schleuderprüfstand analysiert und in eine Funktionsstruktur überführt. Die Funktionsstruktur wird unter anderem durch die Integration erforderlicher Antriebs- und Messtechnik konstruktiv umgesetzt. Nach Abschluss des Aufbaus und der Inbetriebnahme des Prüfstands werden dort zu berücksichtigende Messabweichungen bewertet.

6.3.1 Anforderungen und Funktionsstruktur

Als maximale Abmessungen des Prüfkörpers werden die in 5.1 definierten produktseitigen Randbedingungen berücksichtigt. Die in Tabelle 6-1 gelisteten Messgenauigkeiten sollen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % eingehalten werden. Sie stellen somit die erweiterte Messunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ der jeweiligen Messgröße dar. Anforderungen an die Lebensdauer, die Bedienung und die Betriebssicherheit des Prüfstands werden ebenfalls in Tabelle 6-1 definiert.

Tabelle 6-1: Anforderungen an den Schleuderprüfstand

Kategorie	Anforderung	Wert	Einheit
Belastungen	Max. Drehzahl	15.000	min ⁻¹
	Max. Beschleunigung	1.000	min ⁻¹ /s
	Max. Temperatur	150	°C
	Max. Dauer	10	min
Messgrößen	Unwuchtänderung - Genauigkeit Betrag	±0,5	gmm
	Unwuchtänderung - Genauigkeit Winkel bei Referenzdrehzahl 2.000 min ⁻¹	±10	°
	Rundlaufänderung - Genauigkeit Betrag	±0,002	mm
	Planlaufänderung - Genauigkeit Betrag	±0,002	mm
Prüfkörper	Max. Außendurchmesser	170	mm
	Min. Innendurchmesser	38	mm
	Max. axiale Höhe	50	mm
	Max. Gewicht	5	kg
Weiteres	Min. Lebensdauer der Lagerung	100	h
	Max. Zeit für Austausch des Prüfkörpers	5	min
	Grafische Oberfläche und automatische Datenspeicherung		
	Sicherheit gegen unerwartetes Bersten des Prüfkörpers		
	Sicherheit gegen Überlastung des Antriebs		

Es wird die in Abbildung 6-6 dargestellte Funktionsstruktur abgeleitet. Die Antriebseinheit, die Spindellagerung sowie die Aufnahme des Prüfkörpers sollen eine Fliehkraftbelastung mit ausreichender Beschleunigung erzeugen. Eine Sicherheitskupplung zwischen Antrieb und Spindellagerung schützt den Antrieb vor mechanischer Überlastung. Die geforderte Temperatur wird durch eine Heizeinheit aufgeprägt. Eine präzise Ausführung der Spindellagerung sowie die Integration eines Kraftsensors soll einen Betrieb über die geforderte Versuchsdauer sowie eine möglichst genaue Unwuchtmessung ermöglichen. Eine hochfrequente Erfassung des Nulldurchgangs der Spindel dient zur Bestimmung der Winkellage der drei geforderten Messgrößen. Der Rund- und Planlauf

des Prüfkörpers wird über einen radial sowie einen axial ausgerichteten Sensor gemessen. Die Sensoren erfassen jeweils berührungslos einen Abstand zur Oberfläche des Prüfkörpers. Die Möglichkeit, die Aufnahme des Prüfkörpers nach dessen Einbau auszuwuchten, soll einen ruhigen Lauf sowie eine hohe Lebensdauer der Spindellagerung sicherstellen. Eine ausreichend große Prüfkammer mit zweilagiger Schutzumhausung sowie eine geeignete Aufnahme sollen das Schleudern von Prüfkörpern mit den gewünschten Abmessungen und Massen ermöglichen. Zur Vereinfachung des Ein- und Ausbaus eines Prüfkörpers wird ein vertikaler Aufbau des Prüfstands gewählt. Hierdurch wird zudem vermieden, dass an der Spindellagerung wirkende Gewichtskräfte sich auf die am Kraftsensor gemessene Radialkraft auswirken. Zudem erleichtert der vertikale Aufbau bei der Inbetriebnahme die koaxiale Ausrichtung des Antriebs zur Spindellagerung.

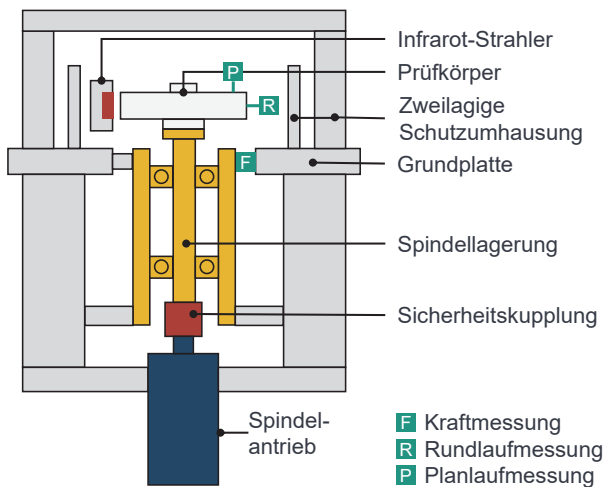


Abbildung 6-6: Funktionsstruktur des Schleuderprüfstands

6.3.2 Konstruktive Umsetzung

Zunächst wird die Antriebseinheit ausgewählt sowie die Spindellagerung dimensioniert und konstruiert. Unter Berücksichtigung der erforderlichen Maximaldrehzahl, Beschleunigung, Versuchsdauer und Lebensdauer des Prüfstands wird der Spindeltrieb HFP-10040-30-ER20 der mechatron GmbH ausgewählt. Zur Ansteuerung und Kühlung des Antriebs sollen der Frequenzumrichter 3G3MX2-A4040-E der OMRON Corporation und

das Kühlgerät KTA 700 der mechatron GmbH verwendet werden. Als Wälzkörper werden die Hochgeschwindigkeits-Spindellager HCM7008-C-2RSD-T-P4S-XL der Schaeffler AG ausgewählt. Durch ihre keramischen Wälzkörper, ihre beidseitige Abdichtung sowie die Ausführung mit eingengten Toleranzen sollen sie eine besonders hohe Lebensdauer der Spindellagerung gewährleisten. Sie werden in einer doppelreihigen, federnd vorgespannten O-Lagerung angeordnet. Zur Überwachung der Lagertemperatur werden Temperatursensoren in das Spindelgehäuse integriert. Der Antrieb und die Spindellagerung sind durch eine Metallbalgkupplung mit Drehmomentbegrenzung der R+W Antriebselemente GmbH verbunden. Weitere Details zur Auswahl des Spindelantriebs sowie zur Auslegung und Konstruktion der Spindellagerung können (A_Lalla 2020) entnommen werden.

Zur berührungslosen Erwärmung des Prüfkörpers wird ein Infrarot-Zwillings-Strahler (0,6 kW) der Optron GmbH mit zugehörigem Leistungssteller PLS1-2 (max. 2 kW) ausgewählt. Das Pyrometer IN720 desselben Herstellers soll die am Prüfkörper eingestellte Temperatur erfassen. Im Vergleich zu einem konvektiven Prinzip soll mit den Infrarotstrahlern eine energieeffiziente Aufheizung des Prüfkörpers ermöglicht werden. Im Vergleich zu einer induktiven Erwärmung sind die Anschaffungskosten des Infrarot-Strahlers geringer sowie die Flexibilität gegenüber unterschiedlichen Abmessungen von Prüfkörpern höher. Weitere Einzelheiten der Auslegung der Temperaturregelung werden in (A_Wessollek 2021) vorgestellt.

Die Auswahl eines Kraftsensors und eines zugehörigen Messverstärkers, die gemeinsam zur Messung einer Unwuchtänderung eingesetzt werden sollen, erfolgt unter Berücksichtigung erwarteter Fliehkräfte und geforderter Messgenauigkeiten. Es wird ein piezokeramischer Sensor des Typs 9217A und ein Ladungsverstärker Typ 5018A ausgewählt. Beide sind Produkte der Kistler Gruppe. Abbildung 6-7 stellt das Konzept der Blattfedern vor, die die Unwucht und Rotation des Prüfkörpers in eine am Kraftsensor gemessene Zug-Druck-Kraft umwandeln. Die Auslegung der Blattfedern sowie die konstruktive Anbindung des Kraftsensors an die Spindellagerung werden in (A_Seiffert 2021) detailliert vorgestellt. Der Einfluss der Blattfedersteifigkeit auf die gemessenen Zug-Druck-Kräfte wird in Abschnitt 6.3.5 durch den Einsatz von Testmassen in Referenzmessungen berücksichtigt. Zur Steigerung der mechanischen Steifigkeit des Prüfstands wird nur ein Sensor in einer Messebene vorgesehen. Die Messebene befindet sich möglichst nah am Prüfkörper.

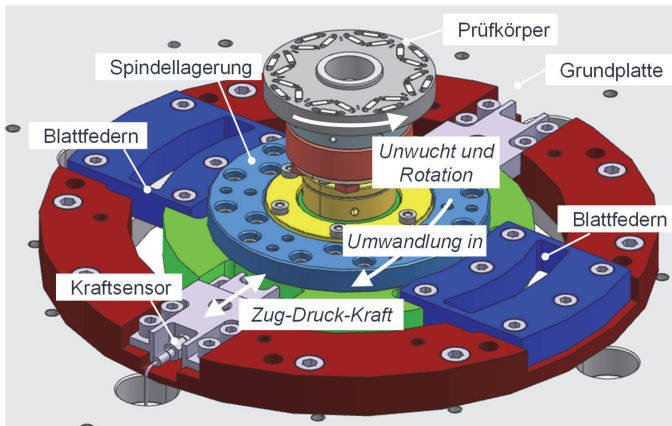


Abbildung 6-7: Blattfedern wandeln die Unwucht und Rotation des Prüfkörpers in eine am Kraftsensor gemessene Zug-Druck-Kraft um

Zur möglichst genauen Erfassung einer Änderung des Rundlaufs wird ein chromatisch konfokaler Sensor mit entsprechendem Controller ausgewählt (Sensor 5005126 mit CHRcodile 2 S HS der Precitec Optronik GmbH). Der Sensor ermöglicht die optische Erfassung des Abstands zwischen dem Sensorkopf und dem Außendurchmesser des Prüfkörpers. Da keine Bestimmung des absoluten Rundlaufs, sondern nur dessen Änderung erforderlich ist, wird auf die Verwendung eines zweiten, gegenüberliegenden Rundlaufsensors verzichtet.

Für die Messung des Planlaufs wird ein Lasertriangulationssensor ausgewählt. Die am Sensor LJ-V7060 der Keyence Corporation erfassten Daten werden an den Controller LJ-X8000A (ebenfalls Keyence) übergeben. Die konstruktive Einbindung des Planlaufsensors in die Prüfkammer erfolgt in (A_Wessollek 2021). Die Controller bzw. Ladungsverstärker der Sensoren zur Unwucht-, Rundlauf- und Planlaufmessung werden derart ausgewählt, dass eine Messfrequenz von mindestens 10 kHz erreicht wird. Dies entspricht bei 2.000 min^{-1} bzw. 15.000 min^{-1} einer Winkelauflösung von $1,2^\circ$ bzw. 9° .

Zur Absicherung gegen ein Bersten oder Lösen des Prüfkörpers aus seiner Aufnahme wird eine zweilagige Schutzumhausung dimensioniert. Diese besteht aus einem inneren und äußeren nahtlos gezogenen Rohr der Wandstärke 25 und 60 mm (Stahl EN 10210 der Güte S355). Ein innerer und oberer Deckel sowie die Grundplatte sollen ein axiales Austreten des Prüfkörpers aus der Prüfkammer verhindern. Bei der

Dimensionierung der Schutzumhausung getroffene Annahmen sowie durchgeführte Berechnungen werden in (A_Erchen 2021) zusammengefasst.

An der Grundplatte des Prüfstands werden die Spindellagerung, die Sensorik und die Schutzumhausung befestigt. Der Spindelantrieb ist unterseitig über eine Subplatte und vier Hohlprofilträger mit der Grundplatte verbunden (Abbildung 6-8). Zur gleichzeitigen Verbesserung der Steifigkeit sowie des Dämpfungsverhaltens sind die Hohlprofilträger vollständig mit dem Mineralguss EPUMENT® 130/3 A3 der RAMPF Machine Systems GmbH & Co. KG ausgefüllt. Außermittig wird die Grundplatte durch ein Gestell aus

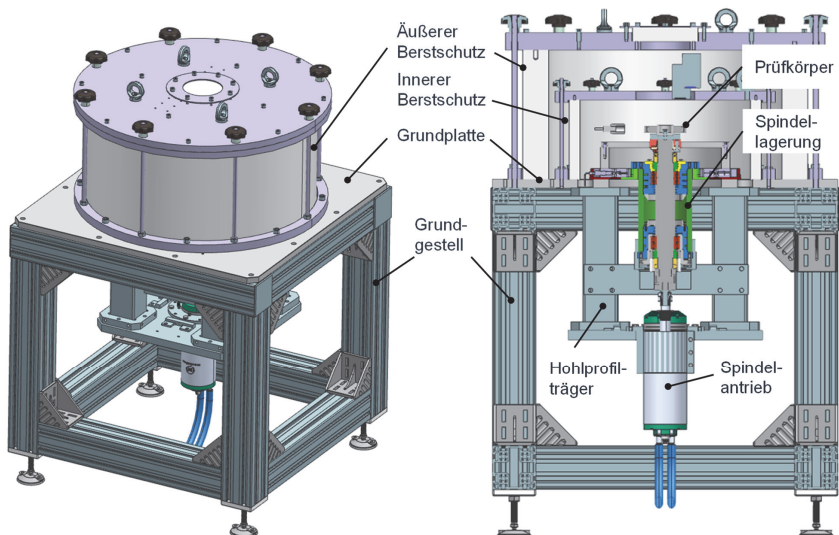


Abbildung 6-8: Gesamt- und Schnittansicht des konstruierten Schleuderprüfstands

Aluminiumprofilen und vier gummierten Füßen abgestützt. Der Prüfstand ist somit schwingungstechnisch vom Hallenboden entkoppelt.

6.3.3 Steuerungstechnische Umsetzung

Zur Steuerung des Prüfstands wird die Software LabView ausgewählt. In Verbindung mit dem Compact Data Acquisition Chassis cDAQ-9189 von National Instruments sowie geeigneter digitaler und analoger Eingangsmodule ermöglicht sie eine hochfrequente Erfassung, Verarbeitung und Speicherung von Messsignalen. Zudem können

digitale und analoge Ausgangsmodule eingesetzt werden, um bspw. die Drehzahl des Spindelantriebs einzustellen.

Die Steuerung des Prüfstands umfasst insbesondere Funktionen zur Umrechnung von Messsignalen in zeitliche Verläufe des Betrags und der Winkellage der gemessenen Unwuchtkraft sowie des Rund- und Planlaufs. Die Unwuchtkraft bezeichnet hierbei die Amplitude des sinusförmigen Kraftverlaufs, der aufgrund von Unwucht und Drehzahl am Kraftsensor gemessen wird. Messsignale werden für sogenannte Batches, die jeweils 100 Umdrehungen umfassen, gemittelt und abgespeichert. Rohdaten werden ebenfalls abgespeichert. Zur hochfrequenten und gleichzeitig strukturierten Speicherung von Messdaten wird das .tdms-Format von National Instruments gewählt (Technical Data Management Streaming). Zudem wird eine grafische Oberfläche implementiert, welche die Einstellung von Belastungsparametern (Drehzahl, Temperatur und Dauer der Belastung) sowie eine Visualisierung von Live-Daten ermöglicht. Zudem unterstützt die grafische Oberfläche die bedienende Person beim Auswuchten des Zusammenbaus aus Prüfkörper und Spindelwelle. Die Implementierung und Erprobung der Steuerung erfolgt im Rahmen der Masterarbeit von A. Kohlund (A_Kohlund 2022).

6.3.4 Aufbau und Inbetriebnahme

Zur Reduzierung von Schallemissionen wird der Prüfstand in einem Schallschutzraum aufgebaut (Abbildung 6-9 a). Ein Werkstattkran ermöglicht die Handhabung des äußeren Deckels der Schutzumhausung (Abbildung 6-9 b). Ein Bildschirm erlaubt über eine Webcam einen direkten Einblick in die Prüfkammer. Die Sensorik zur Unwucht-, Rundlauf und Planlaufmessung wird innerhalb der Prüfkammer installiert (Abbildung 6-9 c). Im Zuge der Inbetriebnahme werden Kraft-, Rund- und Planlaufsensoren sowie der Spindelantrieb an die Module des cDAQ Chassis angeschlossen. Eine experimentelle Modalanalyse bestätigt die Wirksamkeit konstruktiver Anpassungen zur Steigerung der dynamischen Steifigkeit des Schleuderprüfstands. Weitere Details zur Inbetriebnahme der Steuerung sowie zur experimentellen Modalanalyse des Prüfstands können (A_Kohlund 2022) entnommen werden.

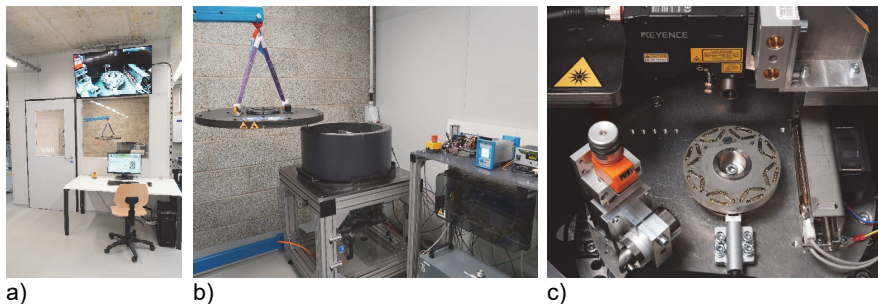


Abbildung 6-9: a) Schallschutzraum, b) Prüfstand und
c) Prüfkammer mit integrierter Messtechnik

6.3.5 Bewertung von Messunsicherheiten

Ziel dieses Abschnitts ist die Definition einer erweiterten Messunsicherheit für die Änderung des Betrags der Unwucht, des Rundlaufs und des Planlaufs. Liegt eine Änderung der Unwucht, des Rundlaufs oder des Planlaufs außerhalb dieser Messunsicherheit, so kann zu 95 % von einer tatsächlichen Verformung oder Relativbewegung des Prüfkörpers ausgegangen werden.

Nach (JCGM Nr.100 2008, S. 5), dem *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM), sind zur Bewertung erweiterter Messunsicherheiten sowohl unbekannte systematische als auch zufällige Messabweichungen zu berücksichtigen. Als unbekannte systematische Messabweichungen werden nach GUM Typ A für alle drei Messgrößen die vom Hersteller angegebenen Messunsicherheiten übernommen (vgl. Tabelle A- 4 im Anhang) (JCGM Nr.100 2008, S. 10–11). Zufällige Messabweichungen werden nach GUM Typ B durch zehn Schleuderversuche an einem Referenzkörper ermittelt, der als Vollkörper aus Stahl ohne Magnettaschen ausgeführt ist (JCGM Nr.100 2008, S. 11–14). Am Vollkörper werden keine dauerhaften Verformungen und Relativbewegungen erwartet. Eine dennoch vom Prüfstand erfasste Änderung der Messgröße wird als zufällige Messabweichung angenommen. Es werden jeweils zehn Schleuderversuche ohne und mit vorherigem Ein- und Ausbau des Prüfkörpers durchgeführt (Abbildung 6-10). Pro Messgröße wird bei jedem Schleuderversuch die Differenz zwischen dem ersten und letzten Referenzlauf bzw. Belastungslauf ermittelt und statistisch bewertet (Δ_{ref} bzw. Δ_{bel} in Abbildung 6-10). Die sich aus diesen statistischen Verteilungen ergebenden erweiterten Messunsicherheiten werden in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Für die Änderung des Rund- und Planlaufs wird die bei den

Drehzahlen jeweils höhere zufällige Abweichung berücksichtigt. Bei der Änderung der Unwuchtkraft ist für einen neu eingespannten Prüfkörper bei Referenz- bzw. Belastungsdrehzahl mit einer erweiterten Messunsicherheit von $\pm 3,88$ mN bzw. $\pm 85,41$ mN zu rechnen. Die erweiterte Messunsicherheit für eine Änderung des Rundlaufs beträgt $\pm 1,79$ μm . Für Änderungen des Planlaufs beträgt sie $\pm 1,3$ μm .

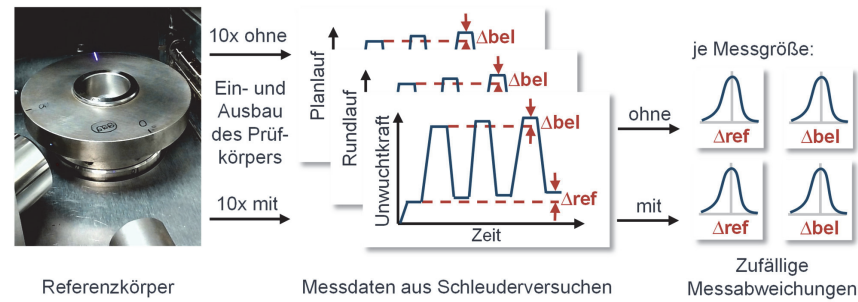


Abbildung 6-10: Ermittlung von Messunsicherheiten durch Schleuderversuche an einem Referenzkörper aus Stahl ohne Magnettaschen

Tabelle 6-2: Aus unbekannter systematischer und zufälliger Messabweichung ermittelte erweiterte Messunsicherheit der Änderung von Unwuchtkraft, Rundlauf und Planlauf

Unbekannte systematische Messabweichungen			+	Zufällige Messabweichungen				=	Erweiterte Messunsicherheit		

Der Kraftsensor zur Messung der Unwuchtkraft darf zwar unter Zug und Druck, aber nicht unter Biegung belastet werden. Er wird durch den Einsatz von Blattfedern derart konstruktiv integriert, dass an ihm keine Biegebelastungen auftreten. Aufgrund des dabei entstehenden Kraftnebenschlusses wirkt sich eine Änderung der Unwucht nur anteilig auf eine Änderung der am Sensor gemessenen Kraft aus. Das Verhältnis

zwischen der am Prüfkörper wirkenden Fliehkraft und der am Sensor gemessenen Unwuchtkraft wird daher anhand von drei Testmassen ermittelt. Diese ergeben drei unterschiedliche Unwuchtbeiträge und werden an einem Referenzkörper angebracht (Abbildung 6-11 links). Dieser entspricht einem Prüfkörper mit Stahlkörper ohne Magnetaschen und besitzt zwölf M3-Gewindebohrungen auf einem Teilkreisdurchmesser von 80 mm. Die Differenz des Unwuchtbeitrags zwischen der ersten und zweiten sowie der zweiten und dritten Testmasse entspricht einer Änderung der statischen Unwucht des Referenzkörpers um 1 gmm. Die Testmassen werden an drei unterschiedlichen Winkelstellungen angebracht. Es ergeben sich die in Abbildung 6-11 rechts dargestellten Verhältnisse zwischen einer Änderung der Unwuchtkraft und einer Änderung der statischen Unwucht des Prüfkörpers. Aus diesen Verhältnissen sowie den in Tabelle 6-2 in mN ermittelten erweiterten Messunsicherheiten ergeben sich die in Tabelle 6-3 dargestellten erweiterten Messunsicherheiten für Änderungen der statischen Unwucht in gmm. Eine Änderung der statischen Unwucht eines neu eingespannten Prüfkörpers kann somit bei der Referenzdrehzahl mit einer erweiterten Messunsicherheit von $\pm 0,65$ gmm bestimmt werden.

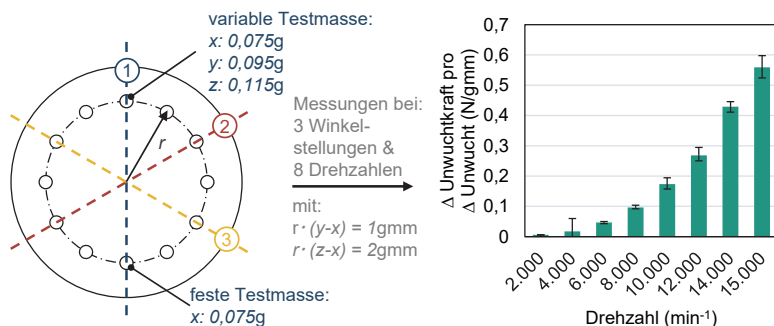


Abbildung 6-11: Drehzahlabhängiges Verhältnis der Änderung der Unwuchtkraft zur Änderung der statischen Unwucht in N/gmm. Fehlerbalken entsprechen Mindest- und Maximalwerten aus sechs Messungen.

Tabelle 6-3: Erweiterte Messunsicherheit bei der Bestimmung einer Änderung der statischen Unwucht des Prüfkörpers

Prüfkörper neu eingespannt?	bei Drehzahl		
	2.000	15.000	min ⁻¹
nein	0,29	0,01	gmm
ja	0,65	0,15	gmm

6.4 Bewertung von Fertigungsabweichungen

Die statistische Bewertung von Fertigungsabweichungen stellt den ersten Schritt zur Bearbeitung der zweiten Forschungsfrage dar (Abbildung 6-12). Hierzu werden die Wellen, Blechpakete und Magnete entsprechend der ausgelegten Referenzgeometrie hergestellt. Im Folgenden werden sie bezüglich ihrer geometrischen Abmessungen, Unwucht und Masse untersucht. Geometrische Vermessungen erfolgen in einem taktischen Koordinatenmessgerät ZEISS O-INSPECT 3/2/2. Statische Unwuchten werden in einer Vertikalauswuchtmaschine VIRIO 15 der Schenck RoTec GmbH gemessen. Zum Wiegen der Blechpakete und Wellen wird die Waage Kern PCB 2500-2 eingesetzt. Magnete werden auf der Waage Kern EG 220-3NM gewogen.

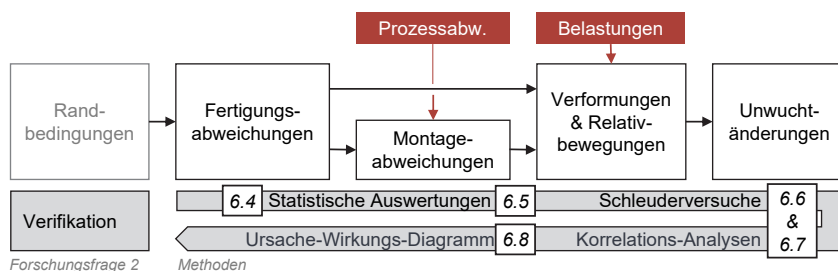


Abbildung 6-12: Zuordnung der folgenden Abschnitte zur Vorgehensweise aus 4.3.2

6.4.1 Wellen

An insgesamt 44 Wellen werden der Außendurchmesser, die Zylindrizität, der Betrag und die Winkellage der Unwucht sowie die Masse ermittelt (Abbildung 6-13 a). 95,5 % der gemessenen Durchmesser liegen innerhalb des Toleranzfelds $38 \times 6 (+0,08 +0,096)$ (Abbildung 6-13 b). 97,7 % der Wellen weisen eine Zylindrizität von weniger als 0,2 mm auf (Abbildung 6-13 c). Keine der Wellen erreicht alleine durch die Fertigung die Wuchtgüte G 2,5. Unter Annahme einer maximalen Drehzahl von 15.000 min^{-1} und einer mittleren Wellen-Masse von 132 g läge die zulässige Unwucht bei 0,21 gmm (Abbildung 6-13 d). Die Wuchtgüte G 2,5 wurde allerdings nicht bei der Fertigung als Zielgröße vorgegeben und bereits zufällige Spannfehler bei der Unwuchtmessung können zu einer Messabweichung von mehr als 0,21 gmm führen. Die Winkellage der Unwucht verdichtet sich im Bereich von 50° , streut aber über den gesamten Bereich von 0 bis 360° (Abbildung 6-13 e). Abweichungen der Massen von der mittleren gemessenen Masse betragen maximal 1,13 % (Abbildung 6-13 f). An den Wellen liegen somit keine auffällig

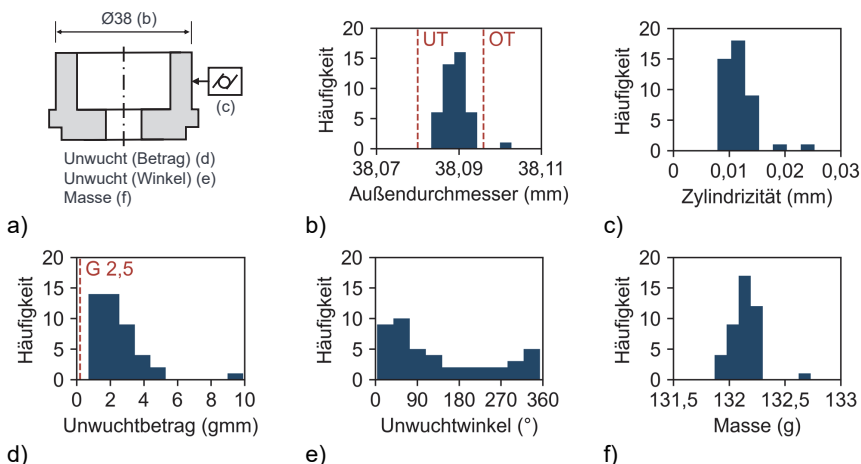


Abbildung 6-13: Ergebnisse der Vermessung von 44 Wellen

hohen Fertigungsabweichungen vor. Eine Korrelationsanalyse der beschriebenen Messgrößen ergibt keinen Korrelationskoeffizienten, der einen Wert von 0,5 überschreitet. Es sind also keine relevanten Korrelationen innerhalb der Fertigungsabweichungen der Wellen erkennbar.

6.4.2 Blechpakete

An den Blechpaketen werden die in Abbildung 6-14 dargestellten Messgrößen erfasst. Der Innendurchmesser wird als Gauß- und als Pferch-Durchmesser ausgewertet. Der Gauß-Durchmesser stellt eine Mittelung des Durchmessers der tatsächlich gemessenen Innenbohrung des Blechpakets dar. Der Pferch-Durchmesser beschreibt den Durchmesser des kleinstmöglichen Zylinders, der in die tatsächliche Innenbohrung des Blechpakets passt. Rundläufe, Planläufe und Koaxialitäten werden sowohl bezüglich der Symmetrieachse des Gauß- als auch des Pferchdurchmessers ausgewertet. Die Messung des Planlaufs erfolgt an der Planfläche des Blechpakets, an der das Paketierwerkzeug in seiner Paketierrichtung den Interlock zwischen den Elektroblechen hergestellt hat. An dieser Planfläche erfolgt auch bei späteren Schleuderversuchen die Planlaufmessung.

Die Vermessung von 65 Blechpaketen, die in zwei Chargen zunächst ohne Magnetischen hergestellt wurden, ergibt die in Abbildung 6-15 dargestellten statistischen Verteilungen. Bei beiden Chargen ist der Pferchdurchmesser erwartungsgemäß geringer

als der Gaußdurchmesser (Abbildung 6-15 a) und b). In der ersten Charge liegt der Gaußdurchmesser innerhalb des geforderten Toleranzfelds. Bei der zweiten Charge ist dies beim Pferch-Durchmesser der Fall. Die Zylindrizität des Innendurchmessers beträgt über beide Chargen hinweg 0,03 bis 0,09 mm (Abbildung 6-15 d). Dies entspricht somit der nach Abbildung 5-5 a) erwarteten Größenordnung von maximal 0,1 mm. Der auf dem Teilkreis-Durchmesser 96 mm gemessene Planlauf beträgt je nach Bezugsachse und Charge im Mittel 0,13 bis 0,23 mm (Abbildung 6-15 e) und f). Mit bis zu 0,75 mm überschreitet der Planlauffehler in Einzelfällen den in Abbildung 5-5 a) erwarteten Planlauffehler von maximal 0,5 mm. Die Koaxialität zwischen dem Außen- und Innendurchmesser beträgt je nach Bezugsachse und Charge durchschnittlich 0,02 bis 0,04 mm (Abbildung 6-15 g) und h). Sie liegt somit innerhalb der erwarteten Koaxialität von maximal 0,1 mm. Der Betrag der statischen Unwucht der Blechpakete ohne Magnettaschen liegt zu 5 % innerhalb der Wuchtgüte G 2,5. Die Wuchtgüte ist nur dann erreicht, wenn der Betrag der statischen Unwucht kleiner als 0,93 gmm ist (Abbildung 6-16). Die Winkellage der Unwucht ist dabei nahezu gleichverteilt. Die Blechpakete ohne Magnettaschen wiegen durchschnittlich 586,85 g und weichen um maximal 0,35 % von diesem Mittelwert ab.

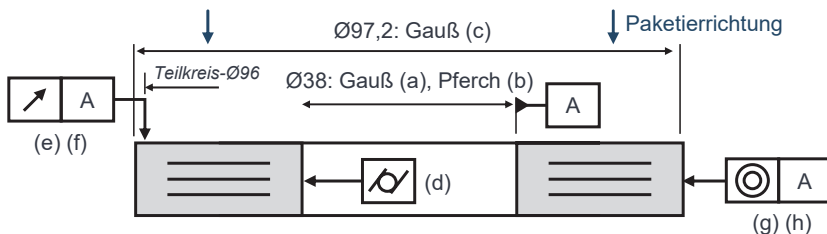


Abbildung 6-14: Messgrößen bei der Vermessung von Blechpaketen

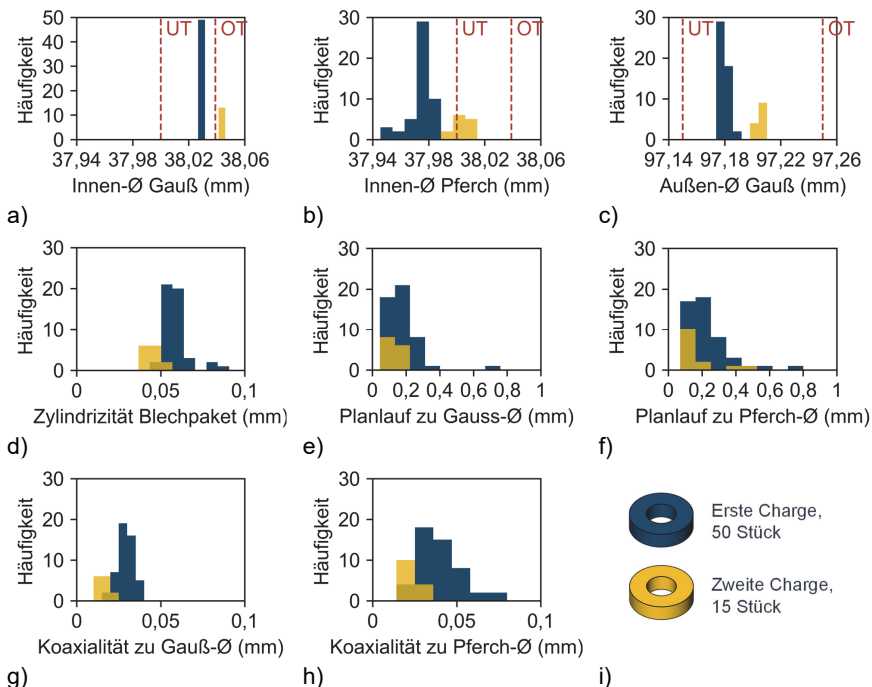


Abbildung 6-15: Geometrische Vermessung der ersten und zweiten Charge von insgesamt 65 Blechpaketen ohne Magnettaschen

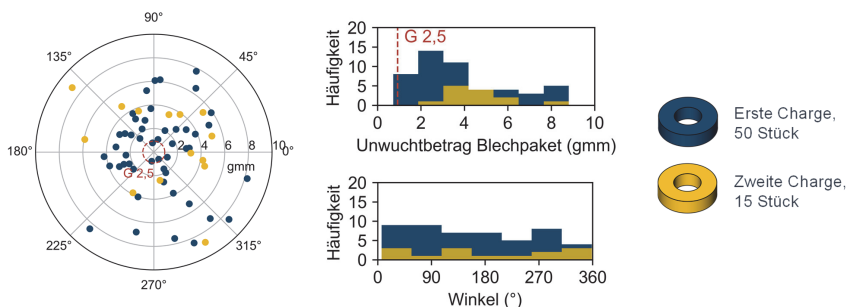


Abbildung 6-16: Vergleich von Betrag und Winkellage der statischen Unwucht der ersten und zweiten Charge von insgesamt 65 Blechpaketen ohne Magnettaschen

Abbildung 6-17 stellt die Vermessung von Blechpaketen mit und ohne Magnettaschen gegenüber. Geometrische Abmessungen der Blechpakete mit Magnettaschen sind ähnlich verteilt wie bei Blechpaketen der zweiten Charge ohne Magnettaschen. Blechpakete mit Magnettaschen wurden zusammen mit der zweiten Charge der Blechpakete ohne Magnettaschen gefertigt. Bei der Herstellung der Blechpakete eingestellte Prozessparameter scheinen die hier gemessenen Fertigungsabweichungen somit stärker zu beeinflussen als konstruktive Unterschiede. Unwuchten der Blechpakete mit und ohne Magnettaschen sind in Abbildung 6-18 dargestellt. Kein Blechpaket mit Magnettaschen erfüllt die Wuchtgüte G 2,5. Die Magnettaschen führen somit erwartungsgemäß zu einer Steigerung der Unwucht des Blechpakets.

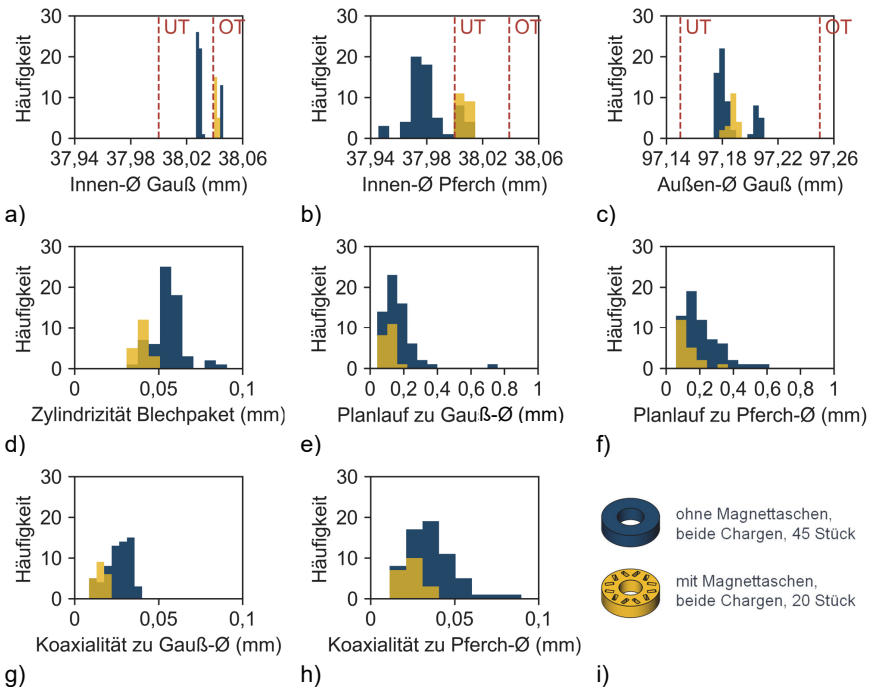


Abbildung 6-17: Geometrische Vermessung von 65 Blechpaketen ohne Magnettaschen (Blau) und 20 Blechpaketen mit Magnettaschen (Gelb)

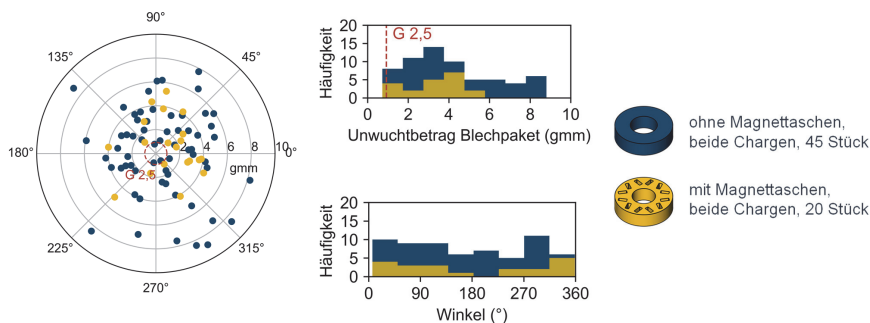


Abbildung 6-18: Vergleich von Betrag und Winkellage der statischen Unwucht der Blechpakete ohne und mit Magnettaschen (beide Chargen gemischt)

Eine Abtastung der Oberfläche des Blechpakets auf den Teilkreisdurchmessern 40, 66 und 96 mm ermöglicht die Bewertung der relativen axialen Position der einzelnen Teilkreise. Alle vermessenen Blechpakete weisen an ihrer Oberseite eine konkave Oberfläche auf (Abbildung 6-19). Als Ursache dafür wird das bistabile Verhalten der Einzelbleche vermutet. Unter Einwirkung des Paketierdrucks nehmen sie eine nach unten gewölbte Form ein. Die Differenz zwischen den Teilkreisdurchmessern 96 mm und 40 mm ist bei Blechpaketen mit Magnettaschen höher als bei Blechpaketen ohne Magnettaschen. Vermutlich liegt das einerseits an den Magnettaschen, die die Biegesteifigkeit der Einzelbleche reduzieren. Andererseits kann das zum Laserschneiden der Magnettaschen benötigte Aufschmelzen und Erstarren der Schnittkanten zu erhöhtem thermischen Verzug geführt haben.

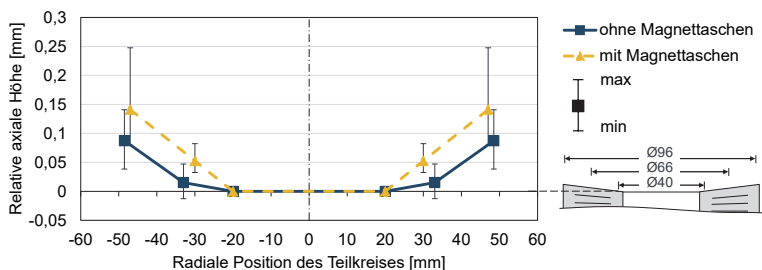


Abbildung 6-19: Relative axiale Höhe an drei Teilkreisdurchmessern (65 Blechpakete mit Magnettaschen, 20 Blechpakete ohne Magnettaschen)

Am Innen- und Außendurchmesser der Blechpakete ist eine axial verlaufende, radial gerichtete Welligkeit der Mantelfläche erkennbar (Abbildung 6-20 a) und b). Diese entsteht während des Paketiervorgangs durch die Verdrehung jedes einzelnen Bleches um 45° und wird durch den Rundlauffehler der Verdreheinheit des Paketierwerkzeugs verursacht. Eine gesteigerte Welligkeit des Innendurchmessers kann auch als erhöhter Zylindrizitätsfehler beschrieben werden. Steigt der Zylindrizitätsfehler, verringert sich erwartungsgemäß der Pferch-Durchmesser des Innendurchmessers (Abbildung 6-20 c). An den Teilkreisen, die mit einem Durchmesser von 60 mm nah an den Paketierpunkten verlaufen, ist zudem eine axial gerichtete Welligkeit zu erkennen (Abbildung 6-21). Die Vertiefungen dieses welligen Verlaufs liegen an Winkelpositionen, an denen sich Paketierpunkte befinden. Im Blechpaket sind daher axiale Vorspannungen zu erwarten, die zwischen den Paketierpunkten zu einem axialen Aufwölben der Oberflächen führen.

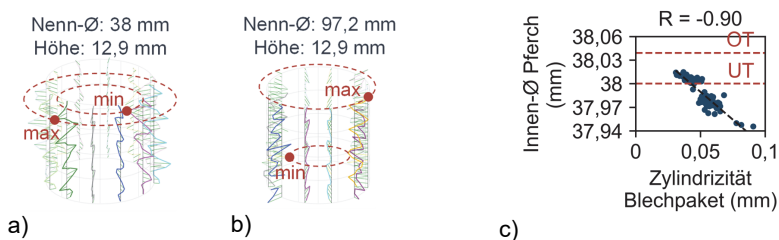


Abbildung 6-20: Geometrische Vermessung des Blechpakets Nr. 1: a) Welligkeit der Mantellinien am Innendurchmesser und b) am Außendurchmesser. c) Negative Korrelation zwischen Zylindrizität und Pferch-Durchmesser des Innendurchmessers

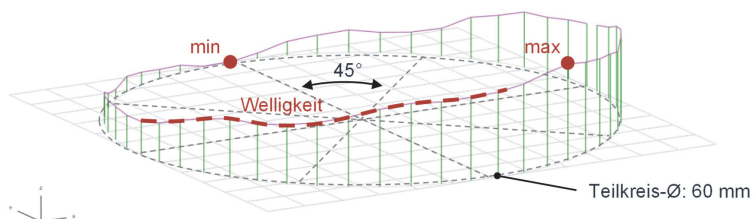


Abbildung 6-21: Welligkeit der Oberfläche auf dem Teilkreisdurchmesser 60 mm

Eine genauere Betrachtung der Winkellagen des maximalen Planlauffehlers und des maximalen Koaxialitätsfehlers zeigt, dass diese sich bei 50 % der Blechpakete ohne Magnettaschen um mindestens 154° unterscheiden. Dies gilt für beide Chargen. Die

zugehörige statistische Verteilung verdichtet sich nahe 180° . Maxima des Planlauf- und des Koaxialitätsfehlers liegen sich somit mehrheitlich gegenüber (Abbildung 6-22 a) und b). Es wird erwartet, dass dies zu einer verbesserten Massensymmetrie des Blechpakets führt. Aus diesem Grund ist die mittlere gemessene statische Unwucht von 3,92 gmm niedriger als die Unwucht, die aufgrund des gemessenen Koaxialitätsfehlers zu erwarten wäre. Bei einem Hohlzylinder der Masse 586 g, dem Innen- und Außendurchmesser von 38 bzw. 97,2 mm sowie einer Exzentrizität des Außendurchmessers um den halben mittleren Koaxialitätsfehler ($0,5 \cdot 0,03 \text{ mm} = 0,015 \text{ mm}$) wäre eine statische Unwucht von 10,4 gmm zu erwarten. Nach (Abbildung 6-22 c) begünstigt eine hohe Winkel-Differenz eine geringe statische Unwucht des Blechpakets. Eine erhöhte Unwucht kann aber nicht gleichzeitig ausgeschlossen werden.

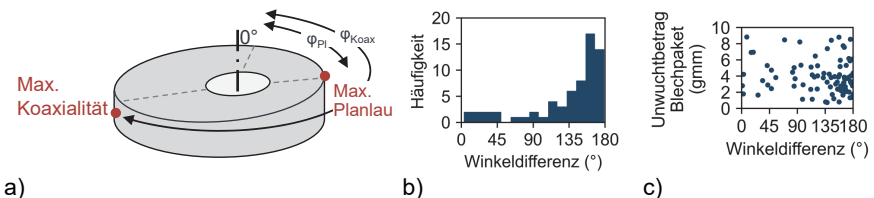


Abbildung 6-22: a) Definition der Differenz zwischen Winkellage des maximalen Planlauf- und Koaxialitätsfehlers, b) gemessene Differenz und c) Korrelationsanalyse zwischen der Winkeldifferenz und dem Betrag der statischen Unwucht (bei Blechpaketen ohne Magnettaschen)

Zusammenfassung: Der Paketierprozess wirkt sich deutlich auf geometrische Abweichungen des Blechpakets aus. Trotz einer Verdrehung der Einzelbleche treten Planlauffehler von bis zu 0,8 mm auf. Zudem führt die Verdrehung zu einem gesteigerten Zylindrizitätsfehler und einem reduzierten Pferch-Innendurchmesser. Zum anderen bewirkt der Interlock sowie der dafür eingesetzte Paketierdruck eine nach unten gewölbte und zwischen den Paketierpunkten gewellte Oberfläche. Bei Blechpaketen ohne Magnettaschen befinden sich Planlauf- und Koaxialitätsfehler mehrheitlich in entgegengesetzter Winkellage und begünstigen eine geringe Unwucht des Blechpakets.

6.4.3 Magnete

Maßliche Abweichungen der Magnete werden einem Messprotokoll des Herstellers entnommen. Die Länge, Breite und Höhe der mit einer Nickel-Kupfer-Nickel-Beschichtung (NiCuNi) versehenen Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB) liegen innerhalb der geforderten Toleranzgrenzen. Die Streubreite der Abmessungen entspricht der gleichen Größenordnung wie dem in 5.3.3 definierten Toleranzfeld ($\pm 0,05$ mm). Die Magnete wiegen durchschnittlich 3,349 g. Mit 8 mg beträgt die Standardabweichung der Masse 0,24 % dieses Mittelwerts. Es liegt somit keine auffällig hohe Streuung der Magnetmassen vor.

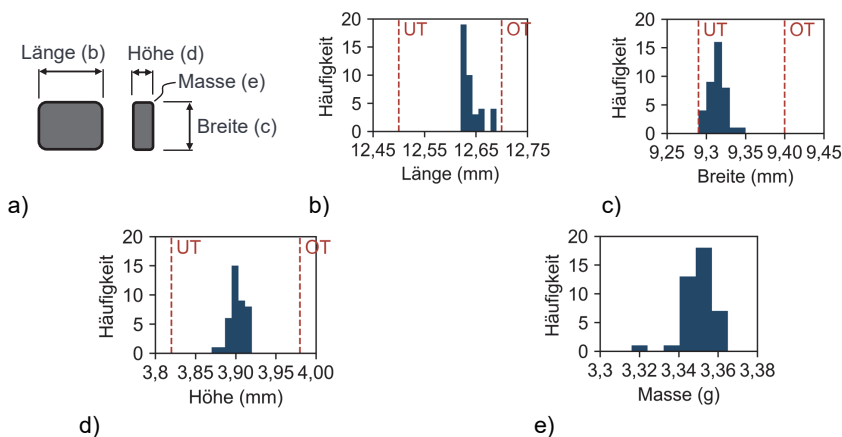


Abbildung 6-23: a) An Magneten erfasste Messgrößen und Messergebnisse zu
b) Länge, c) Breite, d) Höhe und e) Masse von 40 Magneten

6.5 Bewertung von Montageabweichungen

In den folgenden beiden Abschnitten wird untersucht, welche Montageabweichungen bei der Magnetmontage und dem Aufschrupfen der Blechpakete auf die Wellen auftreten. Dies erfolgt durch den Vergleich geometrischer Abmessungen, Unwuchten und Massen vor und nach dem Montagevorgang.

6.5.1 Magnetmontage

Ergebnis des in Abschnitt 6.1 beschriebenen Montageprozesses ist ein wie in Abbildung 6-24 dargestelltes Blechpaket mit darin vergossenen Magneten. Um an den Magneten erwartete Setzbewegungen untersuchen zu können, werden neben sechs Blechpaketen auch sechs Stahlkörper mit Magnettaschen hergestellt. Bei diesen sollen Wechselwirkungen des geblechten Aufbaus des Blechpakets mit der Magnetfixierung ausgeschlossen werden können. Bei den Stahlkörpern werden die Magnettaschen aus dem Stahl S355 erodiert. Die Differenz der statischen Unwucht der Blechpakete und Stahlkörper vor und nach dem Einkleben der Magnete entspricht maximal 10 gmm. Unwuchtbeiträge der Magnetmontage und -fixierung liegen somit sowohl bei den Blechpaketen als auch bei den Stahlkörpern in einer vergleichbaren Größenordnung (Abbildung 6-25 a) und b). An einem der sechs Stahlkörper bewirkt ein Verrutschen während des Erodierprozesses eine auffällig hohe statische Unwucht (34,5 gmm, Abbildung 6-25 b). Nur in einem Einzelfall ist der Unwuchtbeitrag der Magnete und ihrer Fixierung höher als die initiale statische Unwucht des Blechpakets. Eine zufällige Anordnung der Magnete beeinflusst somit die Initialunwucht des Blechpakets bzw. des Stahlkörpers in vergleichsweise geringem Maße. Erwartungsgemäß verbleiben zwischen den Magneten und den Magnettaschen Fügespalte von 0,1 bis 0,4 mm, die von der Vergussmasse ausgefüllt werden (Abbildung 6-26). Aufgrund des manuellen Vergießens können Lufteinschlüsse dabei nicht vollständig vermieden werden.



Abbildung 6-24: Blechpaket mit darin vergossenen Magneten

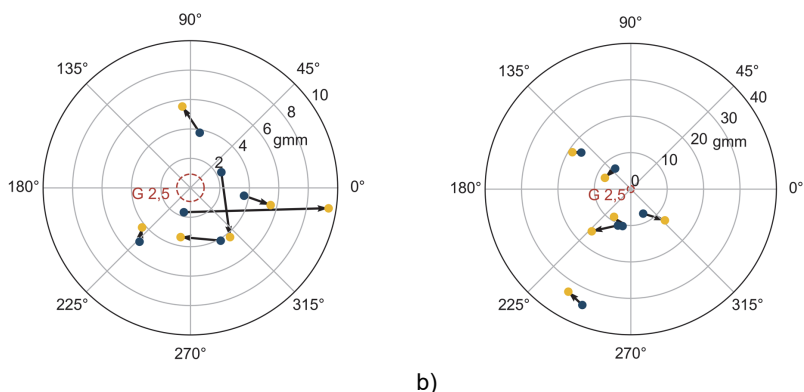


Abbildung 6-25 Statische Unwucht vor (Blau) und nach (Gelb) der Magnetmontage und -fixierung bei a) Blechpaketen und b) Stahlkörpern

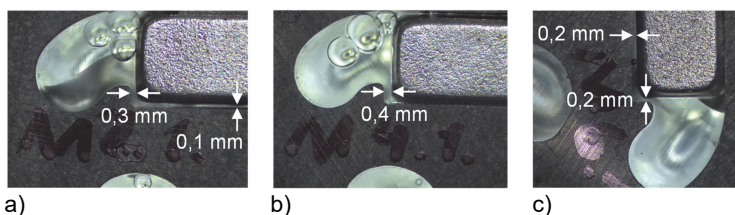


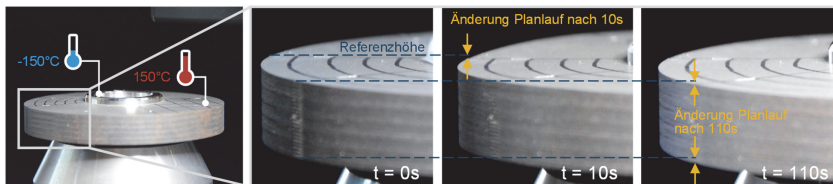
Abbildung 6-26: Beispiele für Fügespalte, die zwischen Magnet und Magnettaschen durch die Vergussmasse ausgefüllt werden (Durchlichtmikroskop Zeiss Stemi 305, mit Kamera Zeiss Axiocam 208 color)

6.5.2 Schrumpfpprozess des Blechpakets auf die Welle

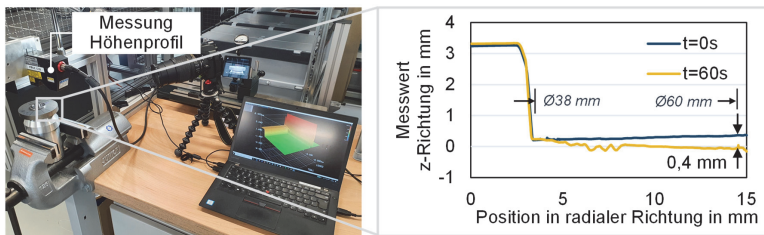
6.5.2.1 Blechpakete ohne Magnettaschen

Beim Aufschumpfen von Blechpaketen ohne Magnettaschen sind insbesondere axiale Verformungen des Blechpakets zu beobachten. Diese äußern sich durch eine optisch deutlich erkennbare Veränderung des Planlaufs. Sie tritt fünf Sekunden nach dem Einfädeln des Blechpakets auf und dauert die folgenden fünf Sekunden an. Danach kehrt sich die Oberfläche des Blechpakets zu einer nach oben gewölbten Form um. Dies bewirkt über 100 Sekunden ein kontinuierliches axiales Absenken der Mantelfläche des Außendurchmessers (Abbildung 6-27 a). Die Mantelfläche des Außendurchmessers senkt sich näherungsweise um das 3- bis 4-fache der Blechstärke, also um 0,9 bis 1,2 mm ab. Das vom Außen- zum Innendurchmesser zunächst nach unten gewölbte Höhenprofil kehrt sich zu einem nach oben gewölbten Profil um (Abbildung 6-27

b). Bei allen weiteren Blechpaketen ohne Magnettaschen wird ein vergleichbares Verformungsverhalten beobachtet. Das bistabile Verhalten der Elektrobleche, welches unter axialer Last bei der Paketierung eine nach unten gewölbte Form bewirkte (vgl. Abbildung 6-19), führt beim Aufschumpfen zu einer Umkehrung dieser Wölbung. Dieses Mal allerdings nicht unter Einwirkung einer axialen Last, sondern unter radialer Belastung durch die übermaßbedingte radiale Flächenpressung zwischen Welle und Blechpaket.



a)



b)

Abbildung 6-27: Veränderung Höhenprofil nahe Innendurchmesser des Blechpakets

Der Zusammenbau aus Welle und Blechpaket weist im Vergleich zum Blechpaket einen veränderten Planlauf auf. Dieser unterscheidet sich sowohl im Betrag als auch in der Winkellage vom vorherigen Wert (Abbildung 6-28 a) und b). Dies gilt unabhängig davon, ob als Bezugsachse der Gauß- oder der Pferchdurchmesser des Innendurchmessers gewählt wird (Abbildung 6-28 c) und d). In Abbildung 6-28 c) wird allerdings deutlich, dass die stärksten Veränderungen des Betrags eine Verringerung des Planlauffehlers bedeuten. Nach Abbildung 6-29 wird der Planlauffehler durch das Aufschumpfen umso stärker verringert und somit verbessert, desto höher der initiale Planlauffehler des Blechpakets ist. Dies trifft gleichermaßen auf den Planlauf zu, der am einzelnen Blechpaket bezüglich des Gauß- und Pferchdurchmessers des Innendurchmessers bestimmt wurde.

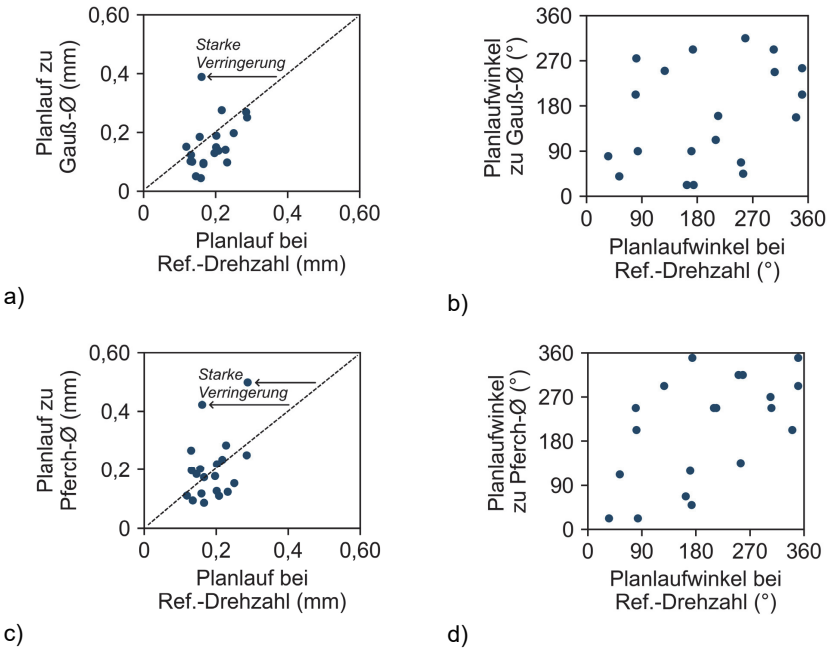


Abbildung 6-28: Korrelationsanalysen zwischen Betrag und Winkellage des Planlaufs vor und nach dem Schrumpfprozess (Teilkreis 96 mm)

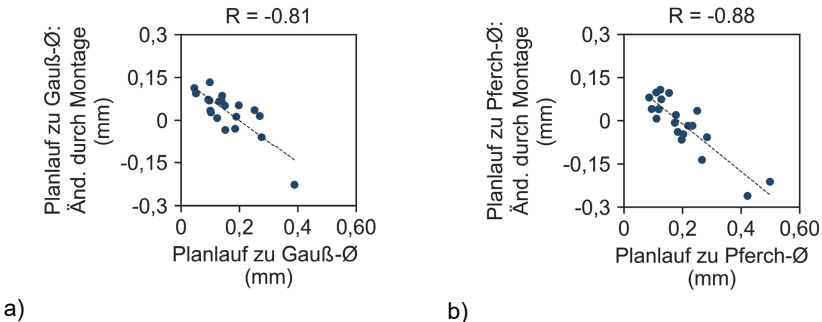


Abbildung 6-29: Korrelationsanalyse zwischen Planlauffehler des Blechpakets und Änderung des Planlaufs durch den Schrumpfprozess.
Ausgewertet bezüglich a) Gauß- und b) Pferch-Innendurchmesser

Das radiale Spiel innerhalb der Aufnahme des Prüfkörpers sowie die Aufnahme beeinflussen die gemessene Unwucht und den Rundlauf. Eine verlässliche Aussage über absolute Werte von Unwucht und Rundlauf ist daher nicht möglich. Dennoch werden in Abbildung 6-30 vor und nach dem Aufschumpfen des Blechpakets gemessene Unwuchtkräfte und Rundläufe gegenübergestellt. Eine erhöhte Unwucht des Blechpakets führt nicht zwangsläufig zu einer Steigerung der im Prüfstand, bei der Referenzdrehzahl von 2.000 min^{-1} , gemessenen Initialunwucht des Prüfkörpers (Abbildung 6-30 a). Auch zwischen dem Rundlauf vor und nach dem Zusammenbau ist keine Korrelation erkennbar (Abbildung 6-30 b) und c). Allerdings ist auffällig, dass eine Zylindrizität von mehr als $0,065 \text{ mm}$ nach dem Aufschumpfen sowohl einen gesteigerten Planlauftfehler als auch eine erhöhte Unwucht des Prüfkörpers bewirken kann (Abbildung 6-31 a) und b).

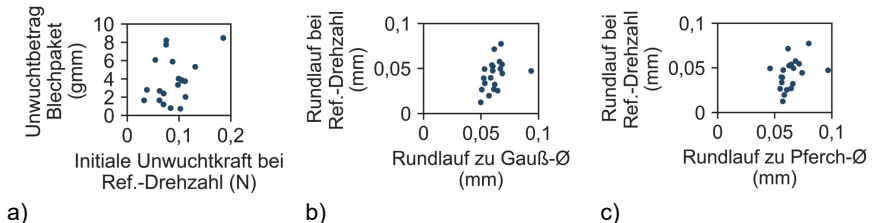


Abbildung 6-30: Vergleich vor und nach dem Aufschumpfen bezüglich a) Unwucht, b) Rundlauf zu Gauß-Durchmesser, c) Rundlauf zu Pferch-Durchmesser

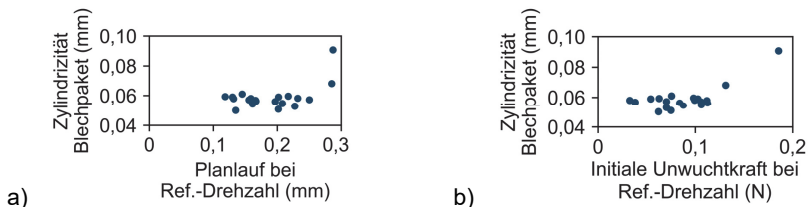


Abbildung 6-31: Korrelationsanalyse zwischen a) Planlauf nach dem Aufschumpfen und Zylindrizität des Blechpakets am Innendurchmesser und b) Unwuchtkraft des Prüfkörpers und Zylindrizität des Blechpakets am Innendurchmesser

6.5.2.2 Blechpakete mit Magnettaschen

Beim Aufschumpfen eines Blechpakets mit Magnettaschen, in denen keine Magnete vergossen sind, ist ebenfalls ein Umstülpen der Oberfläche zu erkennen. Entsprechend der durchgeführten Videoaufnahmen beginnt dieser Umstülpvorgang zehn Sekunden nach dem Auflegen des Blechpakets und führt innerhalb der folgenden 70 Sekunden

zu einem Absenken des Außendurchmessers um die 4-fache Blechstärke, also um näherungsweise 1,2 mm (Abbildung 6-32 a). Der untere Abschnitt des Blechpakets scheint sich wenige Sekunden früher als der obere Abschnitt abzusenken. Dies kann durch die stärkere Wärmeabfuhr im unterseitigen Kontakt mit der Wellenschulter bedingt sein. Es ist zwar ein deutliches Absenken des Außendurchmessers, aber keine Änderung des Planlaufs erkennbar.

Sind in den Magnettaschen Magnete vergossen, senkt sich der Außendurchmesser um weniger als eine Blechstärke, also um weniger als 0,3 mm ab (Abbildung 6-32 b). Es ist keine Änderung des Planlaufs zu erkennen. Die Vergussmasse besitzt somit eine versteifende Wirkung, die zu deutlich geringeren Verformungen als bei Blechpaketen ohne Magnettaschen bzw. mit leeren Magnettaschen führt. Vermutlich verhindert die Vergussmasse insbesondere radiale und tangentielle Scherbewegungen zwischen den Einzelblechen, die für eine Änderung des Planlaufs erforderlich wären. Während des Schrumpfvorgangs sind vereinzelte Knistergeräusche wahrzunehmen. Diese lassen auf ein lokales Ablösen der Vergussmasse vom Blechpaket und/oder von den Magneten schließen.

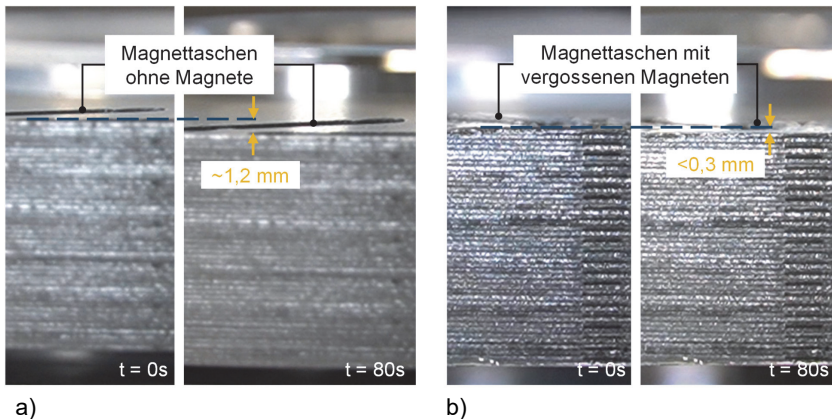
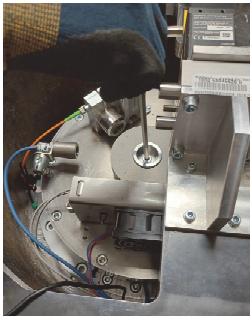


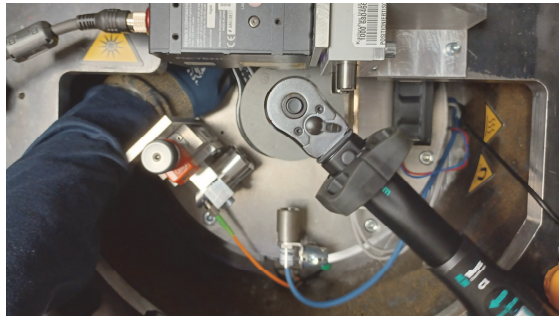
Abbildung 6-32: Absenken des Außendurchmessers bei einem Blechpaket mit
a) leeren Magnettaschen und b) in Magnettaschen vergossenen Magneten

6.6 Bewertung von Verformungen und Relativbewegungen

Zur Bewertung der unter mechanischer und thermischer Last auftretenden Verformungen und Relativbewegungen werden die im vorherigen Abschnitt montierten Prüfkörper Schleuderversuchen unterzogen. Vor jeder Versuchsreihe wird der Schleuderprüfstand warmgefahren. Hierzu werden am Referenzkörper, der in 6.3.5 zur Bewertung von Messunsicherheiten eingesetzt wurde, fünf Schleuderversuche durchgeführt. Zur Verringerung des zufälligen Einflusses des Fügspiels innerhalb der Aufnahme des Prüfstands (ca. 5-10 μm Spiel) wird jeder Prüfkörper innerhalb dieses Spiels in Richtung 270° der Spindel verschoben und dort axial verschraubt. Die M8-Schraube wird mit einem Drehmoment von 24 Nm angezogen (Abbildung 6-33). Der Zusammenbau wird vor jedem Schleuderversuch anhand von Madenschrauben ausgewuchtet. Als Zielgröße des Auswuchtvorgangs wird eine Unwuchtkraft definiert, die bei 2.000 min^{-1} 0,075 N nicht übersteigt. Am Zusammenbau aus Prüfkörper und Spindel verbleibt somit zu Beginn des Schleuderversuchs eine Restunwucht von maximal 12,5 gmm.



a)



b)

Abbildung 6-33: a) Einbau des Prüfkörpers im Prüfstand und
b) Anziehen der axialen Schraube mit Drehmomentschlüssel (24 Nm)

Die Schleuderversuche werden entsprechend der in Abschnitt 6.2 definierten Drehzahlen und Haltezeiten der jeweils sechs Referenz- und fünf Belastungsläufe durchgeführt. Der Prüfkörper wird hierbei zunächst nicht erwärmt. Die laufende Erfassung einer Unwuchtkraft, eines Rundlaufs sowie eines Planlaufs des Prüfkörpers ermöglicht die Differenzierung zwischen vorübergehenden und dauerhaften Veränderungen dieser drei Messwerte. Aus ihren zeitlichen Verläufen werden die in Abbildung 6-34 dargestellten Parameter berechnet. Sie werden in den folgenden Abschnitten einerseits statistisch bewertet und andererseits auf Korrelationen mit zuvor gemessenen Fertigungs- und

Montageabweichungen untersucht. Die Parameter bilden somit die Datengrundlage für die Identifikation derjenigen Fertigungs- und Montageabweichungen und Belastungen, die zu vorübergehenden und/oder dauerhaften Verformungen und Relativbewegungen des Prüfkörpers führen.

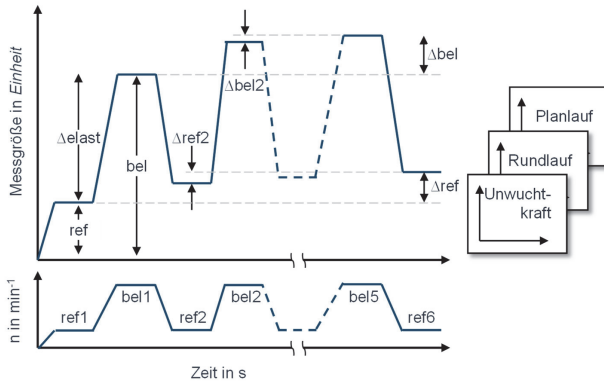


Abbildung 6-34: Nomenklatur der entlang des zeitlichen Verlaufs einer Messgröße ausgewerteten Parameter

6.6.1 Blechpaket ohne Magnettaschen

Zur Untersuchung an Blechpaketen auftretender Verformungen werden zunächst 20 Prüfkörper geschleudert. Sie bestehen jeweils aus einer Welle und einem Blechpaket ohne Magnettaschen (Abbildung 6-35). Die Vorstellung der Messergebnisse erfolgt getrennt für vorübergehende bzw. elastische und dauerhafte bzw. plastische Verformungen.

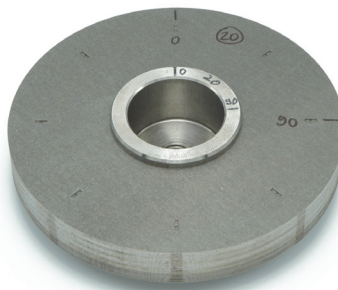


Abbildung 6-35: Blechpaket ohne Magnettaschen, auf Wellenabschnitt geschrumpft

Vorübergehende Verformungen

An den 20 geschleuderten Prüfkörpern wird sowohl eine vorübergehende bzw. elastische Steigerung als auch Verringerung der Unwucht und des Rundlaufs beobachtet (Abbildung 6-36 a) und b). Nach Abbildung 6-37 begünstigt eine geringe Unwucht des Blechpakets eine geringe vorübergehende Änderung der Unwucht des Prüfkörpers.

Die vorübergehende Änderung des Rundlaufs bildet ihre stärkste Korrelation mit der x-Position des Mittelpunkts des Kreises, der im Koordinatenmessgerät am Außendurchmesser des Blechpakets abgetastet wurde (Abbildung 6-38 a). Eine exzentrische Position des Außendurchmessers in positiver x-Richtung des Blechpakets verringert eine vorübergehende Änderung des Rundlaufs. Die x-Achse entspricht der Winkellage 90° des Blechpakets und liegt somit entgegengesetzt zu der Richtung, in die der Prüfkörper bei der Montage innerhalb des Fügspiels angeschlagen wurde (Abbildung 6-38 b). Die exzentrische Position des Außendurchmessers beeinflusst somit die Winkellage und den Betrag der elastischen Aufweitung des Außendurchmessers. Eine Auswirkung dieses Effektes auf die vorübergehende Änderung der Unwucht ist nicht eindeutig erkennbar, da die zufällig verteilte Restunwucht des Zusammenbaus aus Prüfkörper und Spindelwelle sie überlagert.

Der Planlauf aller 20 Prüfkörper liegt bei der Belastungsdrehzahl von 15.000 min^{-1} unterhalb des bei der Referenzdrehzahl von 2.000 min^{-1} gemessenen Planlaufs (Abbildung 6-36 c). Die vorübergehende Verringerung und somit Verbesserung des Planlaufs ist umso stärker ausgeprägt, je höher der Planlauf während des ersten Referenzlaufs ist (Abbildung 6-39 a). **Fliehkräfte bewirken somit eine vorübergehende Ausrichtung des Blechpakets zu einem verbesserten Planlauf** (Abbildung 6-39 b).

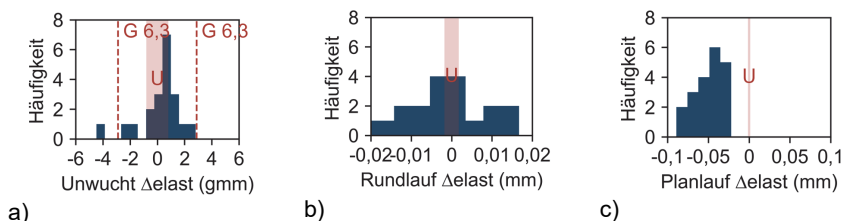
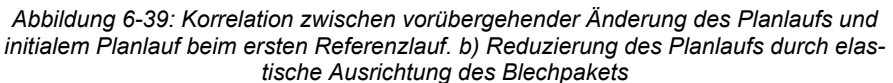
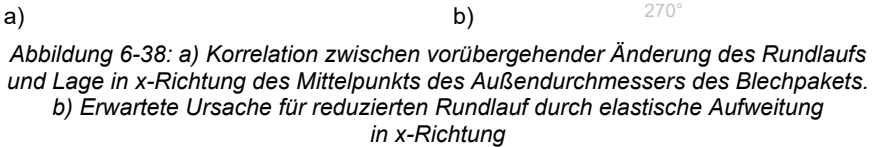
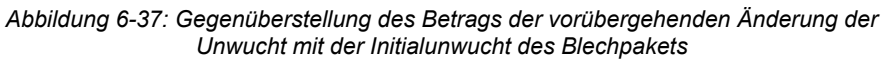


Abbildung 6-36: Vorübergehende Änderung a) der Unwucht, b) des Rundlaufs und c) des Planlaufs bei 20 Blechpaketen ohne Magnettaschen



Dauerhafte Verformungen

In Abbildung 6-40 werden die dauerhaften Änderungen der Unwucht, des Rundlaufs und des Planlaufs dargestellt, die durch die Differenz Δ_{ref} zwischen dem letzten und ersten Referenzlauf gebildet werden. Die dauerhaften Änderungen der statischen Unwucht liegen deutlich innerhalb der Messunsicherheit und sind somit geringer als 0,65 gmm (Abbildung 6-40 a). Die dauerhafte Änderung des Rundlaufs liegt ebenfalls hauptsächlich innerhalb der Messunsicherheit (Abbildung 6-40 b). In drei Fällen findet eine Verringerung und in zwei Fällen eine Steigerung des Rundlaufs statt. Auffällig starke Verringerungen des Rundlaufs zeigen allerdings keine besonders starke Veränderung der Unwucht (Abbildung 6-41 a). Dafür gehen starke Änderungen des Rundlaufs mit erhöhten Änderungen des Planlaufs einher (Abbildung 6-41 b). Eine Änderung des Planlaufs bewirkt aus Sicht des Blechpakets an dessen Außendurchmesser eine axiale Verlagerung des Fokuspunkts des Rundlaufsenors. Dieser misst somit während des ersten und letzten Referenzlaufs den Rundlauf des Blechpakets an zwei unterschiedlichen axialen Positionen, was bei der Auswertung zu einem Messfehler führen kann. Die besonders starken dauerhaften Verringerungen des Rundlaufs um annähernd 10 und 20 μm werden daher als Ausreißer angenommen.

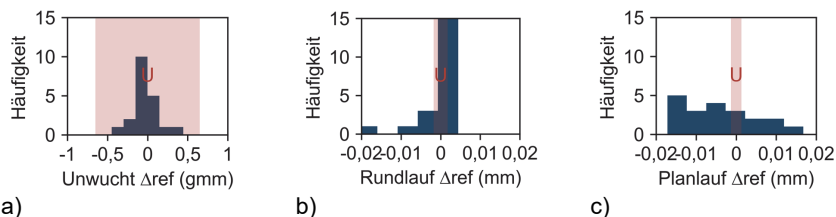


Abbildung 6-40: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf bei 20 Blechpaketen ohne Magnettaschen

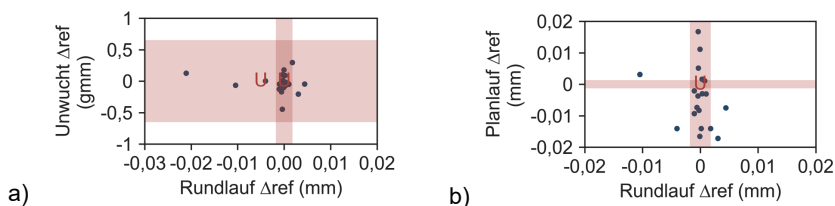


Abbildung 6-41: Korrelationsanalyse zwischen Änderungen von a) Unwucht und Rundlauf sowie von b) Planlauf und Rundlauf (bei Referenzdrehzahl 2.000 min^{-1})

Dauerhafte Änderungen des Planlaufs übersteigen hingegen deutlich die erweiterte Messunsicherheit (Abbildung 6-40 c). In Änderungen der Unwucht bilden sie sich allerdings nicht eindeutig ab, da eine Änderung des Planlaufs nur eine Änderung der Momentenunwucht bewirkt. Der im Prüfstand integrierte Kraftsensor kann nur Änderungen der statischen Unwucht des Prüfkörpers erfassen, da sich kein weiterer Kraftsensor in einer zweiten Messebene befindet. Die Auswirkung einer dauerhaften Änderung des Planlaufs bzw. einer Verkipfung des Blechpakets auf die Momentenunwucht kann rechnerisch abgeschätzt werden: Unter Annahme eines idealen Hohlzylinders mit den Abmessungen des hier geschleuderten Blechpakets, der mittleren Masse 586,85 g und einer Änderung des Planlaufs um 15 μm auf einem Teilkreisdurchmesser von 96 mm bzw. einer Verkipfung um $0,009^\circ$ ergibt sich eine Änderung der Momentenunwucht um 68,1 gmm^2 . Beträgt der Lagerabstand eines Rotors 100 mm, so bewirkt die Momentenunwucht pro Lagerebene einen Unwuchtbeitrag von 0,68 gmm. Dieser entspricht 33,6 % der für die Wuchtgüte G 2,5 pro Lagerebene zulässigen Unwucht in Höhe von 2 gmm (bei max. Drehzahl 15.000 min^{-1} , Rotormasse: 2,55 kg). Bezogen auf die zulässige Unwuchtänderung zwischen der Wuchtgüte G 2,5 und G 6,3 beträgt dieser Unwuchtbeitrag 22,1 %. Ändern alle vier Blechpakete eines Rotors ihren Planlauf um dieses Maß, so können bereits 88,4 % der zulässigen Unwuchtänderung erreicht sein.

Dauerhafte Änderungen des Planlaufs werden genaueren Korrelationsanalysen unterzogen: **Eine starke Verringerung des Planlaufs des Blechpakets beim Aufschumpfen begünstigt im Schleuderversuch eine geringe dauerhafte Änderung des Planlaufs** (Abbildung 6-42 a). Ein reduzierter Betrag der Änderung des Planlaufs begünstigt zudem einen geringen Betrag der dauerhaften Änderung der Unwucht (Abbildung 6-42 b). Allerdings ist die Unwuchtänderung geringer als die Messunsicherheit.

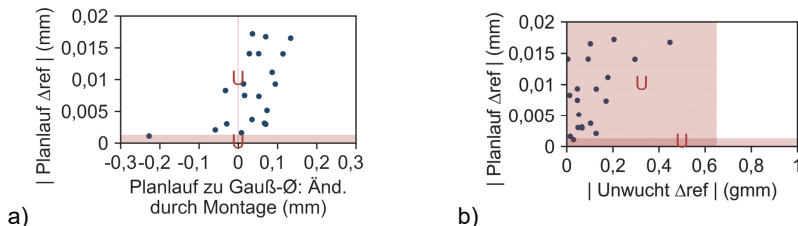


Abbildung 6-42: Korrelationsanalyse zwischen Betrag der dauerhaften Änderung des Planlaufs mit a) Änderung des Planlaufs beim Aufschumpfen und b) Betrag der dauerhaften Änderung der Unwucht

In Abbildung 6-43 werden dauerhafte Änderungen Δbel dargestellt, die der Differenz zwischen dem letzten und dem ersten Belastungslauf entsprechen. Bei allen drei Messgrößen liegt ein bedeutender Anteil der Änderungen innerhalb der Messunsicherheiten (Abbildung 6-43). Bei der Belastungsdrehzahl gemessene Änderungen des Rund- und Planlaufs betragen weniger als $3\text{ }\mu\text{m}$ (Abbildung 6-43 b) und c). Die vier oberhalb der Messunsicherheit gemessenen Steigerungen des Rundlaufs entsprechen in nur einem Fall einer auch bei der Referenzdrehzahl gemessenen Steigerung des Rundlaufs. Die drei oberhalb der Messunsicherheit gemessenen Steigerungen des Planlaufs entsprechen bei der Referenzdrehzahl einer Verringerung des Planlaufs. Änderungen von Unwucht, Rundlauf und Planlauf, die zwischen dem ersten und letzten Belastungslauf gemessen werden, befinden sich daher innerhalb der Messunsicherheiten oder sind als Ausreißer zu deklarieren.

Fazit: Dauerhafte Änderungen von Unwucht, Rundlauf und Planlauf treten bereits während des ersten Belastungslaufs auf. Dies wird insbesondere durch eine Gegenüberstellung der pro Referenzlauf gemessenen, dauerhaften Änderungen der Unwucht, des Rundlaufs und des Planlaufs deutlich (Abbildung 6-44 a) bis c). Die Abbildungen stellen jeweils die Änderung zum vorherigen Referenzlauf dar und beginnen deshalb auf der x-Achse beim zweiten Referenzlauf.

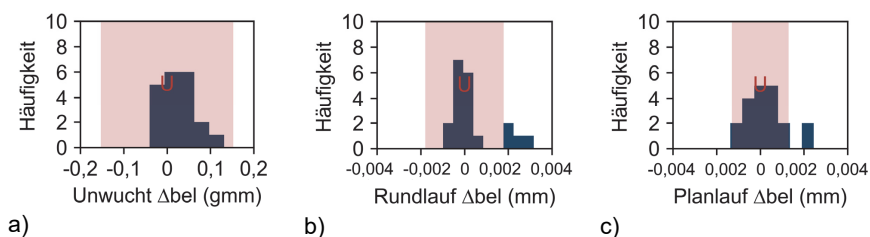


Abbildung 6-43: Dauerhafte Änderung von Unwucht, Rundlauf und Planlauf bei 20 Blechpaketen ohne Magnettaschen (bei Belastungsdrehzahl 15.000 min^{-1} gemessen)

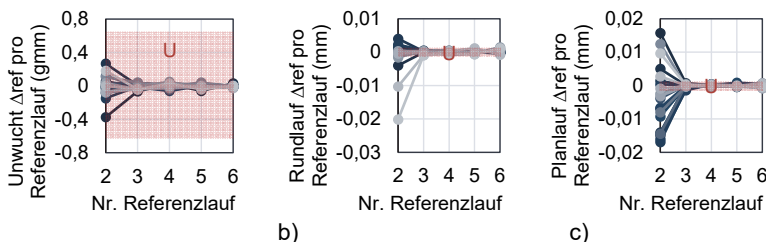


Abbildung 6-44: Pro Referenzlauf gemessene Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (20 Prüfkörper mit jeweils einem Blechpaket ohne Magnettaschen)

6.6.2 Zwei Blechpakete ohne Magnettaschen

Um den Einfluss zwei miteinander interagierender Blechpakete zu bewerten, werden zwei Blechpakete auf eine gemeinsame Welle geschrumpft. Wie beim Aufschrumpfen einzelner Blechpakete wird eine Änderung des Planlaufs und ein anschließendes Umstülpen der Oberseite des obersten Blechpakets beobachtet. Die Blechpakete verformen sich gemeinsam. Liegen zu Beginn des Schrumpfprozesses zwischen den Blechpaketen Spalte vor, schließen sich diese während des Absenkens des Außendurchmessers (Abbildung 6-45 a) und b). Wie bei Prüfkörpern mit nur einem Blechpaket wird die Welle axial in der Aufnahme des Schleuderprüfstands verschraubt. Der Rundlaufsensor wird in seiner axialen Position nicht verändert und misst so die Änderung des Rundlaufs am unteren Blechpaket. Der Planlaufsensor erfasst die Änderung des Planlaufs an der Oberseite des oberen Blechpakets (Abbildung 6-45 c).

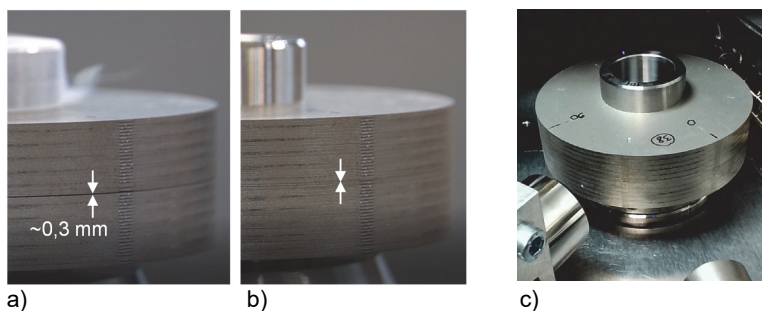


Abbildung 6-45: Prüfkörper mit zwei Blechpaketen ohne Magnettaschen: a) zu Beginn und b) zum Ende des Schrumpfprozesses sowie c) im Schleuderprüfstand

Die gemessenen Änderungen von Unwucht, Rundlauf und Planlauf entsprechen vergleichbaren Größenordnungen wie an einzelnen Blechpaketen (Abbildung 6-46 bis

Abbildung 6-48). Änderungen aller drei Messgrößen finden ebenfalls hauptsächlich während des ersten Belastungslaufs statt (Abbildung 6-49).

Fazit: Es wird davon ausgegangen, dass Erkenntnisse, die an Schleuderversuchen mit einzelnen Blechpaketen gewonnen wurden, auf das Verhalten eines Prüfkörpers mit zwei Blechpaketen übertragbar sind.

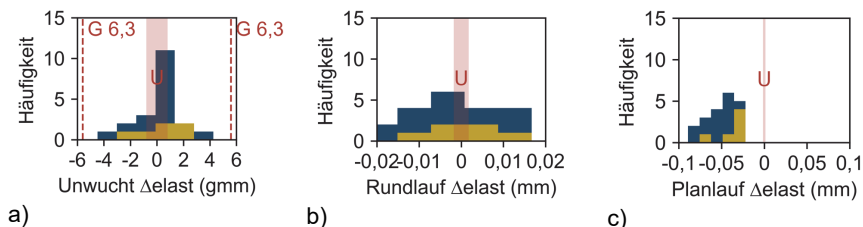


Abbildung 6-46: Vorübergehende Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (Gelb: Sechs Prüfkörper mit zwei Blechpaketen, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket)

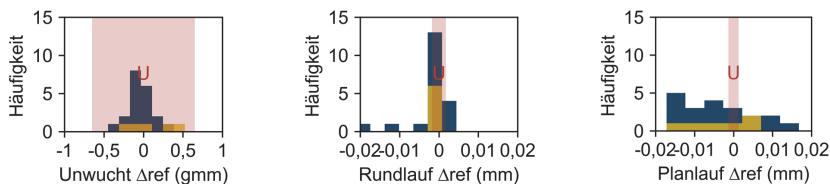


Abbildung 6-47: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (Gelb: Sechs Prüfkörper mit zwei Blechpaketen, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket)

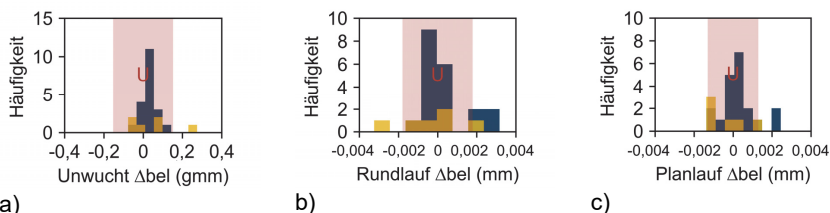
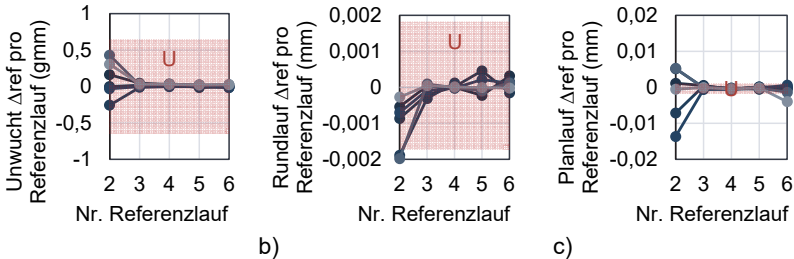


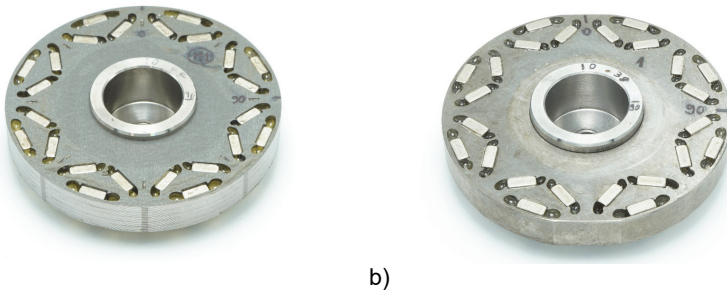
Abbildung 6-48: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei der Belastungsdrehzahl 15.000 min^{-1} gemessen) (Gelb: Sechs Prüfkörper mit zwei Blechpaketen, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket)



a) b) c)
 Abbildung 6-49: Pro Referenzlauf gemessene Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei sechs Prüfkörpern mit zwei Blechpaketen)

6.6.3 Blechpaket mit Magneten

Die in 6.5 beschriebenen Prozesse zur Magnetmontage und zum Schrumpfen auf einen Wellenabschnitt ergeben zwölf Prüfkörper mit vergossenen Magneten. Diese sind zur einen Hälfte als Blechpakete (Abbildung 6-50 a) und zur anderen Hälfte als massive Stahlkörper ausgeführt (Abbildung 6-50 b). Die Stahlkörper entsprechen den Außenabmessungen der Blechpakete.

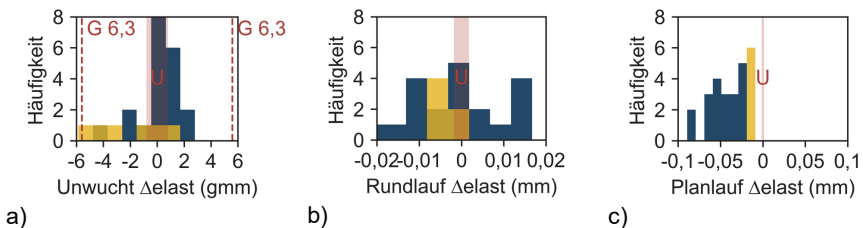


a) b)
 Abbildung 6-50: a) Blechpaket und b) Stahlkörper mit Magnetaschen und darin vergossenen Magneten, auf Wellenabschnitt geschrumpft

An Blechpaketen mit Magnetaschen werden stärkere vorübergehende Verringerungen der Unwucht beobachtet als bei Blechpaketen ohne Magnetaschen (Abbildung 6-51 a). Vergleichsweise starke vorübergehende Reduzierungen der Unwucht können aus der reduzierten radialen Steifigkeit der Blechpakete resultieren. Diese scheint sich allerdings nicht gleichzeitig auf verstärkte vorübergehende Änderungen des Rundlaufs auszuwirken. Vorübergehende Änderungen des Rundlaufs liegen in einer vergleichbaren Größenordnung wie bei Blechpaketen ohne Magnetaschen (Abbildung 6-51 b).

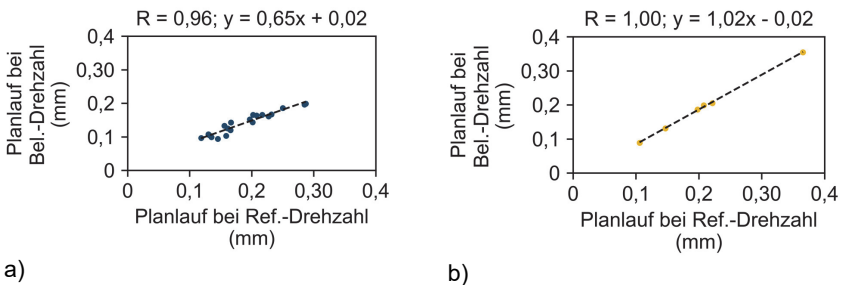
Vorübergehende Änderungen des Planlaufs sind allerdings deutlich geringer als bei Blechpaketen ohne Magnettaschen (Abbildung 6-51 c). Während sich ohne Magnettaschen ein initialer Planlauf von 0,2 mm bei Belastungsdrehzahl vorübergehend auf ca. 0,15 mm verringert, bleibt dieser mit vergossenen Magneten nahezu unverändert bei 0,2 mm (Abbildung 6-52 a) und b). Dieser Unterschied lässt sich über die Steigung der Regressionsgerade beschreiben: Bei Blechpaketen mit darin vergossenen Magneten liegt diese mit 1,02 um 36% höher als bei Blechpaketen ohne Magnettaschen.

Fazit: Die Vergussmasse führt zu einer Versteifung des Blechpakets gegenüber Änderungen des Planlaufs. Die Vergussmasse reduziert bereits beim Aufschumpfen das axiale Absenken des Außendurchmessers (vgl. Abbildung 6-32 b) in Abschnitt 6.5.2.2).



a) b) c)

Abbildung 6-51: Vorübergehende Änderung a) der Unwucht, b) des Rundlaufs und c) des Planlaufs (Gelb: 6 Prüfkörper mit einem Blechpaket mit vergossenen Magneten, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket ohne Magnettaschen)



a) b)

Abbildung 6-52: Vergleich des an Blechpaketen ohne Magnettaschen und mit Magneten bei Referenz- und Belastungsdrehzahl gemessenen Planlaufs

Nach Abbildung 6-53 a) tritt keine messbare dauerhafte Änderung der statischen Unwucht auf. Sie liegt somit innerhalb von $\pm 0,65$ gmm. Aufnahmen eines Durchlichtmikroskops zeigen keine veränderte der Lage der Magnete innerhalb ihrer Magnettaschen. Abbildung 6-54 a) und b) stehen exemplarisch für insgesamt 36 untersuchte Magnetpositionen. Es wird daher davon ausgegangen, dass bei Verwendung des in 6.5.1 beschriebenen Prozesses zur Fixierung der Magnete sowie bei alleiniger Einwirkung der fünf Belastungsläufe mit jeweils 15.000 min^{-1} bei Raumtemperatur keine messbaren Setzeffekte auftreten. Auch an Stahlkörpern mit Magneten werden keine messbaren Unwuchtänderungen oder Setzbewegungen der Magnete festgestellt. Im folgenden Abschnitt 6.6.4 erfolgt daher die Durchführung von Schleuderversuchen mit vorheriger Aufheizung der Prüfkörper. Abbildung 6-53 b) und c) zeigen geringe dauerhafte Änderungen von Rund- und Planlauf. Nur bezüglich des Planlaufs überschreiten dauerhafte Änderungen die Messunsicherheit, sind aber geringer als bei Blechpaketen ohne Magnettaschen.

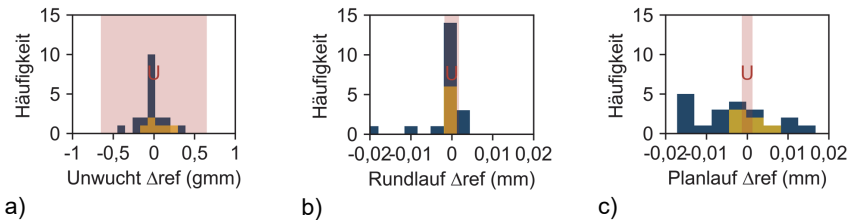


Abbildung 6-53: Bei der Referenzdrehzahl 2.000 min^{-1} gemessene dauerhafte Änderung a) der Unwucht, b) des Rundlaufs und c) des Planlaufs (Gelb: Sechs Prüfkörper mit einem Blechpaket mit vergossenen Magneten, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket ohne Magnettaschen)

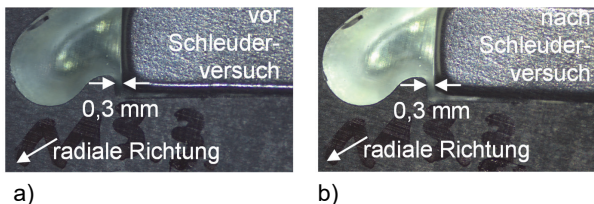


Abbildung 6-54: Lage eines Magneten innerhalb der Magnettasche a) vor und b) nach einem Schleuderversuch bei Raumtemperatur

Zwischen dem ersten und letzten Belastungslauf gemessene dauerhafte Änderungen von Unwucht und Rundlauf liegen innerhalb der Messunsicherheiten (Abbildung 6-55 a) und b). Die Änderungen des Planlaufs übersteigen bzw. unterschreiten hingegen die Messunsicherheit. Sie übersteigen also Änderungen, die an Blechpaketen ohne Magnet Taschen gemessen wurden (Abbildung 6-55 c).

Fazit: Dauerhafte Änderungen des Planlaufs sind bei Blechpaketen mit darin vergossenen Magneten zwar geringer, treten aber nicht mehr hauptsächlich im ersten Belastungslauf, sondern auch in den darauffolgenden Belastungsläufen auf (Abbildung 6-56 c). Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der dauerhaften Änderung der Unwucht (Abbildung 6-56 a). Änderungen des Rundlaufs treten weiterhin hauptsächlich im ersten Belastungslauf auf (Abbildung 6-56 b).

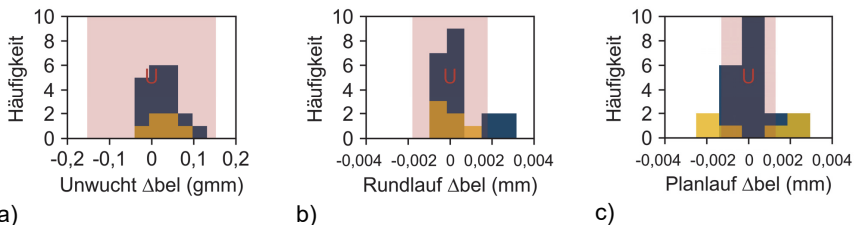


Abbildung 6-55: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei der Belastungsdrehzahl 15.000 min^{-1} gemessen)
(Gelb: Sechs Prüfkörper mit einem Blechpaket mit vergossenen Magneten, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket ohne Magnet Taschen)

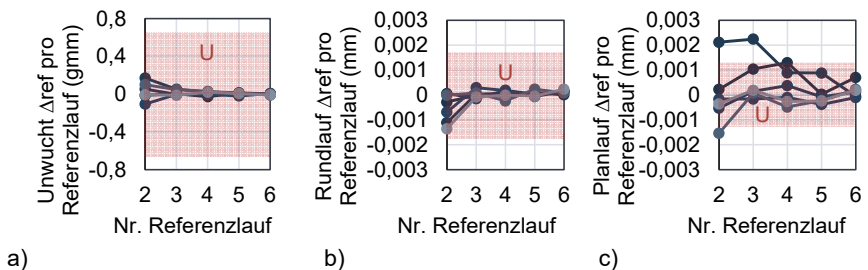


Abbildung 6-56: Pro Referenzlauf gemessene Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei sechs Prüfkörpern mit jeweils einem Blechpaket mit Magneten)

6.6.4 Einfluss einer Temperaturbelastung

Blechkpaket ohne Magnettaschen

Zunächst wird der Einfluss einer Erwärmung eines Blechkpakets ohne Magnettaschen untersucht. Hierzu werden aus den 20 zuvor geschleuderten Prüfkörpern einer mit niedrigem, mittlerem und hohem Planlauffehler ausgewählt. Die Prüfkörper werden im Prüfstand auf 100 °C erwärmt. Sie werden anschließend bei 2.000 min⁻¹ rotiert und währenddessen vermessen. Zum Schutz des Rund- und Planlaufsensors wird der Infrarotstrahler während der Vermessung ausgeschaltet. Der Prüfkörper kühlt sich somit ab und erreicht nach zehn Minuten eine Oberflächentemperatur von näherungsweise 30 °C. Unwucht und Rundlauf des Prüfkörpers steigen innerhalb der Messunsicherheit kontinuierlich an. Dieses Verhalten kann durch einen temperaturbedingten Drift des Sensors oder thermische Ausdehnungen des Prüfkörpers verursacht sein. Der **Planlauf der drei Prüfkörper zeigt hingegen einen welligen Verlauf** (Abbildung 6-57 a) bis c). Es zeigt sich somit das gleiche thermisch bedingte Verhalten des Blechkpakets, das bereits beim Aufschrupfen aufgetreten ist: Temperaturänderungen wirken sich direkt auf Änderungen des Planlaufs aus. Dies kann durch Eigenspannungen sowie das bistabile Verhalten des Blechkpakets verursacht sein, die bei Erwärmung gemeinsam zu thermischem Verzug führen. Zudem reduziert eine Erwärmung des Blechkpakets die Vorspannung der Welle-Nabe-Verbindung. Das Blechkpaket kann sich somit einfacher gegenüber der Welle verkippen. Dies kann Verformungen des Blechkpakets begünstigen. Nur das Blechkpaket mit vergleichsweise niedrigem Planlauffehler nähert sich nach der Erwärmung wieder dem ursprünglichen Planlauf an (Abbildung 6-57 b).

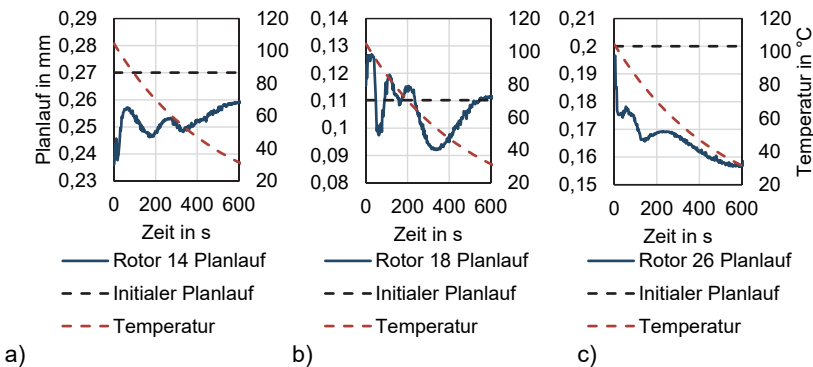


Abbildung 6-57: Zeitlicher Verlauf des Planlaufs aufgeheizter Prüfkörper mit Blechkpaketen ohne Magnettaschen (bei der Referenzdrehzahl 2.000 min⁻¹)

Blechkpaket mit Magneten

In einem weiteren Versuch wird ein Blechkpaket mit darin vergossenen Magneten auf-geheizt und einem Schleuderversuch unterzogen. Hierzu wird der Prüfkörper zunächst in einem Ofen für 2 Stunden auf die maximale Betriebstemperatur der Magnetfixierung erwärmt (155 °C). Um die Magnetfixierung im Schleuderversuch möglichst nah an ihrer Glasübergangstemperatur zu belasten, wurde der Prüfkörper durch den Infrarot-Strahler auf 120 °C erwärmt. Dauerhafte Änderungen der Unwucht und des Rundlaufs liegen allerdings auch bei diesem Versuch innerhalb der Messunsicherheiten. Trotz Temperatur- und Drehzahlbelastung setzen sich die Magnete innerhalb der Magnettaschen nicht. Der in Abbildung 6-58 a) und b) exemplarisch dargestellte Magnet bleibt in seiner Lage unverändert. Die farbliche Veränderung der Magnetfixierung resultiert aus der Temperatursauslagerung des Prüfkörpers bei 150 °C.

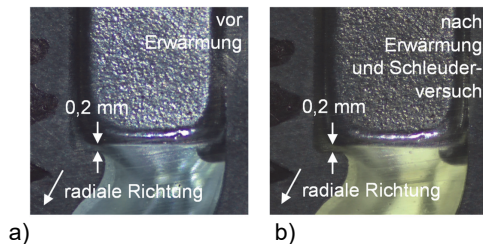


Abbildung 6-58: Unveränderte Lage eines Magneten a) vor und b) nach Erwärmung auf 155 °C und Schleuderversuch bei 120 °C

Auffällig ist hingegen der pro Referenzlauf gemessene Planlauf des Blechkpakets. Im Vergleich zum Schleuderversuch ohne Aufheizung steigt dieser deutlich stärker an (Abbildung 6-59). Zudem zeigt sich erst in den letzten beiden Referenzläufen eine leichte Konvergenz des Planlaufs. Diese kann tatsächlich vorliegen oder durch die Abkühlung des Blechkpakets bedingt sein. Der Anstieg des Planlaufs um 35 µm in Abbildung 6-59 übersteigt deutlich die in Abbildung 6-56 c) bei Raumtemperatur festgestellte maximale Änderung von 6 µm. Derartig auffällige Unterschiede zwischen einem Schleuderversuch ohne und mit Aufheizung sind beim Verlauf der Unwuchtkraft und des Rundlaufs nicht erkennbar. Blechkpakete mit und ohne Magnettaschen weisen somit eine besonders starke Temperaturabhängigkeit des Planlaufs auf.

Fazit: Die unter Temperatur reduzierte Festigkeit der Magnetfixierung führt zwar nicht zu einem Setzen der Magnete, verringert aber die Steifigkeit des Blechpakets gegenüber dauerhaften Änderungen des Planlaufs.

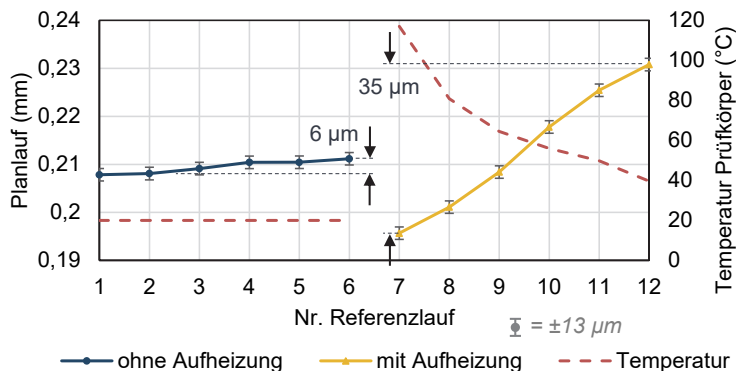

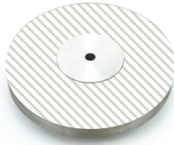
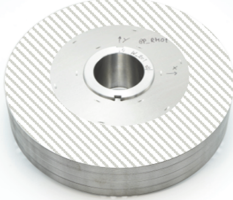


Abbildung 6-59: Planlauf pro Referenzlauf bei zwei aufeinander folgenden Schleuderversuchen an einem Blechpaket mit Magneten.

6.7 Schleuderversuche an industriell hergestellten Blechpaketen

Die in den Abschnitten 6.4 bis 6.6 gesammelten Erkenntnisse werden im Folgenden Schleuderversuchen gegenübergestellt, die an zwei Geometrien mit industriell hergestellten Blechpaketen durchgeführt werden. Diese sind beide jeweils stanzpaketiert, unterscheiden sich allerdings in ihren Abmessungen und ihrer Magnetfixierung. Die Magnete der in 6.7.1 untersuchten Geometrie werden durch ein Transferring im Single-Stack-Molding fixiert. In 6.7.2 geschleuderte Blechpakete enthalten federnd fixierte Magnete. Tabelle 6-4 stellt diese beiden Geometrien der bisher verwendeten Referenzgeometrie gegenüber. Aufgrund geltender Vertraulichkeitsvereinbarungen können die industriellen Geometrien nicht vollständig abgebildet werden.

Tabelle 6-4: Gegenüberstellung der Referenzgeometrie und der zwei industriellen Geometrien

	Referenzgeometrie	Blechkpaket mit Single-Stack-Molding	Blechkpaket mit federnder Magnetfixierung
			
Innen-Ø	38 mm	50 mm	55 mm
Außen-Ø	92,7 mm	138 mm	177 mm
Axiale Höhe	12,9 mm	16 mm	36 mm
WNV	Zylindrischer Querpressverband	Steckverzahnung mit Übergangspassung	Zylindrischer Querpressverband mit zwei Passfedern
Magnetfixierung	Manueller Verguss	Single-Stack-Molding	Federnd im Blechkpaket

6.7.1 Blechkpaket mit Single-Stack-Molding

Aufgrund der Übergangspassung zwischen der Verzahnung des Blechkpakets und der Rotorwelle erfolgt kein Aufschumpfen des Blechkpakets. Das Blechkpaket wird mittels einer Kniehebelpresse auf den Abschnitt der Rotorwelle gepresst, bis es bündig mit der Oberseite der Welle ist. Der Zusammenbau wird in den Prüfstand eingebaut, ausgewuchtet und einem Schleudertest unterzogen. Hierbei werden die für die Referenzgeometrie bisher gewählten Drehzahlen, Haltezeiten und Beschleunigungen beibehalten. Aufgrund einer zu leichten Übergangspassung hat sich das dritte von drei Blechkpaketen während des Schleuderversuchs entlang der Welle um 2 mm nach unten bewegt. Es lag hierdurch außerhalb des Messbereichs des Planlaufsensors. Zudem verfälschte die Abwärtsbewegung die Messung der Änderung von Rundlauf und Unwucht. Es werden daher nur die Schleuderversuche an den ersten beiden Blechkpaketen ausgewertet.

Wie bei der Referenzgeometrie liegen Änderungen der Unwucht innerhalb der Messunsicherheit. Ein Setzen der Magnete ist somit nicht aufgetreten oder hat keine messbare Unwuchtänderung hervorgerufen. Änderungen des Rundlaufs können aufgrund von Reflektionen an den Schnittkanten der Einzelbleche des Blechkpakets nicht zuverlässig

ausgewertet werden. Der Verlauf des Planlaufs bestätigt hingegen das bereits an der Referenzgeometrie beobachtete Verhalten der vorübergehenden und dauerhaften Änderung des Planlaufs: Unter Einwirkung der Belastungsdrehzahl von 15.000 min^{-1} halbiert sich der Planlauf nahezu (Abbildung 6-60 a). Der Planlauf des ersten Blechpakets (1. BP) ändert sich im ersten Belastungslauf vergleichsweise stark und weist bereits im zweiten Referenzlauf einen gesteigerten Planlauf auf (Abbildung 6-60 b). Dies kann durch die Übergangspassung bedingt sein, die unter Fliehkraft ein Ablösen und erneutes Ausrichten des Blechpakets zulässt. Der Planlauf verringert sich in den folgenden Belastungsläufen fortlaufend. Das zweite Blechpaket (2. BP) verändert seinen Planlauf hingegen hauptsächlich in den ersten beiden Belastungsläufen (Abbildung 6-60 b) und c).

Fazit: Auch nach dem ersten Belastungslauf können dauerhafte Änderungen des Planlaufs auftreten. Dies bestätigt das in Abbildung 6-56 c) dargestellte Verhalten der Blechpakete der Referenzgeometrie mit vergossenen Magneten. Als Ursache hierfür wird die stoffschlüssige Magnetfixierung erwartet, die sowohl bei der hier geschleuderten industriellen Geometrie als auch bei der Referenzgeometrie eingesetzt wurde.

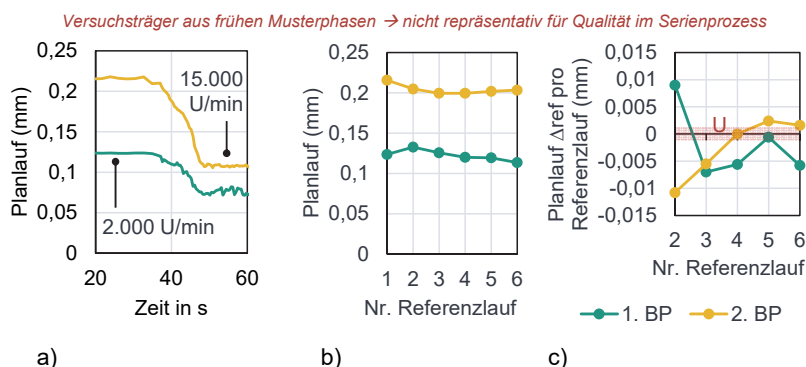


Abbildung 6-60: a) Verlauf des Planlaufs bei zwei Blechpaketen (stanzpaketiert mit anschließendem Single-Stack-Molding) zu Beginn des Schleuderversuchs, b) Planlauf pro Referenzlauf, c) Änderung des Planlaufs pro Referenzlauf

6.7.2 Blechpaket mit federnder Magnetfixierung

Beim Aufschrumpfen des Blechpakets auf die Rotorwelle werden am Außendurchmesser die in Abbildung 6-61 dargestellten Veränderungen beobachtet. Der Stanzgrat der Bleche ist beim Auffädeln des Blechpakets nach oben gerichtet. Innerhalb der ersten 10 s hebt sich die Mantelfläche des Außendurchmessers um die zweifache Blechstärke an. In den folgenden 70 s hebt sie sich um eine weitere Blechstärke an. Die Spalte zwischen Einzelblechen verändern sich während des Schrumpfprozesses sprunghaft und belegen somit das bereits an der Referenzgeometrie festgestellte, bistabile Verhalten stanzpaketierter Blechpakete.

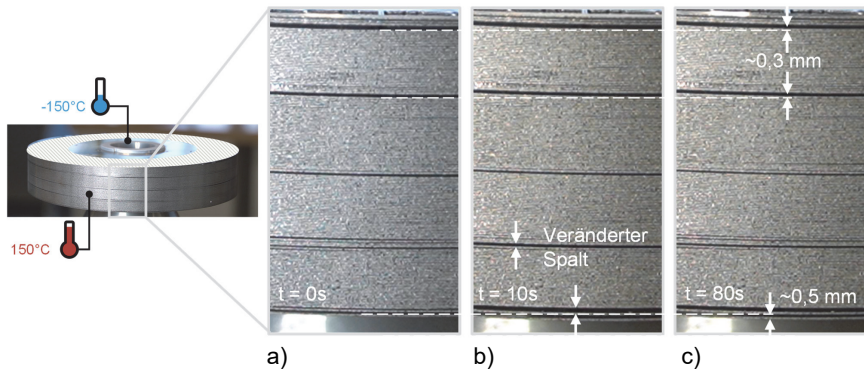


Abbildung 6-61: Zeitliche Veränderung des stanzpaketierten Blechpakets während des Aufschrumpfens: a) zu Beginn b) nach 10s und c) nach 80s

Als Belastungsdrehzahl werden 10.500 min^{-1} definiert. Diese liegt zwar 20 % unterhalb der maximalen Drehzahl des Blechpakets, muss aber aufgrund kritischer Eigenschwingungen des Prüfstands auf diesen Wert reduziert werden. Aus demselben Grund musste der Schleuderversuch am ersten Blechpaket während des ersten Hochlaufs abgebrochen und neu gestartet werden. Es werden zwei Belastungszyklen definiert, deren Haltezeit jeweils 120 s beträgt. Aufgrund des hohen Trägheitsmoments des Versuchskörpers wird die Beschleunigung auf $70 \text{ min}^{-1}/\text{s}$ festgelegt.

Auch bei diesen Schleuderversuchen liegen dauerhafte Unwuchtänderungen innerhalb der Messunsicherheit. Ebenso wie bei den in 6.7.1 geschleuderten Blechpaketen können Rundlaufmessungen aufgrund von Reflexionen nicht zuverlässig ausgewertet werden. Der zeitliche Verlauf des Planlaufs zeigt allerdings erneut unter Einwirkung der Fliehkraft näherungsweise eine Halbierung seines ursprünglichen Wertes. Zudem

reduziert sich der Planlauf während des Hochlaufs entlang eines welligen Verlaufs (Abbildung 6-62 a). Dies kann durch das bistabile Verhalten des Blechpakets bedingt sein, das erst ab dem Überschreiten einer gewissen Fliehkraft eine Veränderung des Planlaufs zulässt.

Fazit: Je höher der im ersten Referenzlauf gemessene Planlauffehler ist, desto stärker ist die bereits im zweiten Referenzlauf festgestellte dauerhafte Änderung des Planlaufs (Abbildung 6-62 b). Änderungen des Planlaufs finden hauptsächlich im ersten Belastungslauf statt. Dies zeigt sich an der pro Referenzlauf ausgewerteten Änderung des Planlaufs in Abbildung 6-62 c).

Eine Gegenüberstellung beobachteter Änderungen des Planlaufs bei der Referenzgeometrie sowie den beiden industriellen Geometrien erfolgt in Abschnitt 6.8. Derselbe Abschnitt fasst die durch Schleuderversuche gewonnenen Erkenntnisse zusammen.

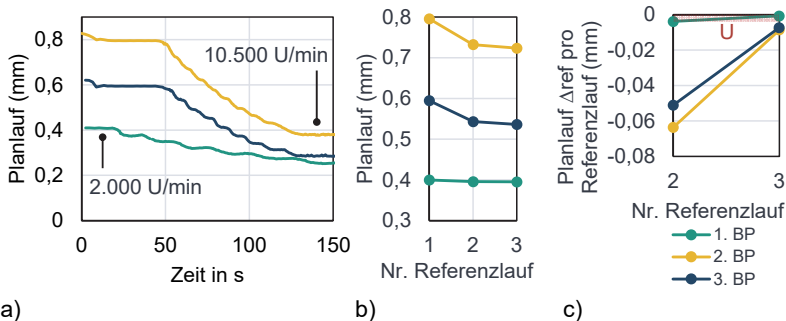


Abbildung 6-62: a) Verlauf des Planlaufs bei drei Blechpaketen (stanzpaketierte und federnde Magnetfixierung) zu Beginn des Schleuderversuchs, b) Planlauf pro Referenzlauf, c) Änderung des Planlaufs pro Referenzlauf

6.8 Zusammenfassung

Dieser Abschnitt fasst Erkenntnisse zusammen, die durch statistische Auswertungen sowie Korrelationsanalysen von Fertigungs- und Montageabweichungen sowie Schleuderversuchen gewonnen wurden. Die Zusammenfassung erfolgt entsprechend der zweiten Forschungsfrage:

*Aufgrund welcher **Fertigungs- und Montageabweichungen** und welcher **Belastungen** (Drehzahl, Temperatur, Dauer der Belastung) treten diese Verformungen und Relativbewegungen **vorübergehend und/oder dauerhaft** auf?*

Die Formulierung „diese Verformungen und Relativbewegungen“ bezieht sich dabei auf die drei Verformungen bzw. Relativbewegungen, die bei der Bearbeitung der ersten Forschungsfrage als besonders relevant identifiziert wurden (Abbildung 6-63). Die folgenden Abschnitte gehen jeweils auf sie ein.

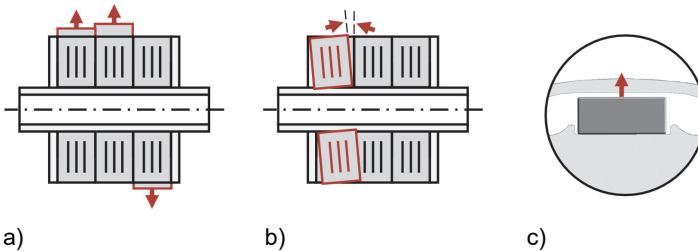


Abbildung 6-63: In Kapitel 5 als kritisch identifizierte Verformungen und Relativbewegungen: a) unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets, b) Verkippung des Blechpakets und c) Setzbewegung der Magnete in Richtung der Höhe

Unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets

Eine vorübergehende unsymmetrische Aufweitung wird hauptsächlich durch die Einwirkung der Belastungsdrehzahl verursacht. Sie ist – gemessen als vorübergehende Änderung des Rundlaufs – bei Blechpaketen ohne Magnet Taschen deutlich stärker ausgeprägt als bei Blechpaketen mit darin vergossenen Magneten ($0,015 \text{ mm} > 0,008 \text{ mm}$, vgl. Abbildung 6-51 b). Die Koaxialität des Außendurchmessers des Blechpakets zu seinem Innendurchmesser beeinflusst die Richtung und den Betrag der Änderung des Rundlaufs (Abbildung 6-38). Eine reduzierte Unwucht des Blechpakets begünstigt eine geringe vorübergehende Änderung der Unwucht des Prüfkörpers (Abbildung 6-37). Einer der 20 Prüfkörper überschreitet unter Einwirkung von Fliehkräften aufgrund einer

vorübergehenden Unwuchtänderung die Wuchtgüte G 6,3 (Abbildung 6-36 a). Eine Erwärmung auf 100 °C ergibt keine messbare Änderung der Unwucht und des Rundlaufs des Blechpakets.

Dauerhafte Änderungen des Rundlaufs treten bereits im ersten Belastungslauf auf, liegen aber innerhalb der Messunsicherheit (Abbildung 6-44 b). Änderungen an Blechpaketen ohne Magnettaschen um mehr als 5 µm werden Ausreißern zugeordnet, da an ihnen gleichzeitig starke Planlaufänderungen auftreten. An Blechpaketen mit Magneten liegen dauerhafte Änderungen innerhalb der Messunsicherheit und sind somit ebenfalls geringer als 1,8 µm (Abbildung 6-56 a).

Verkipfung des Blechpakets

Die Verkipfung des Blechpakets wurde in Schleuderversuchen durch eine Veränderung des Planlaufs erfasst. Sie wird im Folgenden in Grad angegeben, um eine verbesserte Vergleichbarkeit der an verschiedenen Geometrien auf unterschiedlichen Teilkreis-Durchmessern gemessenen Planläufe zu ermöglichen.

Sowohl vorübergehende als auch dauerhafte Verkipfungen sind bei Blechpaketen der Referenzgeometrie ohne Magnettaschen im Betrag höher als bei Blechpaketen mit vergossenen Magneten (Abbildung 6-64 a) und b). Dies wird auf die Vergussmasse zurückgeführt, die eine axiale Versteifung des Blechpakets bewirkt und somit die Steifigkeit gegenüber Änderungen des Planlaufs erhöht. Die versteifende Wirkung wird auch während des Schrumpfprozesses deutlich: Der Außendurchmesser sinkt beim Aufschrumpfen deutlich weniger ab, wenn in den Blechpaketen Magnete vergossen wurden (Abbildung 6-32).

Vorübergehende Änderungen des Planlaufs sind in hohem Maße abhängig vom im ersten Referenzlauf gemessenen Planlauffehler (Abbildung 6-39). Dies trifft auf die Referenzgeometrie ohne Magnettaschen sowie die industriell hergestellten Geometrien zu (Abbildung 6-64 a). Eine Ausnahme bilden Blechpakete der Referenzgeometrie mit Magneten. Sie zeigen bei Raumtemperatur eine vergleichsweise hohe Steifigkeit gegenüber vorübergehenden Änderungen des Planlaufs. Nur bei der industriellen Geometrie mit federfixierten Magneten führt eine erhöhte initiale Verkipfung zu einer höheren dauerhaften Verkipfung (Abbildung 6-64 b). Werden Blechpakete der Referenzgeometrie ohne Magnettaschen auf 100 °C erwärmt und während der Abkühlung vermessen, wird ein unstetiger zeitlicher Verlauf des Planlaufs sichtbar. Dieser kann in einem dauerhaft veränderten Planlauf resultieren (Abbildung 6-57).

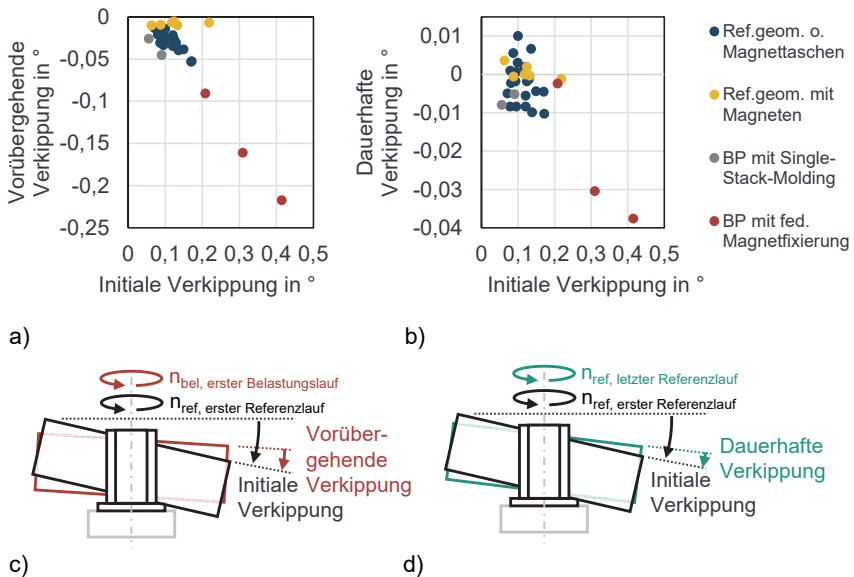


Abbildung 6-64: Gegenüberstellung der bei Schleuderversuchen gemessenen
 a) vorübergehenden und b) dauerhaften Verkipfung des Blechpakets.
 c) und d) Darstellung der in a) und b) ausgewerteten Messgrößen

Bei Blechpaketen ohne Magnettaschen verringert sich die fliehkraftbedingte dauerhafte Änderung des Planlaufs, wenn der Planlauf des Blechpakets bereits bei der Montage auf die Welle stark reduziert wurde (Abbildung 6-42 a). Eine geringe dauerhafte Änderung des Planlaufs begünstigt eine geringe dauerhafte Änderung der Unwucht (Abbildung 6-42 b). Dauerhafte Änderungen des Planlaufs treten bei Blechpaketen, die keine Vergussmasse einsetzen, hauptsächlich im ersten Belastungslauf auf (Abbildung 6-44 c). Beim Einsatz einer Vergussmasse muss über den ersten Belastungslauf hinaus mit Änderungen des Planlaufs gerechnet werden (Abbildung 6-56 c). Die Vergussmasse bewirkt also, dass das Blechpaket nicht nur im ersten, sondern auch im zweiten Belastungslauf ein anelastisches Materialverhalten aufweist. Bei der Geometrie mit Single-Stack-Molding kann dieses Verhalten zusätzlich durch die Steckverzahnung mit Übergangspassung begünstigt sein (Abbildung 6-60 c). Dauerhafte Änderungen des Planlaufs sind besonders hoch, wenn ein Blechpaket der Referenzgeometrie mit darin vergossenen Magneten im auf 120 °C erwärmten Zustand geschleudert wird (Abbildung 6-59). Die gewählte Konstruktion, vorliegende Fertigungs- und

Montageabweichungen sowie aufgeprägte Drehzahl, Temperatur und Belastungsdauer beeinflussen somit in hohem Maße vorübergehende und dauerhafte Änderungen des Planlaufs.

Setzen der Magnete

Es werden keine Setzbewegungen der Magnete beobachtet. Dies ist auch nach vorheriger Temperaturlagerung und Schleudern im erwärmten Zustand der Fall (Abbildung 6-58). Setzbewegungen stoffschlüssig fixierter Magnete sind somit erst nach andauernder thermischer und mechanischer Belastung zu erwarten. Treten sie dennoch auf, ist ein geringerer Beitrag zu Unwuchtänderungen als bei Änderungen des Rund- und Planlaufs des Blechpakets zu erwarten (Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10).

Ergänzend zur obigen Zusammenfassung werden die in Kapitel 6 gewonnenen Erkenntnisse anhand eines Ursache-Wirkungs-Diagramms dargestellt (Abbildung 6-65). Dieses bildet die Grundlage des folgenden Kapitels, um daraus produktionstechnische Lösungen für die Reduzierung von Unwuchtänderungen ableiten zu können.

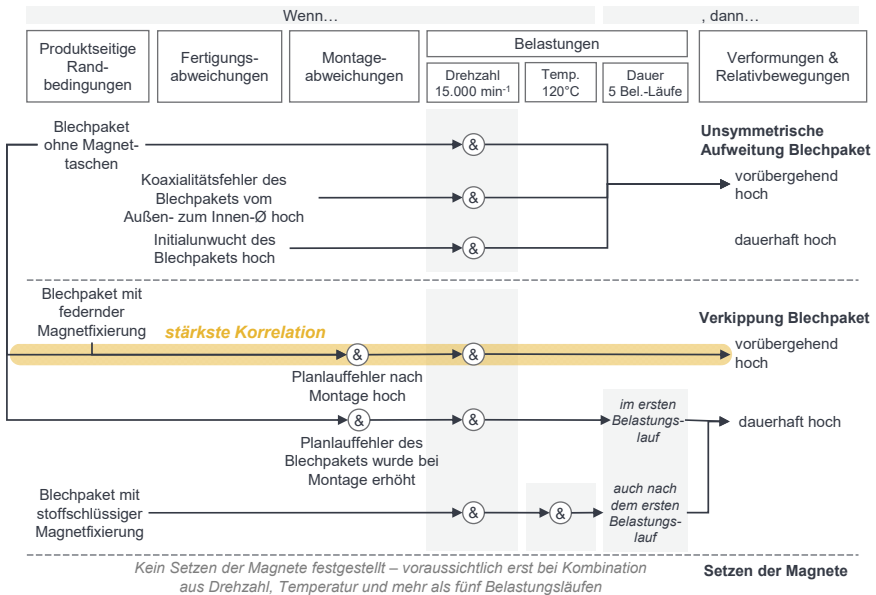


Abbildung 6-65: Beobachtete Wirkzusammenhänge entlang der Gestaltung, Fertigung und Montage der Prüfkörper sowie der aufgeprägten Belastungen und gemessenen Verformungen und Relativbewegungen

Zusammenfassung: Änderungen des Rund- und Planlaufs können zu einem vorübergehenden und dauerhaften Überschreiten der zulässigen Unwuchtänderung führen. Die Beobachtung von Änderungen des Rund- und Planlaufs unter mechanischen und thermischen Lasten sowie der Abgleich mit Fertigungs- und Montageabweichungen ergibt zudem Indizien für Ursachen dauerhafter, im Betrieb auftretender, Unwuchtänderungen. Sie lassen sich allerdings nicht auf vereinzelte Ursachen zurückführen, sondern stellen Ursache-Wirkungs-Ketten entlang der Konstruktion, Fertigung, Montage und dem Betrieb des Rotors dar. Die verbleibende Unschärfe deckt sich mit den Beobachtungen aus (Luchscheider 2015, S. 56), die eine starke Streuung des mechanischen Verhaltens von Blechpaketen beobachtete. Die Ursache wird dort in der zufälligen Interaktion der Rauheit und Welligkeit der Oberflächen der Einzelbleche vermutet. Setzbewegungen der Magnete konnten auch unter gleichzeitiger thermischer und mechanischer Belastung messtechnisch nicht nachgewiesen werden. Es liegen dennoch Erkenntnisse vor, die im folgenden Kapitel in produktionstechnische Lösungen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen überführt werden können.

7 Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen

Der Lösungsraum zur Reduzierung von Unwuchtänderungen wird zunächst in Handlungsfelder unterteilt. Sie unterscheiden sich im Umfang möglicher Anpassungen der Auslegung und Produktion von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe. Hierdurch sollen neben langfristigen auch kurzfristige Lösungsansätze entwickelt werden. Die pro Handlungsfeld erarbeiteten Ansätze werden vorgestellt und anhand der Erkenntnisse vorangegangener Untersuchungen bewertet. Ausgewählte Ansätze werden in Abschnitt 7.6 in einem Proof-of-Concept erprobt. Abschnitt 7.7 fasst Ergebnisse dieses Kapitels entlang der dritten Forschungsfrage zusammen.

7.1 Handlungsfelder entlang der Auslegung und Produktion von PM-Rotoren

Das in Abbildung 7-1 oben dargestellte Handlungsfeld bezieht sich zunächst auf das Verständnis der Ursachen von Unwuchtänderungen. Es stellt die Grundlage der folgenden Handlungsfelder dar.

Das zweite Handlungsfeld umfasst Anpassungen des Schleuderprozesses. Dabei sind keine Anpassungen vorgelagerter Auslegungs-, Fertigungs- und Montageprozesse erforderlich. Dieses Handlungsfeld ist insbesondere dann relevant, wenn ein Unternehmen den Rotor eines Kunden im Build-to-Print produziert und Fertigungs- und Montageprozesse bereits definiert wurden. Da in diesem Handlungsfeld der Schleuderprozess nicht entfällt, bezieht es sich auf reaktive Maßnahmen zur Reduzierung im Betrieb auftretender Unwuchtänderungen. Abschnitt 7.3 stellt einen hierfür geeigneten, adaptiven Schleuderprozess vor (Abbildung 7-1 rechts).

Ein weiteres Handlungsfeld umfasst Anpassungen von Fertigungs- und Montageprozessen. Dadurch soll proaktiv die Neigung eines PM-Rotors zu Unwuchtänderungen reduziert werden. Auch hier sind keine konstruktiven Anpassungen des Rotors erforderlich. Das Handlungsfeld ist bspw. dann zutreffend, wenn ein Design-Freeze einer Rotorgeometrie bereits vorliegt, Fertigungs- und Montageprozesse aber angepasst oder neu definiert werden können. Im besten Fall kann dabei auf einen Schleuderprozess verzichtet werden. Abschnitt 7.4 stellt hierfür den Ansatz einer planlaufminimalen Rotormontage vor (Abbildung 7-1 mittig).

Das vierte Handlungsfeld umfasst die höchste Anzahl an Freiheitsgraden: Sowohl die konstruktive Gestaltung des Rotors als auch seine Fertigungs- und Montageprozesse

können angepasst werden. Im Sinne eines Produkt-Produktions-Codesigns (Albers & Rapp et al. 2022) erfolgt hierbei eine enge Abstimmung zwischen der Auslegungs- und Produktionsabteilung eines Unternehmens. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn ein Unternehmen den gesamten elektrischen Traktionsantrieb oder zumindest den PM-Rotor selbst auslegt und produziert. Diesem Handlungsfeld wird das höchste Potential zugeschrieben, die Neigung von PM-Rotoren zu Unwuchtänderungen proaktiv zu reduzieren und somit auf einen Schleuderprozess zu verzichten (Abschnitt 7.5 und Abbildung 7-1 links).

Abbildung 7-1 fasst diese vier Handlungsfelder zusammen. Im Magnetisierungsprozess möglicherweise begründete Ursachen für Unwuchtänderungen sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekannt. Es wird daher empfohlen, den Einfluss dieses Prozesses vor der Umsetzung von Lösungsansätzen im Einzelfall zu prüfen.

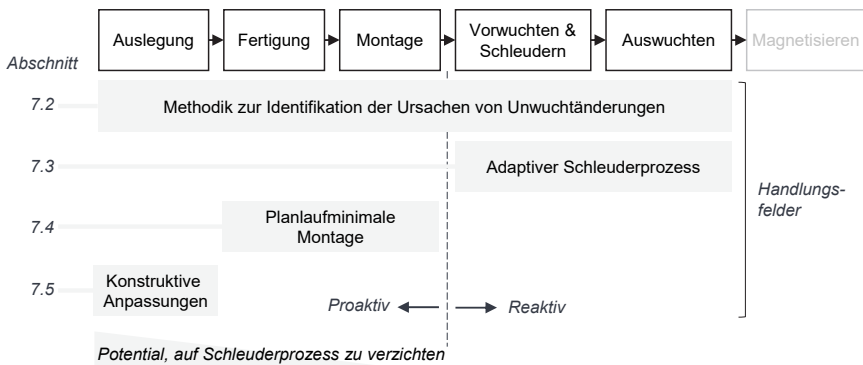


Abbildung 7-1: Vier Handlungsfelder zur reaktiven und proaktiven Reduzierung der Neigung von PM-Rotoren zu Unwuchtänderungen

7.2 Methodik zur Identifikation der Ursachen von Unwuchtänderungen

Weisen aktuell entwickelte oder bereits produzierte PM-Rotoren eine Neigung zu Unwuchtänderungen auf, so ist die Identifikation der Ursachen erforderlich. Abbildung 7-2 stellt eine hierfür geeignete Methodik dar. Sie baut auf der in Kapitel 5 und 6 gewählten Vorgehensweise auf. Die zugehörigen Teilschritte werden im Folgenden erläutert sowie im Anhang anhand von Tabelle A- 5 und Tabelle A- 6 in Form einer Checkliste konkretisiert.

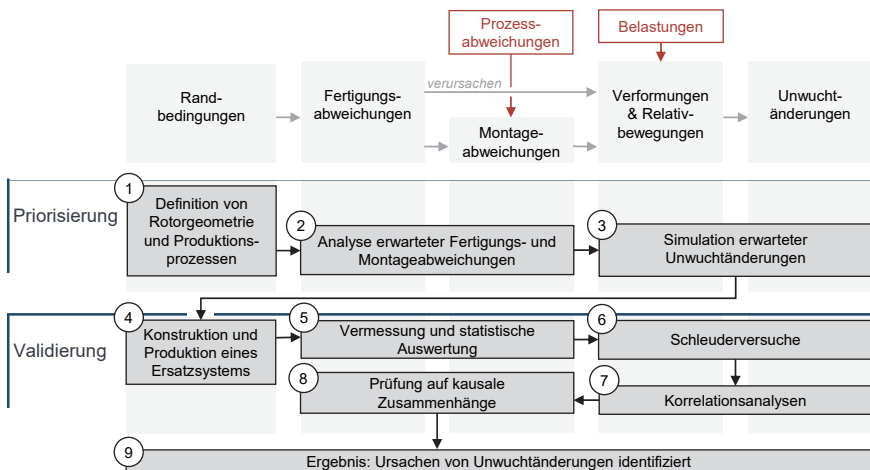


Abbildung 7-2: Methodik zur Identifikation der Ursachen von Unwuchtänderungen

Zur Definition produkt- und prozesseitiger Randbedingungen werden zunächst eine Rotorgeometrie sowie die zugehörigen Fertigungs- und Montageprozesse festgelegt. Im zweiten Schritt erfolgt die Analyse der Fertigungs- und Montageabweichungen, die an den Komponenten der Referenzgeometrie erwartet werden. Unter Berücksichtigung im Betrieb wirkender Belastungen erfolgt im dritten Schritt die Quantifizierung erwarteter Verformungen und Relativbewegungen. Diese dienen zur Simulation erwarteter Unwuchtänderungen. Ergebnis ist die **Priorisierung** derjenigen Verformungen und Relativbewegungen mit dem größten erwarteten Einfluss auch Unwuchtänderungen.

Als erster Teil der **Validierung** umfasst der vierte Schritt die Konstruktion und Produktion der Komponenten eines Ersatzsystems. Es weist nur die Rotorkomponenten auf,

an denen kritische Verformungen und Relativbewegungen erwartet werden. Das Ersatzsystem kann bspw. eine verkürzte Welle und nur ein Blechpaket aufweisen. Daraus folgt – im Vergleich zu kompletten Rotoren – nicht nur ein reduzierter Aufwand zur Herstellung von Prüfkörpern, sondern auch eine verbesserte Zugänglichkeit für eine detaillierte Vermessung vor, während und nach Schleuderversuchen. Im fünften Schritt werden die Einzelkomponenten sowie die montierten Prüfkörper des Ersatzsystems vermessen und statistisch ausgewertet. Hierbei kann bereits untersucht werden, welche Unterschiede zwischen erwarteten und gemessenen Fertigungs- und Montageabweichungen vorliegen. Der sechste Schritt umfasst Schleuderversuche an den Prüfkörpern des Ersatzsystems. Es wird empfohlen, während der Schleuderversuche die Unwucht, den Rundlauf und den Planlauf eines Prüfkörpers fortlaufend zu messen. Im siebten Schritt werden Ergebnisse der Messungen vor, während und nach Schleuderversuchen anhand von Korrelationsanalysen gegenübergestellt. Hierdurch können erste Indizien für Ursachen auftretender Fertigungs- und Montageabweichungen, Verformungen, Relativbewegungen und Unwuchtänderungen gewonnen werden. Die Prüfung berechneter Korrelationen auf kausale Zusammenhänge ist Bestandteil des achten Schritts. Hierbei können weitere Datenauswertungen sowie zusätzliche Versuchsdurchführungen erforderlich sein. Wurde bspw. eine starke Korrelation zwischen dem initialen Planlauffehler eines Blechpakets und der vorübergehenden Änderung des Planlaufs eines Prüfkörpers ermittelt, so können Blechpakete mit besonders hohem und niedrigem Planlauf hergestellt werden. Bestätigen Schleuderversuche an diesen Komponenten die zuvor berechnete Korrelation, kann sie als kausaler Zusammenhang bestätigt werden.

7.3 Adaptiver Schleuderprozess

Neigt ein PM-Rotor zu Unwuchtänderungen und können seine Fertigungs- und Montageprozesse nicht angepasst werden, ist weiterhin ein Schleuderprozess erforderlich. Nach heutigem Stand der Technik wird pro Rotorgeometrie eine feste Anzahl an Belastungsläufen definiert, die jeder Rotor in einem Schleuderprozess durchlaufen muss. Da die Ursachen der Unwuchtänderungen nicht bekannt sind, wird diese Anzahl experimentell bestimmt. Die Anzahl richtet sich nach den Rotoren, die in Schleuderversuchen am meisten Belastungsläufe zum Erreichen eines stabilen Unwuchtzustands benötigt haben. Im Folgenden wird daher ein adaptiver Schleuderprozess vorgestellt, der nur die tatsächlich erforderliche Anzahl an Belastungsläufen umfasst. Die im Durchschnitt erforderliche Anzahl an Belastungsläufen soll dadurch deutlich reduziert werden.

Grundlage des adaptiven Schleuderprozesses ist die Erkenntnis aus den Abschnitten 6.6.1 bis 6.6.3, dass zur Bewertung eines stabilen Unwuchtzustands die Beobachtung der Änderung des Planlaufs ausreichend ist. Liegt zwischen dem aktuellen und dem vorherigen Referenzlauf keine messbare Änderung des Planlaufs vor, so wird in den folgenden Belastungsläufen auch keine messbare Änderung von Unwucht und Rundlauf stattfinden. Dies wird in Abbildung 7-3 deutlich: Liegt die Änderung des Planlaufs innerhalb der Messunsicherheit, so ist dies auch für die Änderung von Unwucht und Rundlauf der Fall.

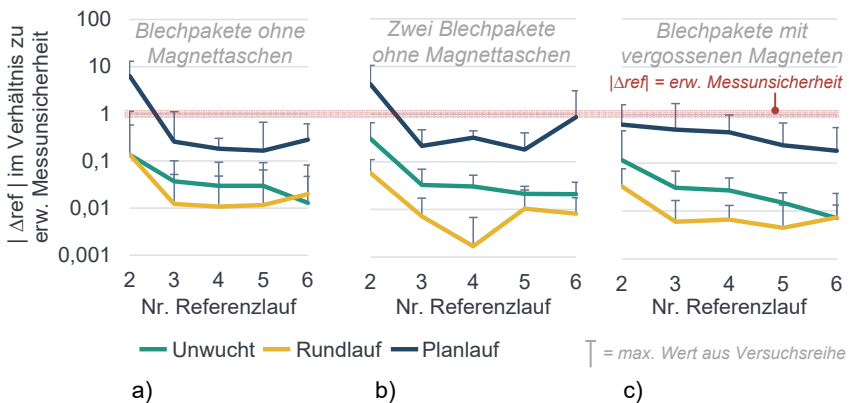


Abbildung 7-3: Änderung pro Referenzlauf im Vergleich zur erweiterten Messunsicherheit bei Schleuderversuchen an a) 20 Prüfkörpern mit je einem Blechpaket ohne Magnettaschen, b) sechs Prüfkörpern mit je zwei Blechpaketen ohne Magnettaschen und c) sechs Prüfkörpern mit je einem Blechpaket mit darin vergossenen Magneten

Hierfür erforderliche Planlaufsensoren können mit vergleichsweise geringem Aufwand in einen bestehenden Schleuderstand integriert werden. Sie können bspw. am Gehäuse der oberen und unteren Lagereinheit befestigt werden (Abbildung 7-4 a). Da während des Schleuderprozesses nur eine Änderung des Planlaufs ausgewertet wird, ist keine besonders hohe Absolutgenauigkeit des Messaufbaus erforderlich. Zudem wirken sich Fehler bei der radialen Zentrierung des Rotors sowie radial gerichtete Schwingungen nur indirekt auf den gemessenen Planlauf aus. Das einzige Kriterium zum erfolgreichen Abschluss des Schleuderprozesses ist die Änderung des Planlaufs zwischen dem aktuellen und dem vorherigen Referenzlauf. Liegt diese bspw. zum zweiten Mal in Folge unterhalb eines definierten Grenzwerts, so kann der Schleuderprozess abgeschlossen werden. Sind anstatt 5 Belastungsläufen bzw. 5 min Prozesszeit

durchschnittlich nur noch 3 Belastungsläufe bzw. 3,3 min erforderlich, so reduziert sich die Prozesszeit um 33% (Abbildung 7-4 b). Unter der Annahme einer Ziel-Stückzahl von 100.000 Rotoren pro Jahr sind somit innerhalb einer Rotormontage-Linie nur zwei statt drei Schleuderstände erforderlich. Nach der Beispielrechnung in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 erlaubt dies die Reduzierung des Investitionsvolumens einer Rotorproduktionslinie um 12 %. Zudem reduziert der Verzicht auf einen Schleuderstand den Energie- und Flächenbedarf der Produktionslinie sowie die von den Schleuderständen ausgehende Lärmbelastung.

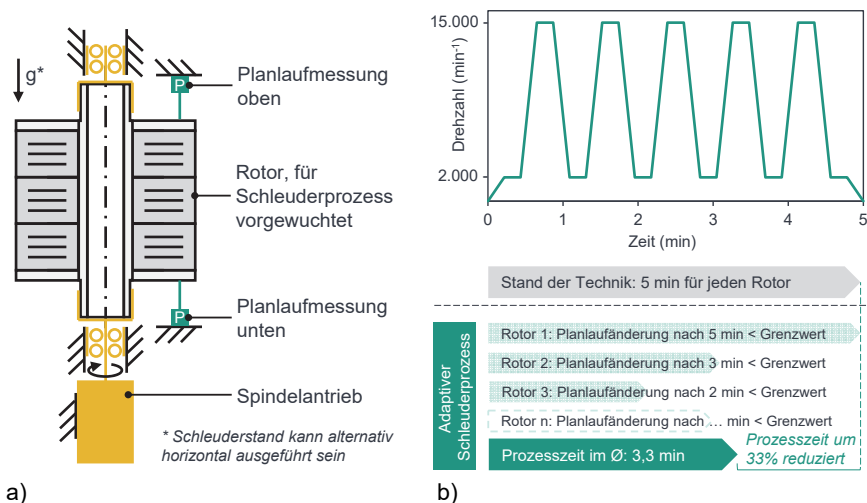


Abbildung 7-4: a) Schleuderstand mit beidseitig integrierten Planlaufsensoren, für adaptiven Schleuderprozess und b) Reduzierung der durchschnittlichen Prozesszeit

Tabelle 7-1: Bestimmung der gewünschten Taktzeit

Ziel:	100.000 Rotoren pro Jahr
Verfügbare Stunden:	3840 Stunden pro Jahr (240 Arbeitstage, 2-Schichtbetrieb, 8 Stunden pro Schicht)
OEE pro Station:	95% jeweils bei 7 Stationen
OEE gesamt:	70%
Ziel-Taktzeit kleiner als:	97 Sekunden

Tabelle 7-2: Beispielrechnung für wirtschaftliches Potential des adaptiven Schleuderprozesses

Prozess	Invest pro Station	Stand der Technik		Adaptiver Schleuderprozess	
		Prozesszeit (s)	Anzahl Stationen	Prozesszeit (s)	Anzahl Stationen
Magnetmontage (für alle Magnete eines Rotors)	350.000 €	120	2	120	2
Fügen Welle-Nabe-Verbindung	650.000 €	60	1	60	1
Rotor vorwuchten	500.000 €	40	1	40	1
Rotor schleudern	900.000 €	300	4	200	3
Rotor auswuchten	500.000 €	40	1	40	1
Magnetisieren	400.000 €	30	1	30	1
End-of-Line-Test	250.000 €	30	1	30	1
Verkettung/ Automatisierung	500.000 €				
Projektierung	300.000 €				
			7.400.000 €	6.500.000 €	
				Einsparung: 12%	

Neben wirtschaftlichen Potentialen bietet ein sensorisierter Schleuderstand weitere technologische Vorteile. Diese sind insbesondere dann hoch, wenn neben den Planlaufsensoren auch Sensoren zur Messung von Unwucht- und Rundlaufänderungen integriert werden. Hierfür sind allerdings größere konstruktive Anpassungen des Schleuderstands erforderlich. Insbesondere die Integration von Kraftsensoren in den Lagerstellen des Schleuderstands ist herausfordernd, da die Messung einerseits möglichst genau sein soll, sie andererseits die dynamische Steifigkeit des Schleuderstands nur in zulässigem Maße beeinträchtigen darf.

Die fortlaufende Aufnahme von Messdaten ermöglicht die Unterscheidung zwischen vorübergehenden und dauerhaften Veränderungen des Rotors. Bereits nach dem ersten Belastungslauf kann geprüft werden, ob unzulässige elastische Änderungen des Planlaufs auftreten (Abbildung 7-5 oben). Die zulässige elastische Änderung des Planlaufs kann bspw. über den Einfluss der Verkipfung der Blechpakete auf die Momentenunwucht des Rotors bestimmt werden (vgl. Abschnitt 2.2.1.2). Hierdurch kann geprüft werden, ob unter Einwirkung der Maximaldrehzahl ein unzulässiger Beitrag einer Momentenunwucht zu erwarten ist. Beim Auswuchten bei niedriger Auswuchtdrehzahl (bspw. 1.000 U/min) ließe sich dieser drehzahlabhängige Unwuchtbeitrag nicht

messen. Nach Abschluss des zweiten Referenzlaufs kann geprüft werden, ob plastische bzw. dauerhafte Änderungen des Planlaufs einen zulässigen Grenzwert überschreiten (Abbildung 7-5 unten rechts). Der zugehörige Grenzwert kann ebenfalls über den Zusammenhang der Verkippung von Blechpaketen mit der Momentenunwucht des Rotors bestimmt werden. Liegt eine zulässige plastische Änderung des Planlaufs vor, kann der Schleuderprozess frühzeitig beendet werden. Wird der Grenzwert hingegen nicht eingehalten, muss der Rotor einem weiteren Belastungslauf unterzogen werden. Wird eine maximal zulässige Anzahl an Belastungsläufen überschritten, muss der Schleuderprozess abgebrochen werden (Abbildung 7-5 unten). Dies soll verhindern, dass einzelne Rotoren den Schleuderstand zu lange belegen. Entsprechende Rotoren können daraufhin einer Befundung und/oder Nacharbeit übergeben werden.

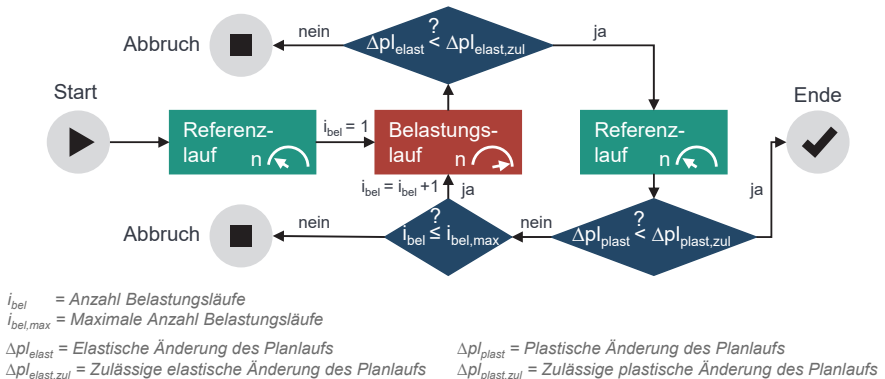


Abbildung 7-5: Schleuderprozess zur Reduzierung der Anzahl erforderlicher Belastungszyklen und zur Beobachtung vorübergehender und dauerhafter Planlaufänderungen

Darüber hinaus bieten Unwucht- sowie Rund- und Planlaufmessungen vor, während und nach einem Schleuderprozess ein hohes Potential für die Live-Analyse von Ursachen vorübergehender und dauerhafter Verformungen und Relativbewegungen der Rotorkomponenten. Parallel zur laufenden Serienproduktion kann analysiert werden, ob anhand der geometrischen Abweichungen des Rotors bereits vor dem Schleuderprozess eine Vorhersage des Betrags und sogar der Winkellage einer vorübergehenden Unwuchtänderung möglich ist. Die Vorhersage könnte beim folgenden Auswuchtprozess im Sinne einer Kompromissauswuchtung berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.3.3.2). Darüber hinaus kann analysiert werden, welche Fertigungs- und

Montageabweichungen eines Rotors sich in besonderem Maße auf die im Schleuderprozess erforderliche Anzahl an Belastungsläufen auswirken. Zukünftig können hierdurch Rotoren identifiziert werden, die keinen Schleuderprozess erfordern. Sie dürfen den Vorwucht- und Schleuderprozess überspringen und können direkt dem finalen Auswuchtschritt übergeben werden. Rotoren, die voraussichtlich besonders viele Belastungsläufe benötigen werden, können bereits vor dem Schleuderprozess einer Nacharbeit unterzogen werden.

7.4 Planlaufminimale Montage

Der folgende Ansatz kann für PM-Rotoren angewendet werden, deren Konstruktion zwar nicht verändert werden kann, deren Fertigungs- und Montageprozesse aber noch angepasst werden dürfen. Da Unwuchtänderungen hauptsächlich auf das mechanische Verhalten der Rotorblechpakete zurückzuführen sind, bezieht sich der Ansatz sowohl auf die Fertigung der Blechpakete als auch auf deren Montage auf die Rotorwelle.

Entsprechend der in Abschnitt 6.6.1 vorgestellten Versuchsergebnisse begünstigt eine verringerte Initialunwucht des Blechpakets eine geringe vorübergehende Unwuchtänderung (Abbildung 6-37). Je geringer der Planlauf des Prüfkörpers bei Referenzdrehzahl, desto geringer die vorübergehende Änderung des Planlaufs unter Einwirkung der Betriebsdrehzahl (Abbildung 6-39). Allerdings kann ein gesteigerter Zylindrizitätsfehler einen erhöhten Planlauf und eine gesteigerte Unwucht des Prüfkörpers hervorrufen (Abbildung 6-31). Ein direkter Einfluss der Zylindrizität des Innendurchmessers auf die Initialunwucht des Blechpakets konnte nicht festgestellt werden. Abbildung 7-6 bildet die soeben genannten Wirkzusammenhänge ab und stellt heraus, dass beim Stanzpaketieren des Blechpakets besonders die Zylindrizität des Innendurchmessers zu beobachten ist. Der Stanzpaketierprozess ist derart zu gestalten, dass ein Optimum aus Planlauf, Zylindrizität des Innendurchmessers und Initialunwucht erreicht wird. Entsprechend Abbildung 7-7 ist zu erwarten, dass ohne Verdrehung der Einzelbleche zwar ein minimaler Zylindrizitätsfehler erreicht, aber der Planlauffehler gleichzeitig erhöht wird. Eine Verdrehung der Bleche verbessert voraussichtlich den Planlauf, kann aber gleichzeitig die Zylindrizität des Innendurchmessers verschlechtern (Abbildung 7-7 a) bis c). Aus der Verdrehung der Einzelbleche ergibt sich die in Abbildung 6-20 a) beobachtete Welligkeit des Innendurchmessers, welche wiederum die gemessene Zylindrizitätsabweichung erhöht. Eine Verdrehung möglichst vieler Bleche kann allerdings dennoch vorteilhaft sein, um innerhalb eines Blechpakets eine Homogenisierung des orthotropen

Materialverhaltens der Einzelbleche zu erreichen. Darüber hinaus ist bei der Prozessauslegung zu berücksichtigen, dass Verdrehbewegungen des Stanz- und Paketierwerkzeugs in der Regel nicht im Takt der Stanzpresse erfolgen können. Die Anzahl erforderlicher Verdrehungen wirkt sich somit negativ auf die erforderliche Prozesszeit aus.

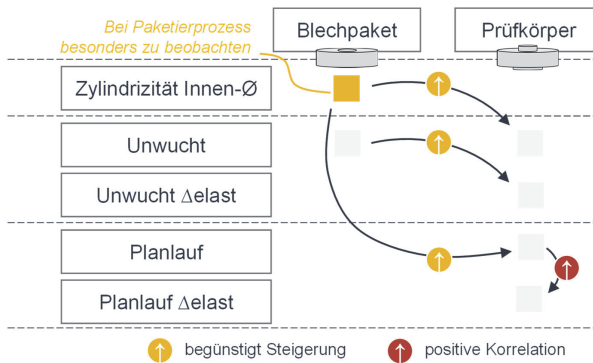


Abbildung 7-6: Besondere Bedeutung der Zylindrizität des Innendurchmessers des Blechpakets für die Unwucht und den Planlauf des Prüfkörpers

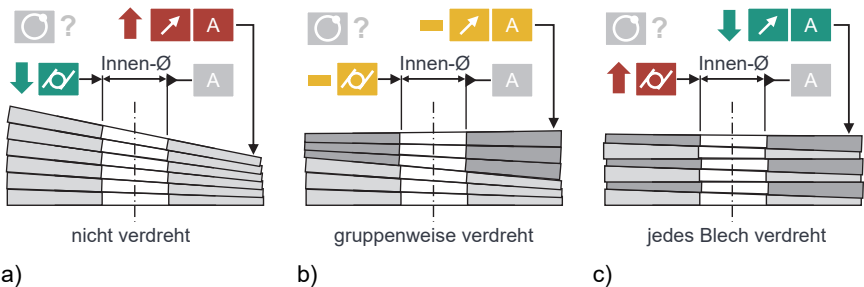


Abbildung 7-7: Erwarteter Einfluss der Verdrehung der Einzelbleche auf geometrische Abweichungen eines Rotorblechpakets

Analog zum Verdrehen der Einzelbleche wird empfohlen, die Blechpakete derart auf die Rotorwelle zu montieren, dass der Rotor an seinen Planseiten einen möglichst geringen Planlauf aufweist. Dies ist möglich, wenn eine Vermessung des Planlaufs der einzelnen Blechpakete für die Berechnung einer planlaufminimalen Anordnung der Blechpakete eingesetzt wird. Je nach konstruktiver Gestaltung des Blechpakets liegen hierfür Freiheitsgrade in der Reihenfolge und Orientierung der Blechpakete auf der

Rotorwelle vor (Abbildung 7-8). Vorzugsweise liegen ausreichend Freiheitsgrade vor, um bereits innerhalb der bspw. vier Blechpakete eines Rotors eine Optimierung zu ermöglichen. Dadurch ließe sich eine Einteilung der Blechpakete in Klassen vermeiden. Zur Umsetzung dieses Optimierungsverfahrens kann bspw. ein evolutionärer Algorithmus eingesetzt werden. In (Wößner & Peter et al. 2019) und (Wößner & Uhl et al. 2019) kam ein gleichartiger Algorithmus bereits erfolgreich für eine unwuchtminimale Anordnung von Blechpaketen auf einer Rotorwelle zum Einsatz. Im Gegensatz zum in Abschnitt 3.3.1 beschriebenen Ansatz aus (Wurster 2021) soll der Algorithmus nicht nur thermische Spannungen zwischen den Blechpaketen vermeiden, sondern auch den Planlauf an beiden Enden des montierten Rotors verbessern. Bei verbessertem Planlauf des Rotors wird gleichzeitig eine reduzierte Unwucht des Rotors erwartet. Bei der Umsetzung ist allerdings zu prüfen, inwiefern ein planlaufminimaler Aufbau sich auf den Rundlauf des Rotors auswirkt. Idealerweise liegen – wie bei den Blechpaketen der Referenzgeometrie – der Planlauf- und der Koaxialitätsfehler in entgegengesetzten Winkelagien (vgl. Abbildung 6-22). Dies steigert die Wahrscheinlichkeit, dass ein Rotor mit reduziertem Planlauf auch einen reduzierten Rundlauf, eine geringe Unwucht und somit eine reduzierte Unwuchtänderung aufweist.

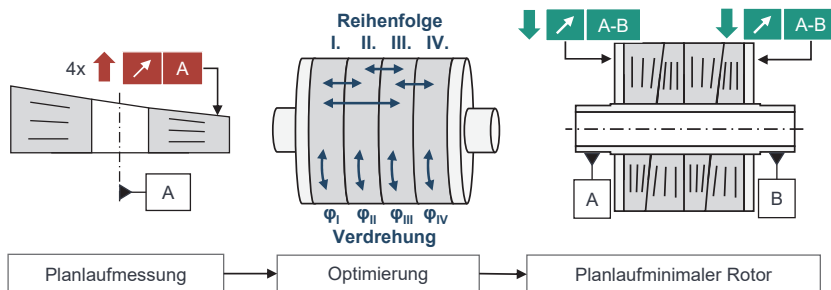


Abbildung 7-8: Ansatz der planlaufminimalen Rotormontage

Die Messung geometrischer Abweichungen von Blechpaketen vor und nach der Montage auf die Rotorwelle bietet zudem weitere Potentiale: Anhand der Messwerte kann bewertet werden, in welchem Maße die Montage auf die Rotorwelle Veränderungen der Blechpakete bewirkt und welche Fertigungsabweichungen sich in besonderem Maße auf die Initialunwucht des Rotors auswirken. Möglicherweise können bei der Vermessung Blechpakete identifiziert werden, die aufgrund ihrer Fertigungsabweichungen zu

besonders hohen Änderungen der Rotorunwucht führen würden. Sie können durch den Messprozess bereits vor der Montage auf die Rotorwelle ausgeschleust werden.

7.5 Konstruktive Anpassungen

Das höchste Potential zur Reduzierung von Unwuchtänderungen und den Verzicht auf einen Schleuderprozess bieten ganzheitliche Anpassungen der Konstruktion, Fertigung und Montage eines PM-Rotors. Da Möglichkeiten zur Anpassung der Fertigung und Montage im vorherigen Abschnitt bereits vorgestellt wurden, werden im Folgenden Lösungsansätze zur konstruktiven Anpassung eines PM-Rotors vorgestellt. Als Randbedingung wird vorausgesetzt, dass ein Magnetträger weiterhin aus gestapelten Elektrolechen besteht. Alternativen wie bspw. Magnetträger aus Soft Magnetic Composites (Koch & Peter et al. 2017, S. 287–288) sind für elektrische Traktionsantriebe aufgrund der geforderten mechanischen und thermischen Belastbarkeit sowie der geforderten magnetischen Permeabilität nicht in gleichem Maße einsetzbar. Magnete werden weiterhin als Seltenerd-magnete ausgeführt, um auch unter hoher thermischer und magnetischer Belastung eine hohe magnetische Flussdichte zu ermöglichen. Sie behalten also ihr sprödes Materialverhalten bei und dürfen nur in geringem Maße mechanisch belastet werden. Zur Minimierung von Herstellungskosten sollen sie weiterhin quaderförmig sein. Zudem sollen sie weiterhin als vergrabene Magnete ausgeführt und somit innerhalb des Magnetträgers positioniert sein.

Empfohlen wird zunächst die Steigerung der Steifigkeit des Blechpakets gegenüber Änderungen des Planlaufs (Abbildung 7-9 oben links). Es ist zu erwarten, dass dies – bei gleichbleibendem Außendurchmesser – durch eine Vergrößerung des Innendurchmessers erreicht werden kann. Dies reduziert gleichzeitig die Masse des Blechpakets, wodurch Verformungen des Blechpakets sich weniger stark auf Änderungen der Rotorunwucht auswirken. Es ist allerdings zu prüfen, ob ein vergrößerter Innendurchmesser bspw. zu vergrößerten Zylindrizitätsabweichungen führt. Diese würden sich negativ auf Unwuchtänderungen auswirken. Ebenso muss berücksichtigt werden, inwiefern eine Vergrößerung des Innendurchmessers ohne Beeinträchtigung der elektromagnetischen Auslegung des Blechpakets möglich ist. Beim Einsatz einer Paketierung mittels Backlack ist ebenfalls eine axiale Versteifung des Blechpakets zu erwarten. Ihr mechanisches Verhalten unter Temperatur ist allerdings zu bewerten. Zudem kann geprüft werden, inwiefern eine Wuchtscheibe für eine Steigerung der Steifigkeit gegenüber einer Verkipfung eingesetzt werden kann. Hierbei kann die Verwendung einer

Wuchtscheibe vorteilhaft sein, die durch eine Ausführung als Tellerfeder eine hohe versteifende Wirkung aufweist (Dönges & Schulte 2021).

Eine Steigerung der Steifigkeit des Blechpakets gegenüber einer radialen Aufweitung wird ebenfalls empfohlen (Abbildung 7-9 oben rechts). Dies kann durch eine Verbreiterung der Stege des Blechschnitts erreicht werden, muss aber unter Berücksichtigung der elektromagnetischen Eigenschaften des Rotors erfolgen. Können diese Stege nicht angepasst werden, kann eine Versteifung des Rotors durch eine Bandagierung erreicht werden. Sie wird bspw. am Rotor des Antriebs des Tesla Model S Plaid eingesetzt, auch wenn sie den effektiven Luftspalt zwischen Rotor und Stator und damit einhergehende Verluste vergrößert (Olsen & Nelson et al. 2021). Alternativ kann die radiale Steifigkeit über den Einsatz kohlefaserverstärkter Verbindungselemente erhöht werden. Aktuell liegt hierfür allerdings kein industrieller Fertigungs- und Montageprozess vor (Gong & Heim et al. 2022, S. 53). Eine Übersicht bei Synchronreluktanzmaschinen eingesetzter Ansätze zur Steigerung der radialen Steifigkeit des Blechpakets kann (Hausmann & Waldhof et al. 2020, S. 292) entnommen werden. Gerade bei diesem Maschinentyp besteht die Herausforderung darin, mit möglichst wenigen weichmagnetischen radialen Stegen eine ausreichend hohe radiale Steifigkeit zu erreichen.

Unter Einwirkung der Fliehkraft reduziert sich vorübergehend der Fugendruck innerhalb der Welle-Nabe-Verbindung. Das Blechpaket wird somit am Innendurchmesser vorübergehend entlastet und kann bei erneuter Belastung des Innendurchmessers eine veränderte Form und Orientierung annehmen. Es wird daher eine Welle-Nabe-Verbindung empfohlen, welche auch unter Fliehkraftbelastung einen möglichst konstanten Fugendruck aufrechterhalten kann. Hierzu kann bspw. eine Polygonwelle geeignet sein, die aufgrund ihrer federnden Wirkung eine radiale Aufweitung des Blechpakets kompensiert. Zudem ermöglicht eine derartige Welle ein Aufpressen der Blechpakete bei Raumtemperatur. Hierdurch können thermisch unterstützte Prozesse und damit verbundene Energieverbräuche entfallen (Abbildung 7-9 unten rechts) (Dönges & Buchkremer et al. 2019) (Wößner & Gürbüz et al. 2022, S. 669).

Gemäß 6.6.3 beeinflusst die Magnetfixierung das mechanische Verhalten des Blechpakets. Dies äußert sich insbesondere bei Blechpaketen, in denen Magnete mit einer Vergussmasse fixiert wurden: Die Vergussmasse reduziert zwar vorübergehende und dauerhafte Änderungen des Planlaufs, schließt diese aber nicht vollständig aus (Abbildung 6-51 c) und Abbildung 6-53 c). Dauerhafte Änderungen treten auch nach dem ersten Belastungslauf auf (Abbildung 6-56 c). Die Wahl einer kraftschlüssigen

Magnetfixierung, bspw. durch den Einsatz von Federelementen, kann somit einen möglichst kurzen Schleuderprozess begünstigen (Abbildung 7-9 unten). Bei der Gestaltung der Magnet Taschen wird empfohlen, eine Positionierung der Magnete in der radial äußersten Lage sicherzustellen. Dies kann bspw. durch den Einsatz von Federelementen erfolgen, die den Magneten sowohl klemmen als auch positionieren (Abbildung 7-9 unten links) (Bensing & Stammler et al. 2022).

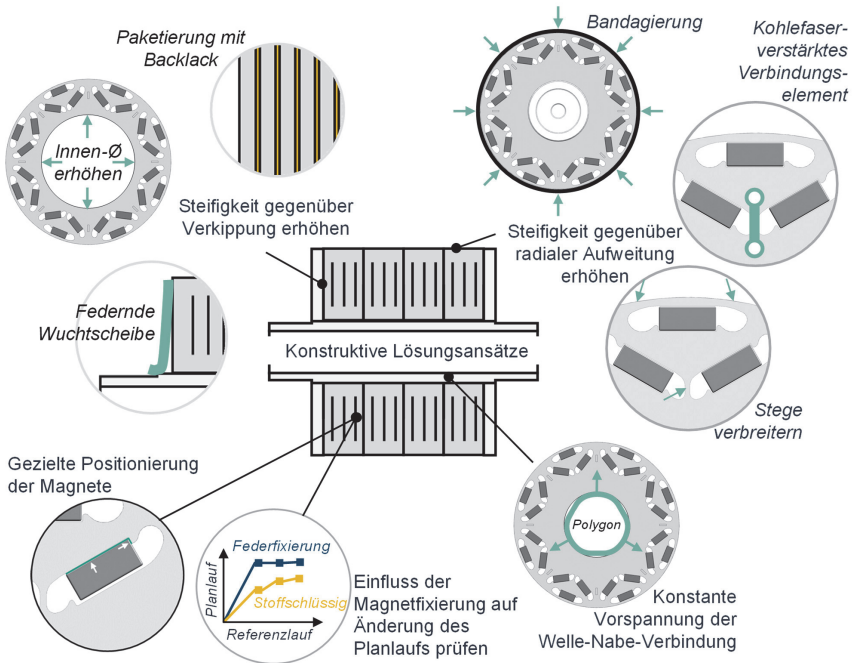


Abbildung 7-9: Konstruktive Lösungsansätze zur Reduzierung von Unwuchtänderungen

7.6 Proof-of-Concept eines neuartigen Leichtbaurotors

Eine Auswahl der zuvor vorgestellten konstruktiven Lösungsansätze soll im Folgenden erprobt werden. Ein neuer Ansatz zur Gestaltung und Herstellung besonders leichter PM-Rotoren ist in Abbildung 7-10 dargestellt. Die Rotorwelle ist als Hybridwelle aus Stahl und kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) ausgeführt und besteht aus zwei metallischen Lasteinleitungselementen sowie einem Faserpreform. In einem Schleuderprozess, bei dem eine Vergussmasse in den Innendurchmesser des Faserpreforms injiziert wird, erfolgt die stoffschlüssige Anbindung der CFK-Stahl-Hybridwelle an die Blechpakete. Fertigungsabweichungen des Innendurchmessers der Rotorblechpakete werden somit kompensiert. Ein gesteigerter Zylindrizitätsfehler des Rotorblechpakets kann hier sogar von Vorteil sein, um eine vergrößerte Oberfläche zur Benetzung mit der Vergussmasse zu bieten. Darüber hinaus können in den Blechpaketen radial verlaufende Kanäle vorgesehen werden, um während des Schleuderprozesses die Vergussmasse auch in die Magnettaschen fließen zu lassen. Die Magnete setzen sich zunächst unter Einwirkung der Fliehkraft und werden erst anschließend von der Vergussmasse umströmt. Die Magnete werden somit an der jeweils radial äußersten Position der Magnettasche fixiert. Im Betrieb mögliche Setzbewegungen der Magnete können dadurch ausgeschlossen werden. Zudem ist bei dieser systematischen Positionierung der Magnete eine verringerte Initialunwucht und nach der Magnetisierung eine reduzierte magnetische Unwucht des Rotors zu erwarten.

Aufgrund des mehrteiligen Aufbaus der Hybridwelle kann zudem eine besonders große Differenz zwischen dem Durchmesser der Lagerstellen und dem Innendurchmesser des Blechpakets realisiert werden. Bei einer einteiligen Welle würde dies einen besonders aufwändigen Zerspanungs- oder Umformprozess erfordern. Durch den gesteigerten Innendurchmesser kann das Blechpaket besonders leicht und steif gegenüber Änderungen des Planlaufs ausgeführt werden (vgl. Abbildung 7-9 oben links).

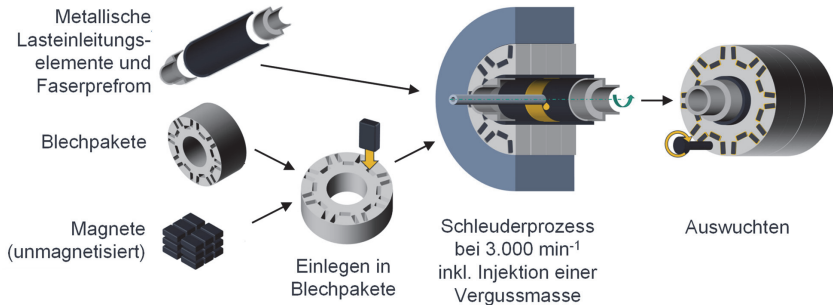


Abbildung 7-10: Prozesskette zur Herstellung eines besonders leichten PM-Rotors

Die Prinziptauglichkeit dieses Ansatzes wurde in (A_Wang 2021) nachgewiesen. Hierzu wurde in einem Schleuderwerkzeug ein CFK-Schlauch in ein einzelnes Blechpaket mit dem Innendurchmesser 38 mm und der axialen Länge 25 mm geschleudert (Abbildung 7-11 a). Das Blechpaket wurde hierbei nicht mit Magneten bestückt, um in späteren Torsionsversuchen in den leeren Magnettaschen ein Drehmoment in die Welle-Nabe-Verbindung einzuleiten. In quasistatischen Torsionsversuchen an sechs Prüfkörpern wurde ein übertragbares Drehmoment von 100 Nm bis 300 Nm erreicht (Abbildung 7-11 b). Ebenso konnte nachgewiesen werden, dass die Magnete innerhalb der Magnettaschen an der radial äußersten Position fixiert werden (Abbildung 7-11 c) und d). Zur Verdeutlichung der Vergussmasse wurde sie zu Beginn des Schleuderversuchs rot eingefärbt. In folgenden Untersuchungen sind die Dosierung der Vergussmasse sowie die Abdichtung des Außendurchmessers zu verbessern. Insbesondere die axiale Abdichtung erfordert eine gesteigerte axiale Vorspannung der Blechpakete. Zudem ist zu prüfen, inwiefern dieser Schleuderprozess an stanzpaketierte Blechpaketen durchgeführt werden kann. Die in Abbildung 7-11 dargestellten Blechpakete wurden per Laserschneiden mit anschließendem Verbacken hergestellt. Die Eignung des Rotors für eine Rotorinnenkühlung sowie das mechanische Verhalten unter zyklischer Temperaturbelastung sind ebenfalls zu prüfen.

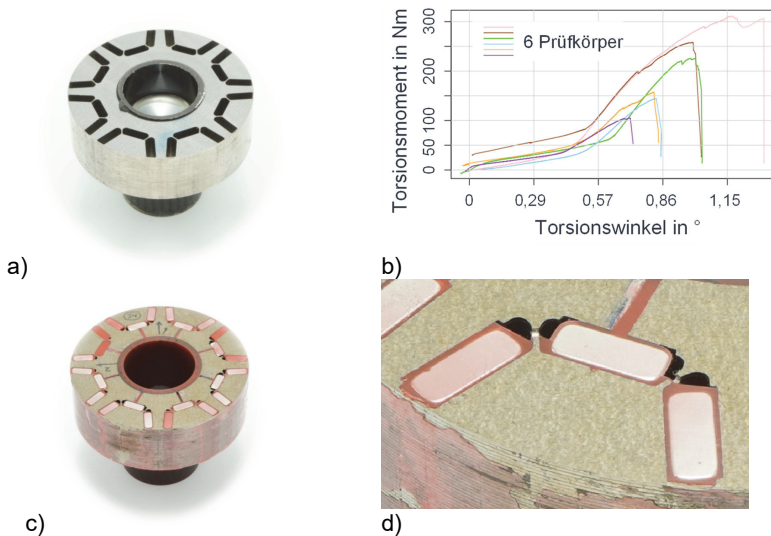


Abbildung 7-11: Experimentelle Untersuchungen zur Herstellung eines besonders leichten PM-Rotors: a) Probekörper ohne Magnete, b) Quasistatische Torsionsprüfung, c) Probekörper mit Magneten und rot eingefärbter Vergussmasse, d) Magnete in radial äußerster Position fixiert

7.7 Zusammenfassung

Die Vielseitigkeit möglicher Ursachen für Unwuchtänderungen erfordert individuelle Ansätze zur Verkürzung oder Vermeidung eines Schleuderprozesses. Lösungsansätze beziehen sich einerseits auf die grundsätzliche Analyse vorliegender Ursachen von Unwuchtänderungen und andererseits auf die Anpassung der Auslegung, Fertigung und Montage von PM-Rotoren. Die dritte Forschungsfrage wird somit wie folgt beantwortet.

*Wie kann durch eine geeignete **Auslegung, Fertigung und Montage** von PM-Rotoren deren **Neigung zu Unwuchtänderungen reduziert** werden?*

Grundlage der Reduzierung der Neigung von PM-Rotoren zu Unwuchtänderungen ist eine systematische Priorisierung und experimentelle Validierung möglicher Ursachen. Hierbei sind sowohl vorübergehende als auch dauerhafte Verformungen und Relativbewegungen der Rotorkomponenten zu berücksichtigen. Ein besonderes Augenmerk ist auf hohe vorübergehende Änderungen zu legen, da sie zu hohen dauerhaften Änderungen führen können. Wird ein PM-Rotor bereits heute in der Serienproduktion

geschleudert, wird zur Reduzierung der Taktzeit die Integration einer Planlaufmessung in den Schleuderstand empfohlen. Dies basiert auf der Erkenntnis, dass der Planlauf als Indikator für den Zeitpunkt dient, zu dem ein Schleuderprozess erfolgreich beendet werden kann. Können Fertigungs- und Montageprozesse angepasst werden, wird eine planlaufminimale Fertigung und Montage der Blechpakete auf der Rotorwelle nahegelegt. Können langfristige Maßnahmen zur Anpassung der Auslegung eines PM-Rotors umgesetzt werden, ist eine Steigerung der Steifigkeit des Blechpakets gegenüber Änderungen des Rundlaufs und des Planlaufs anzuraten. Eine Welle-Nabe-Verbindung mit drehzahlunabhängigem Fugendruck sowie eine systematische Positionierung der Magnete an radial äußerster Position werden ebenfalls empfohlen. Zudem wurde ein Ansatz vorgestellt, der in einem Schleuderprozess die Herstellung besonders leichter PM-Rotoren mit voraussichtlich geringer Neigung zu Unwuchtänderungen ermöglicht.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Aus maximalen Drehzahlen elektrischer Traktionsantriebe von bis zu 21.000 min^{-1} folgt eine besonders hohe Bedeutung der Rotorunwucht für den Fahrkomfort und die Zuverlässigkeit elektrischer Fahrzeuge. Eine definierte Wuchtgüte muss nicht nur nach der Produktion, sondern auch bis zum Ende der Lebensdauer des Rotors sichergestellt werden. Neigt ein PM-Rotor zu Unwuchtänderungen, muss er nach heutigem Stand der Technik vor dem Auswuchten einem Schleuderprozess unterzogen werden. Die Ursachen der an PM-Rotoren auftretenden Unwuchtänderungen wurden bisher nicht systematisch analysiert und somit nicht behoben. Nur vereinzelte Besonderheiten des mechanischen Verhaltens der Blechpakete eines PM-Rotors wurden bisher untersucht. Der Fokus lag dabei meist auf der radialen Aufweitung des Blechpakets, die allerdings in den meisten Fällen als symmetrisch bezüglich der Rotationsachse angenommen wurde. Aufgrund des anisotropen und anelastischen Materialverhaltens der Blechpakete sind jedoch unsymmetrische elastische und plastische Verformungen zu erwarten.

Es erfolgte daher eine Priorisierung der Verformungen und Relativbewegungen von Rotorkomponenten mit dem voraussichtlich stärksten Einfluss auf Unwuchtänderungen. Hierzu wurden prozess- und produktseitige Randbedingungen definiert, Fertigungs- und Montageabweichungen analysiert und erwartete Verformungen und Relativbewegungen quantifiziert. Letztere ermöglichten unter Einsatz eines Starrkörpermodells die Ermittlung der Verformungen und Relativbewegungen mit dem stärksten Einfluss auf Unwuchtänderungen. Dabei identifiziert wurden eine unsymmetrische radiale Aufweitung der Blechpakete, eine Verkipfung der Blechpakete sowie ein Setzen der Magnete in Richtung ihrer Höhe.

Diese erwarteten Ursachen wurden anhand eines hierfür entworfenen Schleuderprüfstands experimentell validiert. Dazu wurden Rotorkomponenten einer Referenzgeometrie nach ihrer Fertigung und Montage vermessen und Schleuderversuchen unterzogen. Insbesondere Planlauf-, Zylindrizitäts- und Koaxialitätsfehler sowie Unwuchten der Blechpakete wiesen eine hohe Relevanz für vorübergehende und dauerhafte Aufweitungen und Verkipfungen der Blechpakete auf. Schleuderversuche an zwei industriell hergestellten Rotorgeometrien bestätigten die Relevanz des initialen Planlauffehlers für dessen Änderung unter Fliehkraftbelastung. Setzbewegungen der Magnete sind auch unter Temperaturbelastung nicht aufgetreten. Die Rotortemperatur beeinflusste

hingegen in hohem Maße den Planlauf eines Blechpakets. Identifizierte Wirkzusammenhänge wurden in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm zusammengefasst.

Aufgrund der Vielseitigkeit der Ursachen von Unwuchtänderungen wurde zunächst eine Methodik zur individuellen Analyse an einem PM-Rotor auftretender Unwuchtänderungen abgeleitet. Darauf aufbauend wurden kurz- bis langfristige Lösungsansätze zur Anpassung der Schleuder-, Fertigungs- und Montageprozesse sowie der Auslegung von PM-Rotoren erarbeitet. Der Einsatz eines adaptiven Schleuderprozesses ermöglicht die Reduzierung des Investitionsvolumens einer Rotorproduktionslinie um 12 %. Zudem wurde der Prototyp eines besonders leichten PM-Rotors angefertigt, der eine Auswahl erarbeiteter konstruktiver Lösungsansätze umsetzt. Die Anbindung der Magnete an das Blechpaket sowie der Blechpakete an eine CFK-Stahl-Hybridwelle erfolgte bei einer Schleuderdrehzahl von 3.000 min^{-1} .

8.2 Ausblick

Zukünftig können Schleuderversuche, die bisher an ein und zwei Blechpaketen auf einer Welle durchgeführt wurden, an gesamten Rotoren erfolgen. Hierbei kann überprüft werden, welche Interaktionen zwischen mehr als zwei Blechpaketen auftreten. Zudem kann der Prüfstand um die Messung einer Momentenunwucht erweitert werden, um den Einfluss einer Änderung des Planlaufs auf eine Änderung der Momentenunwucht messtechnisch zu erfassen. Die Aufprägung eines Statormagnetfelds würde es zudem ermöglichen, den Einfluss der Interaktion des Stator- und Rotormagnetfelds auf im Betrieb auftretende Unwuchtänderungen zu untersuchen.

Zudem können die in Kapitel 7 vorgestellten Lösungsansätze umgesetzt werden. Dabei wird die Verwendung industriell hergestellter Blechpakete empfohlen, um eine direkte Übertragbarkeit von Erkenntnissen auf diese Rotorgeometrie sicher zu stellen. Wird eine Planlaufmessung in einen industriell eingesetzten Schleuderstand integriert, können bereits heute parallel zu einer laufenden Produktion zahlreiche Messdaten gewonnen werden. Diese Daten können einerseits zur Regelung eines zeitlich verkürzten Schleuderprozesses, andererseits aber auch zum Anlernen einer künstlichen Intelligenz eingesetzt werden. Gemeinsam mit weiteren Daten aus der Fertigung und Montage der Rotorkomponenten steigt das Potential, Ursachen im Schleuderprozess auftretender Verformungen und Relativbewegungen zu identifizieren. Daraus gewonnene Erkenntnisse können die Grundlage für zukünftig immer höher drehende und dennoch wirtschaftlich hergestellte PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe bilden.

9 Literaturverzeichnis

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

(A_Erchen 2021)

Erchen, R. (2021), *Auslegung und Konstruktion einer Schutzumhausung eines Schleuderprüfstands für Komponenten elektrischer Hochdrehzahlantriebe*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Kohlund 2022)

Kohlund, A. (2022), *Implementierung der Steuerung und schwingungstechnische Optimierung eines Schleuderprüfstandes für Rotorkomponenten hochdrehender elektrischer Antriebe*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Lalla 2020)

Lalla, F. (2020), *Konzeptionierung, Auslegung, und Konstruktion eines Schleuderprüfstandes für Highspeed-Anwendungen im Hochtemperaturbereich*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Seiffert 2021)

Seiffert, N. (2021), *Konzeptionierung und Konstruktion einer Messeinrichtung zur Unwuchtmessung in einem Schleuderprüfstand*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Walter 2021)

Walter, M. (2021), *Analyse, Modellierung und Quantifizierung bei Rotoren elektrischer Traktionsantriebe auftretender Unwuchtänderungen*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Wang 2021)

Wang, J. (2021), *Entwicklung einer neuartigen Prozesskette für die Herstellung einer leichten CFK-Rotorwelle für das E-Sportwagensegment*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A_Wessollek 2021)

Wessollek, S. (2021), *Konzeption und Konstruktion von Vorrichtungen zur*

Temperierung und geometrischen Vermessung hochdrehender Rotorkomponenten. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Agamloh & Jouanne et al. 2020)

Agamloh, E.; Jouanne, A. v. & Yokochi, A. (2020), „An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles“, *Machines*, MDPI, 8(2) Nr.20, S. 1–17.

(Albers & Rapp et al. 2022)

Albers, A.; Rapp, S.; Klippert, M.; Lanza, G. & Schäfer, L. (2022), „Produkt-Produktions-CoDesign. Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg“, *Newsletter Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP* Nr.1.

(Alberto Tassarolo 2018)

Tassarolo, A. (2018), „Guest Editorial: Advances in High-Speed Machines for Electric Drives, Power Generation and Energy Storage Systems“, *IET Electric Power Applications*, IET, Bd.12 Nr.8, S. 1065–1066.

(Arshad & Ryckebush et al. 2007)

Arshad, W. M.; Ryckebush, T.; Magnussen, F.; Lendenmann, H.; Soulard, J.; Eriksson, B. & Malmros, B. (2007), „Incorporating Lamination Processing and Component Manufacturing in Electrical Machine Design Tools“. *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*. New Orleans, LA, USA. 23.-27.09.2007, IEEE, S. 94–102.

(Bachmeier & Klett et al. 2014)

Bachmeier, P.; Klett, S.; Nguyen, N.-T.; Nguyen-Schaefer, T.-H. & Rattay, B. (2014), *Kühlungsoptimiertes Blechpaket für einen permanentmagnetischen Rotor einer elektrischen Maschine*. EM-motive GmbH & Robert Bosch GmbH, DE 102014225260A1.

(Baloglu 2021)

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

(Bensing & Stammeler et al. 2022)

Bensing, F.; Stammeler, J.; Kuehbachner, D. & Lauer, H. (2022), *Rotor for an electric machine which serves, in particular, as a drive device of a motor vehicle, and electric machine with a rotor of this type*. Robert Bosch GmbH, WO 2023011860A1.

(Bianchi & Bolognani et al. 2004)

Bianchi, N.; Bolognani, S. & Luise, F. (2004), „Potentials and Limits of High-Speed PM Motors“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Bd.40 Nr.6, S. 1570–1578.

(Binder & Schneider et al. 2005)

Binder, A.; Schneider, T. & Klotz, M. (2005), „Fixation of buried and surface mounted magnets in high-speed permanent magnet synchronous motors“. *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*. Hong Kong, China. 02.-06.10.2005, IEEE, S. 2843–2848.

(Binder 2012)

Binder, A. (2012), *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg.

(Binder 2016)

Binder, A. (2016), *Motor development*, Mechanical motor design. Lecture: TU Darmstadt, Darmstadt. Institute of Electrical Energy Conversion.

(BMWK 2023)

BMWK (2023), *Energieeffizienz in Zahlen 2022*, Entwicklungen und Trends in Deutschland 2022. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3#:~:text=Die%20Prim%C3%A4renergieproduktivit%C3%A4t%20der%20gesamten%20Volkswirtschaft,19%2C3%20Prozent%20gegen%C3%BCber%202008.\[08.11.2023\]](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3#:~:text=Die%20Prim%C3%A4renergieproduktivit%C3%A4t%20der%20gesamten%20Volkswirtschaft,19%2C3%20Prozent%20gegen%C3%BCber%202008.[08.11.2023]).

(Brecher & Weck 2021)

Brecher, C. & Weck, M. (2021), *Machine Tools Production Systems 2*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg.

(Cai & Wu et al. 2021)

Cai, W.; Wu, X.; Zhou, M.; Liang, Y. & Wang, Y. (2021), „Review and Development

of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles“, *Automotive Innovation*, Bd.4 Nr.1, S. 3–22.

(Cameron & Thomson et al. 1986)

Cameron, J. R.; Thomson, W. T. & Dow, A. B. (1986), „Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors“, *IEEE Proceedings B Electric Power Applications*, IEEE, Bd.133 Nr.3, S. 155–163.

(Chai & Wu et al. 2019)

Chai, F.; Wu, Y.; Pei, Y. & Yuan, L. (2019), „Analysis and Optimization of Rotor Structure in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Pole Shoe Deformation“. *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Harbin, China. 11.-14.08.2019, IEEE, S. 5160–5163.

(Clappier 2021)

Clappier, M. (2021), *Simulation des elektromagnetischen Geräusches einer permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine unter Berücksichtigung der Rotordynamik und mechanischer Fügestellen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, Graduate School of Excellence advanced Manufacturing Engineering.

(Colledani & Coupek et al. 2018)

Colledani, M.; Coupek, D.; Verl, A.; Aichele, J. & Yemane, A. (2018), „A cyber-physical system for quality-oriented assembly of automotive electric motors“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, CIRP, Bd.20, S. 12–22.

(DIN ISO 2768-1:1991)

DIN ISO 2768-1 (1991), *Allgemeintoleranzen*, Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN ISO 2768-2:1991)

DIN ISO 2768-2 (1991), *Allgemeintoleranzen*, Toleranzen für Form und Lage ohne einzelne Toleranzeintragung, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN ISO 19499:2008)

DIN ISO Nr.19499 (2008), *Mechanische Schwingungen – Auswuchttechnik*, Einführung und Leitfaden für die Auswahl und Anwendung von Auswuchtnormen, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN ISO 21940-14:2012)

DIN ISO 21940-14 (2012), *Mechanische Schwingungen – Auswuchten von*

Rotoren, Teil 14: Verfahren zur Ermittlung von Abweichungen beim Auswuchten, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN 60034-1:2015)

DIN EN 60034-1 (2015), *Drehende elektrische Maschinen*, Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten, Berlin: VDE Verlag.

(DIN ISO 21940-12:2016)

DIN ISO 21940-12 (2016), *Mechanische Schwingungen – Auswuchten von Rotoren*, Teil 12: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit nachgiebigem Verhalten, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN ISO 1101 2017)

DIN EN ISO Nr.1101 (2017), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Geometrische Tolerierung*, Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN ISO 201940-11:2017)

DIN ISO 21940-11 (2017), *Mechanische Schwingungen – Auswuchten von Rotoren*, Teil 11: Verfahren und Toleranzen für Rotoren mit starrem Verhalten, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN 10132:2022)

DIN EN 10132:2022 (2022), *Kaltband aus Stahl für eine Wärmebehandlung - Technische Lieferbedingungen*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN ISO 21920-1:2022)

DIN EN ISO 21920-1 (2022), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile*, Teil 1: Angabe der Oberflächenbeschaffenheit, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(DIN EN ISO 21920-2:2022)

DIN EN ISO 21920-2 (2022), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile*, Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit, Berlin: Beuth Verlag GmbH.

(Dönges & Buchkremer et al. 2019)

Dönges, B.; Buchkremer, S.; Rolfes, M. & Kobelev, V. (2019), *Shaft assembly*. Muhr und Bender KG, WO 2020058122A1.

(Dönges & Schulte 2021)

Dönges, B. & Schulte, M. (2021), *Permanent magnet fastening structure, rotor and motor*. Mubea Automotive Components Taicang Co., Ltd., CN Nr.202120536449.

(Dörgeloh & Beinhauer et al. 2016)

Dörgeloh, T.; Beinhauer, A.; Riemer, O. & Brinksmeier, E. (2016), „Microfluidic Balancing Concepts for Ultraprecision High Speed Applications“, *Procedia CIRP*, CIRP, Bd.46, S. 185–188.

(Drach & Royzman et al. 2021)

Drach, I.; Royzman, V.; Bubulis, A. & Juzenas, K. (2021), „Passive Balancing of the Rotor with an Auto-Balancing Device with a Viscous Incompressible Liquid“, *Mechanika, ktu*, Bd.27 Nr.1, S. 45–51.

(Ehrlich 2016)

Ehrlich, C. (2016), *Modellierung der Fügestellendämpfung in zusammengesetzten Strukturen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, Institut für Technische und Numerische Mechanik.

(Epskamp 2020)

Epskamp, T. (2020), *Steigerung der Leistungsdichte von Traktionsantrieben und Aufbau einer hochdrehenden Asynchronmaschine*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Elektrotechnisches Institut (ETI).

(Foremny & Schenck et al. 2016)

Foremny, E.; Schenck, C. & Kuhfuss, B. (2016), „Integrated Ultrasonic Driven Balancer for Ultra Precision High Speed Machine Tools“, *Procedia Technology*, Bd.26, S. 316–323.

(Franke & Hofmann 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“, *Procedia CIRP*, CIRP, Bd.26, S. 724–728.

(Franke & Tremel et al. 2011)

Franke, J.; Tremel, J. & Kuhl, A. (2011), „Innovative developments for automated magnet handling and bonding of rare earth magnets“. *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*. Tampere, Finland. 25.-27.05.2011, IEEE, S. 1–5.

(Fröhlich & Heise 2020)

Fröhlich, H. & Heise, C. (2020), *Rotor for an electrical machine of a motor vehicle, and method for producing such a rotor*. Vitesco Technologies GmbH, US 2020/0177038 A1.

(G. K. Sakkas & A. G. Kladas 2022)

G. K. Sakkas & A. G. Kladas (2022), „Rotor deformation impact on operating characteristics of IPM Motor under High-Speed conditions“. *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Valencia, Spanien. 05.-08.09.2022, IEEE, S. 8–13.

(Galfarsoro & McCloskey et al. 2022)

Galfarsoro, U.; McCloskey, A.; Zarate, S.; Hernandez, X. & Almandoz, G. (2022), „Influence of Manufacturing Tolerances and Eccentricities on the Electromotive Force in Permanent Magnet Synchronous Motors“. *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Valencia, Spanien. 05.-08.09.2022, IEEE, S. 703–709.

(Gasch & Nordmann et al. 2002)

Gasch, R.; Nordmann, R. & Pfützner, H. (2002), *Rotordynamik*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

(Gerlach & Zajonc et al. 2021)

Gerlach, M. E.; Zajonc, M. & Ponick, B. (2021), „Mechanical stress and deformation in the rotors of a high-speed PMSM and IM“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Bd.138 Nr.2, S. 96–109.

(Gilde & Blaes 2020)

Gilde, C. & Blaes, C. (2020), *Rotor mit klebefreier Magnetfixierung durch Zusatzbauteil, Elektromotor und Verfahren zum Herstellen eines Rotors*. Schaeffler Technologies AG & Co. KG, DE 10 2020 109 798 A1.

(Gong & Heim 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)*. Valencia, Spanien. 05.-08.09.2022, IEEE, S. 49–55.

(Hansen 1989)

Hansen, K. G. (1989), *Method for optimizing armature balance through lamination orientation*. Ram Air Manufacturing, US 4833353A.

(Hausmann & Waldhof et al. 2020)

Hausmann, L.; Waldhof, M.; Fischer, J.; Wölßner, W.; Oliveira Flammer, M.; Heim, M.; Fleischer, J. & Parspour, N. (2020), „Review and Enhancements of Rotor Designs for High Speed Synchronous Reluctance Machines“. *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Online. 08.-09.12.2020, IEEE, S. 290–297.

(Hofmann & Masuch et al. 2016)

Hofmann, B.; Masuch, M.; Kummeth, P.; Franke, J.; Frey, P. & Merklein, M. (2016), „In-line strategies and methods to reduce balancing efforts within rotor production for electric drives“. *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Nürnberg, Deutschland. 30.11.-01.12.2016, IEEE, S. 27–31.

(Hu & Li et al. 2021)

Hu, Y.; Li, L.; Guo, W.; Zhang, F. & Li, G. (2021), „Research to the strength of High Speed Interior Permanent Magnet Synchronous Motor“. *2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. Gyeongju, Korea. 31.10.-03.11.2021, IEEE, S. 1181–1185.

(Imamori & Steentjes et al. 2017)

Imamori, S.; Steentjes, S. & Hameyer, K. (2017), „Influence of interlocking on magnetic properties of electrical steel laminations“. *2017 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG)*. Dublin, Irland. 24-28.04.2017, IEEE, S. 1–4.

(Ince & Khurshid et al. 2011)

Ince, C.; Khurshid, S. F.; Turgay, B.; Wessner, J. & Zambou Douangni, S. B. (2011), *Lamellenpaket mit Magnetfixiernasen für einen Rotor oder Stator einer Elektromaschine*. Robert Bosch GmbH.

(JCGM 100:2008)

JCGM Nr.100 (2008), *GUM - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*.

(Jung & Lee et al. 2012)

Jung, J.-W.; Lee, B.-H.; Kim, D.-J.; Hong, J.-P.; Kim, J.-Y.; Jeon, S.-M. & Song, D.-

H. (2012), „Mechanical Stress Reduction of Rotor Core of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor“, *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, Bd.48 Nr.2, S. 911–914.

(Jungiewicz 2013)

Jungiewicz, A. (2013), *Verbesserung der Schwingungsvorhersage für große elektrische Antriebe*. Dissertation, Technischen Universität Berlin, Berlin, Institut für Mechanik.

(Kampker 2014)

Kampker, A. (2014), *Elektromobilproduktion*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

(Karle 2021)

Karle, A. (2021), *Elektromobilität*, München: Carl Hanser Verlag.

(Karthaus & Hameyer 2017)

Karthaus, J. & Hameyer, K. (2017), „Static and cyclic mechanical loads inside the rotor lamination of high-speed PMSM“. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Würzburg, Deutschland. 05.-06.12.2017, IEEE, S. 78–85.

(Klatte & Kupke et al. 2011)

Klatte, H.; Kupke, N.; Nommensen, B.; Kritharidou, S.; Zernikow, M. & Stroermer, S. (2011), *Befestigung von Magneten an einem Rotor*. Robert Bosch GmbH, EP 2606554B1.

(Koch & Peter et al. 2017)

Koch, S.-F.; Peter, M. & Fleischer, J. (2017), „Lightweight Design and Manufacturing of Composites for High-performance Electric Motors“. *2017 1st CIRP Conference on Composite Materials Parts Manufacturing*. Karlsruhe, Deutschland. 08.-09.06.2017, CIRP, S. 283–288.

(Kraemer & Stoll et al. 2015)

Kraemer, A.; Stoll, J.; Blickle, D.; Lanza, G. & Boeker, B. (2015), „Analysis of wear behavior of stamping tools in the production of electrical steel sheets“. *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Nürnberg, Deutschland. 15.-16.09.2015, IEEE, S. 295–301.

(Kraemer & Veigel et al. 2016)

Kraemer, A.; Veigel, M.; Pontner, P.; Doppelbauer, M. & Lanza, G. (2016), „Influences of separation and joining processes on single tooth laminated stacks“. *2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Nürnberg, Deutschland. 30.11.-01.12.2016, IEEE, S. 178–185.

(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)*. Göteborg, Schweden. 23.-26.08.2020, IEEE, S. 1807–1813.

(Lechner & Seume 2019)

Lechner, C. & Seume, J. (2019), *Stationäre Gasturbinen*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

(Lenz 1997)

Lenz, J. (1997), *Strukturodynamik unter dem Einfluß von Mikro- und Makroschlupf in Fügestellen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr, Hamburg.

(Leuning & Steentjes 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*, IEEE, Bd.54 Nr.11, S. 1–5.

(Li & Kedous-Lebouc et al. 2019)

Li, Z.; Kedous-Lebouc, A.; Dubus, J.-M.; Garbuio, L. & Personnaz, S. (2019), „Direct reuse strategies of rare earth permanent magnets for PM electrical machines – an overview study“, *The European Physical Journal Applied Physics*, EDP Sciences, Bd.86 Nr.2, S. 1–10.

(Li & Liu et al. 2021)

Li, X.; Liu, J.; Li, C.; Hong, J. & Wang, D. (2021), „Research on the influence of air-gap eccentricity on the temperature field of a motorized spindle“, *Mechanical Sciences*, Copernicus Publications, Bd.12 Nr.1, S. 109–122.

(Li & Mittelstedt et al. 2022)

Li, X.; Mittelstedt, C. & Binder, A. (2022), „A review of critical issues in the design

of lightweight flywheel rotors with composite materials“, *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* Nr.139, S. 204–221.

(Loos & Barti et al. 2019)

Loos, D.; Barti, E.; Wagener, R. & Melz, T. (2019), „Preload dependent material properties of lamination stacks for electric machines“, *Materials Testing*, München: Carl Hanser Verlag, Bd.61 Nr.12, S. 1192–1196.

(Loos 2019)

Loos, D. (2019), *Werkstoffbasierter Festigkeitsnachweis für elektrische Antriebskomponenten*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM.

(Luchscheider 2015)

Luchscheider, V. (2015), *Experimentelle und numerische Identifikation eines homogenisierten Materialmodells für Blechpakete elektrischer Maschinen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Lehrstuhl für Technische Mechanik.

(Mang & Hofstetter 2018)

Mang, H. A. & Hofstetter, G. (2018), *Nichtlinear elastisches und anelastisches Materialverhalten*, Berlin: Springer Vieweg.

(Masuch & Lindenfels et al. 2019)

Masuch, M.; Lindenfels, J. von; Seefried, J.; Mayr, A.; Schneider, M.; Weigelt, M.; Kohl, A.; Franke, J. & Hemmer, C. (2019), „Comparison of Additive Balancing Processes for Rotors in the Context of High Speed Electric Traction Motors“. *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Esslingen, Deutschland. 03.-04.12.2019, IEEE, S. 21–28.

(Matsubayashi & Mabu et al. 2014)

Matsubayashi, S.; Mabu, H.; Amano, K. & Shiraishi, A. (2014), *Method for resin sealing permanent magnets in laminated rotor core*. MITSUI HIGH-TEC, INC., US 10498203B2.

(Mayer 2007)

Mayer, M. (2007), *Zum Einfluss von Fügstellen auf das dynamische Verhalten zusammengesetzter Strukturen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, Institut für Angewandte und Experimentelle Mechanik.

(Mehta & Liao et al. 2019)

Mehta, Y.; Liao, C. & Schulte, M. (2019), „BEV AWD EDU Gear Ratio Selection for Efficiency“. *CTI SYMPOSIUM 2019. 18th International Congress and Expo*. Berlin, Deutschland. 09.-12.12.2019, Euroforum Deutschland GmbH, S. 448–458.

(Meyer & Heyder et al. 2016)

Meyer, A.; Heyder, A.; Kühl, A.; Sand, C.; Gehb, H.; Abersfelder, S.; Franke, J.; Holzhey, R.; Büttner, U. & Wangemann, S. (2016), „Concept for Magnet Intra Logistics and Assembly Supporting the Improvement of Running Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors“, *Procedia CIRP*, CIRP, Bd.43, S. 356–361.

(Meyer 2022)

Meyer, A. (2022), *Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS).

(Neß & Raggl 2022)

Neß, W. & Raggl, K. (2022), „E-Motortypen für sekundäre Elektroantriebe im Vergleich“, *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd.83 2-3, S. 40–45.

(Nguyen-Schäfer 2016)

Nguyen-Schäfer, H. (2016), *Computational Design of Rolling Bearings*, Cham: Springer International Publishing.

(Olsen & Nelson et al. 2021)

Olsen, L. E.; Nelson, D.; Laskaris, K.; Ge, H.; Filip, E.; Vega, C.; Pellerey, P. & Papanikolaou, V. (2021), *Permanent magnet rotor with wrapping*. Tesla, Inc., WO 2021/225902.

(Pan & Lu et al. 2020)

Pan, X.; Lu, J.; Huo, J.; Gao, J. & Wu, H. (2020), „A Review on Self-Recovery Regulation (SR) Technique for Unbalance Vibration of High-End Equipment“, *Chinese Journal of Mechanical Engineering* Nr.33, S. 1–23.

(Peter 2018)

Peter, M. (2018), *Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch*

modellbasierte Online-Optimierung. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Popaleny & Blackwell et al. 2022)

Popaleny, P.; Blackwell, J. & Péton, N. (2022), „Compressor Rotor Crack Case“. *Asia Turbomachinery & Pump Symposium. 2022 Proceedings*. Kuala Lumpur, Malaysia. 24.-26.05.2022, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M Engineering Experiment Station, S. 1–17.

(Rasche 2012)

Rasche, M. (2012), *Handbuch Klebtechnik*, München: Hanser.

(Riemer & Lessmann et al. 2010)

Riemer, B.; Lessmann, M. & Hameyer, K. (2010), „Rotor design of a high-speed Permanent Magnet Synchronous Machine rating 100,000 rpm at 10kW“. *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. Atlanta, GA, USA. 12.-16.09.2010, IEEE, S. 3978–3985.

(Sameshima & Ono et al. 2018)

Sameshima, K.; Ono, S. & Kato, G. (2018), *Method for manufacturing rotor core*. MITSUI HIGH-TEC, INC., EP 3457544 B1.

(Schäfer & Baranowski et al. 2023)

Schäfer, A.; Baranowski, M.; Springmann, M.; Hof, L.; Frölich, F.; Peter, A.; Parspour, N.; Fleischer, J.; Middendorf, P.; Kärger, L. & Michalowski, A. (2023), „Design concept of a repairable YASA axial flux machine with a hybrid cooling system“. *12th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2023)*. Brüssel, IET, S. 119–128.

(Schmöz 2020)

Schmöz, M. (2020), *Bestückungsvorrichtung und System umfassend eine Bestückungsvorrichtung und einen Rotor*. Grob-Werke GmbH & Co. KG, EP 3836161A1.

(Schneider 2020)

Schneider, H. (2020), *Auswuchttechnik*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

(Shen & Qin et al. 2018)

Shen, J.; Qin, X. & Wang, Y. (2018), „High-Speed Permanent Magnet Electrical

Machines - Applications, Key Issues and Challenges“, *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, Bd.2 Nr.1, S. 23–33.

(Siebertz & van Bebber et al. 2017)

Siebertz, K.; van Bebber, D. & Hochkirchen, T. (2017), *Statistische Versuchsplanung*, Design of Experiments (DoE), Berlin: Springer Vieweg.

(Simon-Sempere & Burgos-Payan et al. 2013)

Simon-Sempere, V.; Burgos-Payan, M. & Cerquides-Bueno, J.-R. (2013), „Influence of Manufacturing Tolerances on the Electromotive Force in Permanent-Magnet Motors“, *IEEE Transactions on Magnetics*, IEEE, Bd.49 Nr.11, S. 5522–5532.

(Suchý & Leidich et al. 2018)

Suchý, L.; Leidich, E.; Gerstmann, T. & Awiszus, B. (2018), „Influence of Hub Parameters on Joining Forces and Torque Transmission Output of Plastically-Joined Shaft-Hub-Connections with a Knurled Contact Surface“, *Machines*, MDPI, Bd.6 Nr.2, S. 1–11.

(Thangavel & Mohanraj et al. 2023)

Thangavel, S.; Mohanraj, D.; Girijaprasanna, T.; Raju, S.; Dhanamjayulu, C. & Muyeen, S. M. (2023), „A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors“ in *IEEE Access*, IEEE, S. 20994–21019.

(VDI 2221 1993)

VDI Nr.2221 (1993), *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*.

(Weidenhiller 2013)

Weidenhiller, F. (2013), „Qualität und Montageprozesse im Fokus Toleranzmanagement zur maßlichen Absicherung elektromechanischer Systeme und Gewährleistung der Prozessfähigkeit“. *EMA 2012. Vorträge der ETG-Fachtagung*. Nürnberg, Deutschland. 21.-22.09.2012, VDE Verlag, S. 1–9.

(Wielsch & Kreuter et al. 2021)

Wielsch, P.; Kreuter, A. & Schopphoff, A. (2021), „Wuchttechnologie von Turbopumpen-Rotoren“, *Vakuum in Forschung und Praxis*, Bd.33 Nr.5, S. 34–39.

(Wößner & Gürbüz 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*, Bd.117 Nr.10, S. 667–672.

(Wößner & Heim 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“. *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Online. 07.-09.12.2021, IEEE, S. 168–176.

(Wößner & Lorenz et al. 2019)

Wößner, W.; Lorenz, M.; Hofmann, J.; Jux, B.; Langheck, A.; Doppelbauer, M. & Fleischer, J. (2019), „Unwucht hochausgenutzter Synchronmaschinen. Ein modellbasierter Ansatz zur Vermeidung ungewollter Unwuchtänderungen“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd.114 7-8, S. 464–468.

(Wößner & Peter et al. 2019)

Wößner, W.; Peter, M.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Model-Based Assembly Optimization for Unbalance-Minimized Production Automation of Electric Motors“. *Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*. Aachen, Deutschland. November 19–20, 2018, R. Schmitt & G. Schuh, S. 551–562.

(Wößner & Stoll et al. 2018)

Wößner, W.; Stoll, J.; Flammer, M. O.; Wurster, P.; Peter, M. & Fleischer, J. (2018), „Intelligent Rotor Assembly Enabling Positive Balancing Concepts for High-Performance Permanent Magnet Rotors“. *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Schweinfurt, Deutschland. 04.-05.12.2018, IEEE, S. 207–212.

(Wößner & Uhl 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“. *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Esslingen, Deutschland. 03.-04.12.2019, IEEE, S. 15–20.

(Wurster & Lamparsky 2021)

Wurster, P. & Lamparsky, N. (2021a), *Fügewerkzeug zum Verpressen einer*

Scheibe mit einer Welle sowie Rotorwelle für eine elektrische Maschine. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, DE 10 2021 111 191 A1.

(Wurster & Lamparsky 2021)

Wurster, P. & Lamparsky, N. (2021b), *Fügewerkzeug.* Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, DE 10 2021 111 612 A1.

(Wurster 2021)

Wurster, P. (2021), *Rotor mit einer Rotationsachse für eine elektrische Antriebsmaschine.* Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, DE 10 2021 112 815 A1.

(Xu & Yang et al. 2021)

Xu, H.; Yang, L.; Xu, T. & Wu, Y. (2021), „Effect of Detuning of Clamping Force of Tie Rods on Dynamic Performance of Rod-Fastened Jeffcott Rotor“, *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi, Bd.2021 Nr.10, S. 1–11.

(Zhao & Zhang et al. 2022)

Zhao, L.; Zhang, H.; Shen, P. & Liu, Y. (2022), „Nonlinear Dynamic Characteristics of Rod Fastening Rotor with Preload Relaxation“, *Energies*, MDPI, Bd.15 Nr.3, S. 1052.

(Ziegler & Brandl et al. 2021)

Ziegler, M.; Brandl, F.; Kuehl, A. & Franke, J. (2021), „Evaluation of Laser-welded Electrical Steel Laminations for Electric Motors“. *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*. Bukarest, Rumänien. 25.-27.03.2021, IEEE, S. 1–6.

(Zubkov & Vereshagin 2021)

Zubkov, Y. V. & Vereshagin, V. E. (2021), „Designing of High Speed Permanent Magnet Electric Machines with Rotor Strength Verification“. *2021 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Magnitogorsk, Russland. 24.-26.09.2021, S. 414–418.

Publikationsliste

(Wößner & Stoll et al. 2018)

Wößner, W.; Stoll, J.; Flammer, M. O.; Wurster, P.; Peter, M. & Fleischer, J. (2018), „Intelligent Rotor Assembly Enabling Positive Balancing Concepts for High-Performance Permanent Magnet Rotors“. *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Schweinfurt, Deutschland. 04.-05.12.2018, IEEE, S. 207–212. <https://doi.org/10.1109/EDPC.2018.8658367> [14.09.2024].

(Wößner & Peter et al. 2019)

Wößner, W.; Peter, M.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2019), „Model-Based Assembly Optimization for Unbalance-Minimized Production Automation of Electric Motors“. *Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP)*. Aachen, Deutschland. November 19–20, 2018, R. Schmitt & G. Schuh, S. 551–562. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03451-1_54 [14.09.2024].

(Wirth & Hausmann et al. 2019)

Wirth, F.; Hausmann, L.; Halwas, M.; Hofmann, J.; Mayer, D.; Wößner, W. & Fleischer, J. (2019), „Optimierte Fertigung elektrischer Traktionsmotoren durch Technologien der Industrie 4.0“. *Future Mobility: automatisiert - vernetzt - elektrisch*, Technische Akademie Esslingen e.V., S. 1-14.

(Wößner & Lorenz et al. 2019)

Wößner, W.; Lorenz, M.; Hofmann, J.; Jux, B.; Langheck, A.; Doppelbauer, M. & Fleischer, J. (2019), „Unwucht hochausgenutzter Synchronmaschinen. Ein modellbasierter Ansatz zur Vermeidung ungewollter Unwuchtänderungen“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd.114 7-8, S. 464–468, <https://doi.org/10.3139/104.112127> [14.09.2024].

(Wößner & Uhl 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“. *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Esslingen, Deutschland. 03.-04.12.2019, IEEE, S. 15–20. <https://doi.org/10.1109/EDPC48408.2019.9011834> [14.09.2024].

(Fleischer & Schäfer et al. 2020)

Fleischer, J.; Schäfer, J.; Wößner, W. & Hofmann, J. (2020), *Leitfaden Fit4E – Einstieg in die Produktionstechnik für die Elektromobilität*, https://wbk.kit.edu/downloads/Fit4E_Leitfaden.pdf [14.09.2024].

(Hausmann & Waldhof et al. 2020)

Hausmann, L.; Waldhof, M.; Fischer, J.; Wößner, W.; Oliveira Flammer, M.; Heim, M.; Fleischer, J. & Parspour, N. (2020), „Review and Enhancements of Rotor Designs for High Speed Synchronous Reluctance Machines“. *2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Online. 08.-09.12.2020, IEEE, S. 290–297. <https://doi.org/10.1109/EDPC51184.2020.9388205> [14.09.2024].

(Wößner & Heim 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“. *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Online. 07.-09.12.2021, IEEE, S. 168–176, <https://doi.org/10.1109/EDPC53547.2021.9684227> [14.09.2024].

(Fleischer & Pfund et al. 2021)

Fleischer, J.; Pfund, T.; Wirth, F.; Fraider, F.; Halwas, M.; Hausmann, L. & Wößner, W. (2021), „Agile Produktion elektrischer Traktionsmotoren als Antwort auf volatile Märkte und Technologien“, *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Band 116, Nr. 3, S. 128-132, <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0025> [14.09.2024].

(Wößner & Gürbüz 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*, Band 117, Nr.10, S. 667–672, <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1103> [14.09.2024].

(Gong & Heim 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)*. Valencia, Spanien. 05.-08.09.2022, IEEE, S. 49–55, <https://doi.org/10.1109/ICEM51905.2022.9910716> [14.09.2024].

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1-1: Motivation und Zielsetzungen der Arbeit (Bildquellen von links nach rechts: BMW AG, Muhr und Bender KG) 2
- Abbildung 2-1: Aufbau eines Permanentmagnetrotors: a) Rotor und Stator als Aktivteile einer PSM, b) Oberflächenmagnete und vergrabene Magnete, c) geblechter Magnetträger bzw. Blechpaket mit vergrabenen Magneten, d) Blechpakete auf Rotorwelle und Anbindung an ein Getriebe 5
- Abbildung 2-2: Anforderungen an PM-Rotoren, abgeleitet aus Anforderungen an ein elektrisches Fahrzeug (Bildquellen von links nach rechts: BMW AG, BMW AG, Muhr und Bender KG) 7
- Abbildung 2-3: Maximale Drehzahlen bereits produzierter und online vorgestellter PSM für den Einsatz als elektrische Traktionsantriebe (vgl. Tabelle A- 1 im Anhang) 8
- Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung einer Unwucht (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 81)) 9
- Abbildung 2-5: a) Darstellung eines Rotors mit rein statischer Unwucht sowie Unwuchtvektoren b) in Lagerebene A und c) in Lagerebene B. d) Definition eines Rundlauf(fehlers) (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 81)) 10
- Abbildung 2-6: a) Darstellung eines Rotors mit reiner Momentenunwucht sowie Unwuchtvektoren b) in Lagerebene A und c) in Lagerebene B. d) Definition eines Planlauf(fehlers) (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 58)) 11
- Abbildung 2-7: a) Darstellung der dynamischen Unwucht eines Rotors sowie Unwuchtvektoren b) in Lagerebene A und c) in Lagerebene B (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 90)) 12
- Abbildung 2-8: Unwuchtzustand eines Rotors, dargestellt durch a) statische Unwuchten der Rotorkomponenten, b) resultierende statische Unwucht und Unwuchtpaar, c) komplementäre Unwuchten in A und B (eigene Darstellungen in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 55) und (Schneider 2020, S. 92)) 13
- Abbildung 2-9: Innenbord-Rotor mit unsymmetrischer Lage des Massenmittelpunktes (in Anlehnung an (DIN ISO 21940-11 2017, S. 18)) 14
- Abbildung 2-10: Auswuchtprozess am Beispiel von PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 332)) 16

Abbildung 2-11: Unwuchtausgleich durch a) Masseabtrag (subtraktiv), b) Masseauftrag (additiv) und c) Masseverlagerung (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 307))	18
Abbildung 2-12: Vergleich der Drehzahlabhängigkeit der Unwucht von Rotoren mit starrem Verhalten, körperelastischem Verhalten und Setzungsverhalten (in Anlehnung an (Schneider 2020, S. 100–102))	20
Abbildung 2-13: a) Definition einer pro Lagerebene auftretenden Unwuchtänderung und b) Grenzwerte für die zulässige Unwuchtänderung	21
Abbildung 3-1: a) Polweise Darstellung möglicher Magnetanordnungen, b) Stege im Querschnitt eines PM-Rotors mit Delta-Anordnung (in Anlehnung an (Krings & Monissen 2020, S. 1810))	23
Abbildung 3-2: Auswahl konstruktiver Alternativen bei der Gestaltung von Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe	24
Abbildung 3-3: Prozesskette zur Produktion von Permanentmagnetrotoren elektrischer Traktionsantriebe	26
Abbildung 3-4: Fertigungsabweichungen mit besonders starkem Einfluss auf die Unwucht einer Rotorwelle	27
Abbildung 3-5: Fertigungsabweichungen mit besonders starkem Einfluss auf die Unwucht eines Rotorblechpakets	29
Abbildung 3-6: Fertigungsabweichungen führen zu einer statistisch verteilten Magnetmasse	30
Abbildung 3-7: Montage und Fixierung vergrabener Magnete: a) Transfermolding als Beispiel für Stoffschluss, b) Federfixierung als Kraftschluss, c) resultierende statische Unwucht	32
Abbildung 3-8: Abweichungen bei der Montage der Welle-Nabe-Verbindung führen zu unwuchtigem Zustand des Rotors	33
Abbildung 3-9: Für das subtraktive Auswuchten erforderliche Absaugung	34
Abbildung 3-10: Am Blechpaket wirkendes Lastkollektiv aus mechanischen, thermischen und magnetischen Lasten	37
Abbildung 3-11: a) In (Gerlach & Zajonc et al. 2021) ausgelegter PM-Rotor mit Oberflächenmagneten sowie b) daran gemessene unsymmetrische Aufweitungen (in Anlehnung an (Gerlach & Zajonc et al. 2021, S. 97))	39

Abbildung 3-12: a) Stanzpaketierung als tangential belastete Fügestelle, b) Mikro- und Makroschlupf innerhalb eines tangential belasteten Reibkontakts (in Anlehnung an (Lenz 1997))	40
Abbildung 3-13: a) Zyklische axiale Be- und Entlastung eines Stapels von Elektroblechen, b) Zyklische Belastung unter Einwirkung eines Paketierdrucks (nach (Luchscheider 2015, S. 50))	41
Abbildung 3-14: Unter Fliehkraft massensymmetrisch angenommene Verlagerung der Magnete eines PM-Rotors (in Anlehnung an (Epskamp 2020, S. 91))	43
Abbildung 3-15: a) Rotor einer hochdrehenden Asynchronmaschine und b) bei Schleuderversuchen an der B-Seite gemessene Aufweitungen (nach (Epskamp 2020, S. 160))	44
Abbildung 3-16: Unterscheidung zwischen proaktiven und reaktiven Maßnahmen zur Reduzierung von Unwuchtänderungen	45
Abbildung 3-17: Beispiel eines industriell eingesetzten Schleuderstands (Quelle: Firma Hofmann Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co. KG)	48
Abbildung 4-1: Zielsetzungen der Arbeit	51
Abbildung 4-2: Vorgehensmodell zur Bearbeitung der drei Forschungsfragen	53
Abbildung 5-1: Beschreibungsmodell zur geometrischen Parametrierung eines PM-Rotors eines elektrischen Traktionsantriebs mit vergrabenen Magneten	57
Abbildung 5-2: Identifikation zu erwartender Verformungen und Relativbewegungen	59
Abbildung 5-3: Darstellung der in Tabelle 5-3 aufgelisteten Geometrieelemente	61
Abbildung 5-4: Quantifizierung von Verformungen und Relativbewegungen für die anschließende Berechnung erwarteter Unwuchtänderungen	65
Abbildung 5-5: a) An einem stanzpaketierten Rotorblechpaket zu erwartende Fertigungsabweichungen, b) FE-Simulation der durch Fertigungsabweichungen des Blechpakets bedingten Verformungen	67
Abbildung 5-6: Definition der Breite, Höhe und Länge eines Magneten sowie Darstellung der aufgrund des Maximalspalts maximal möglichen Setzbewegung	69
Abbildung 5-7: Bewertung zu erwartender Unwuchtänderungen	71

Abbildung 5-8: Zustand des modellierten Rotors vor und nach der Aufprägung von Translationen und Rotationen seiner Komponenten	72
Abbildung 5-9: Einflüsse erwarteter Verformungen und Relativbewegungen auf die Änderung der statischen Unwucht	75
Abbildung 5-10: Einflüsse erwarteter Verformungen und Relativbewegungen auf die Änderung der Momentenunwucht	75
Abbildung 5-11: Als besonders kritisch identifizierte Verformungen und Relativbewegungen: a) unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets, b) Verkipfung des Blechpakets und c) Setzbewegung der Magnete in Richtung der Höhe	76
Abbildung 6-1: Konstruktion einer Referenzgeometrie zur experimentellen Validierung an einzelnen Blechpaketen erwarteter Relativbewegungen und Verformungen	77
Abbildung 6-2: Gewählter Prozess zur Magnetmontage und -fixierung im Vergleich zum industriellen Standard	80
Abbildung 6-3: Gewählter Prozess zur Herstellung der Welle-Nabe-Verbindung im Vergleich zum industriellen Standard	81
Abbildung 6-4: Für experimentelle Validierung ausgelegte und hergestellte Prüfkörper	82
Abbildung 6-5: Drehzahlprofil eines Schleuderversuchs (Referenzläufe: R1 bis R6 und Belastungsläufe B1 bis B5)	83
Abbildung 6-6: Funktionsstruktur des Schleuderprüfstands	85
Abbildung 6-7: Blattfedern wandeln die Unwucht und Rotation des Prüfkörpers in eine am Kraftsensor gemessene Zug-Druck-Kraft um	87
Abbildung 6-8: Gesamt- und Schnittansicht des konstruierten Schleuderprüfstands	88
Abbildung 6-9: a) Schallschutzraum, b) Prüfstand und c) Prüfkammer mit integrierter Messtechnik	90
Abbildung 6-10: Ermittlung von Messunsicherheiten durch Schleuderversuche an einem Referenzkörper aus Stahl ohne Magnettaschen	91
Abbildung 6-11: Drehzahlabhängiges Verhältnis der Änderung der Unwuchtkraft zur Änderung der statischen Unwucht in N/gmm. Fehlerbalken entsprechen Mindest- und Maximalwerten aus sechs Messungen.	92

Abbildung 6-12: Zuordnung der folgenden Abschnitte zur Vorgehensweise aus 4.3.2	93
Abbildung 6-13: Ergebnisse der Vermessung von 44 Wellen	94
Abbildung 6-14: Messgrößen bei der Vermessung von Blechpaketen	95
Abbildung 6-15: Geometrische Vermessung der ersten und zweiten Charge von insgesamt 65 Blechpaketen ohne Magnettaschen	96
Abbildung 6-16: Vergleich von Betrag und Winkellage der statischen Unwucht der ersten und zweiten Charge von insgesamt 65 Blechpaketen ohne Magnettaschen	96
Abbildung 6-17: Geometrische Vermessung von 65 Blechpaketen ohne Magnettaschen (Blau) und 20 Blechpaketen mit Magnettaschen (Gelb)	97
Abbildung 6-18: Vergleich von Betrag und Winkellage der statischen Unwucht der Blechpakete ohne und mit Magnettaschen (beide Chargen gemischt)	98
Abbildung 6-19: Relative axiale Höhe an drei Teilkreisdurchmessern (65 Blechpakete mit Magnettaschen, 20 Blechpakete ohne Magnettaschen)	98
Abbildung 6-20: Geometrische Vermessung des Blechpakets Nr. 1: a) Welligkeit der Mantellinien am Innendurchmesser und b) am Außendurchmesser. c) Negative Korrelation zwischen Zylindrizität und Pferch-Durchmesser des Innendurchmessers	99
Abbildung 6-21: Welligkeit der Oberfläche auf dem Teilkreisdurchmesser 60 mm	99
Abbildung 6-22: a) Definition der Differenz zwischen Winkellage des maximalen Planlauf- und Koaxialitätsfehlers, b) gemessene Differenz und c) Korrelationsanalyse zwischen der Winkeldifferenz und dem Betrag der statischen Unwucht (bei Blechpaketen ohne Magnettaschen)	100
Abbildung 6-23: a) An Magneten erfasste Messgrößen und Messergebnisse zu b) Länge, c) Breite, d) Höhe und e) Masse von 40 Magneten	101
Abbildung 6-24: Blechpaket mit darin vergossenen Magneten	102
Abbildung 6-25 Statische Unwucht vor (Blau) und nach (Gelb) der Magnetmontage und -fixierung bei a) Blechpaketen und b) Stahlkörpern	103
Abbildung 6-26: Beispiele für Fügespalte, die zwischen Magnet und Magnettaschen durch die Vergussmasse ausgefüllt werden (Durchlichtmikroskop Zeiss Stemi 305, mit Kamera Zeiss Axiocam 208 color)	103

Abbildung 6-27: Veränderung Höhenprofil nahe Innendurchmesser des Blechpakets	104
Abbildung 6-28: Korrelationsanalysen zwischen Betrag und Winkellage des Planlaufs vor und nach dem Schrumpfprozess (Teilkreis 96 mm)	105
Abbildung 6-29: Korrelationsanalyse zwischen Planlauffehler des Blechpakets und Änderung des Planlaufs durch den Schrumpfprozess. Ausgewertet bezüglich a) Gauß- und b) Pferch-Innendurchmesser	105
Abbildung 6-30: Vergleich vor und nach dem Aufschrupfen bezüglich a) Unwucht, b) Rundlauf zu Gauß-Durchmesser, c) Rundlauf zu Pferch-Durchmesser	106
Abbildung 6-31: Korrelationsanalyse zwischen a) Planlauf nach dem Aufschrupfen und Zylindrizität des Blechpakets am Innendurchmesser und b) Unwuchtkraft des Prüfkörpers und Zylindrizität des Blechpakets am Innendurchmesser	106
Abbildung 6-32: Absenken des Außendurchmessers bei einem Blechpaket mit a) leeren Magnettaschen und b) in Magnettaschen vergossenen Magneten	107
Abbildung 6-33: a) Einbau des Prüfkörpers im Prüfstand und b) Anziehen der axialen Schraube mit Drehmomentschlüssel (24 Nm)	108
Abbildung 6-34: Nomenklatur der entlang des zeitlichen Verlaufs einer Messgröße ausgewerteten Parameter	109
Abbildung 6-35: Blechpaket ohne Magnettaschen, auf Wellenabschnitt geschrumpft	109
Abbildung 6-36: Vorübergehende Änderung a) der Unwucht, b) des Rundlaufs und c) des Planlaufs bei 20 Blechpaketen ohne Magnettaschen	110
Abbildung 6-37: Gegenüberstellung des Betrags der vorübergehenden Änderung der Unwucht mit der Initialunwucht des Blechpakets	111
Abbildung 6-38: a) Korrelation zwischen vorübergehender Änderung des Rundlaufs und Lage in x-Richtung des Mittelpunkts des Außendurchmessers des Blechpakets. b) Erwartete Ursache für reduzierten Rundlauf durch elastische Aufweitung in x-Richtung	111
Abbildung 6-39: Korrelation zwischen vorübergehender Änderung des Planlaufs und initialem Planlauf beim ersten Referenzlauf. b) Reduzierung des Planlaufs durch elastische Ausrichtung des Blechpakets	111

- Abbildung 6-40: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf bei 20 Blechpaketen ohne Magnettaschen 112
- Abbildung 6-41: Korrelationsanalyse zwischen Änderungen von a) Unwucht und Rundlauf sowie von b) Planlauf und Rundlauf (bei Referenzdrehzahl 2.000 min^{-1}) 112
- Abbildung 6-42: Korrelationsanalyse zwischen Betrag der dauerhaften Änderung des Planlaufs mit a) Änderung des Planlaufs beim Aufschrumpfen und b) Betrag der dauerhaften Änderung der Unwucht 113
- Abbildung 6-43: Dauerhafte Änderung von Unwucht, Rundlauf und Planlauf bei 20 Blechpaketen ohne Magnettaschen (bei Belastungsdrehzahl 15.000 min^{-1} gemessen) 114
- Abbildung 6-44: Pro Referenzlauf gemessene Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (20 Prüfkörper mit jeweils einem Blechpaket ohne Magnettaschen) 115
- Abbildung 6-45: Prüfkörper mit zwei Blechpaketen ohne Magnettaschen: a) zu Beginn und b) zum Ende des Schrumpfprozesses sowie c) im Schleuderprüfstand 115
- Abbildung 6-46: Vorübergehende Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (Gelb: Sechs Prüfkörper mit zwei Blechpaketen, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket) 116
- Abbildung 6-47: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (Gelb: Sechs Prüfkörper mit zwei Blechpaketen, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket) 116
- Abbildung 6-48: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei der Belastungsdrehzahl 15.000 min^{-1} gemessen) (Gelb: Sechs Prüfkörper mit zwei Blechpaketen, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket) 116
- Abbildung 6-49: Pro Referenzlauf gemessene Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei sechs Prüfkörpern mit zwei Blechpaketen) 117
- Abbildung 6-50: a) Blechpaket und b) Stahlkörper mit Magnettaschen und darin vergossenen Magneten, auf Wellenabschnitt geschrumpft 117
- Abbildung 6-51: Vorübergehende Änderung a) der Unwucht, b) des Rundlaufs und c) des Planlaufs (Gelb: 6 Prüfkörper mit einem Blechpaket mit vergossenen Magneten, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket ohne Magnettaschen) 118

- Abbildung 6-52: Vergleich des an Blechpaketen ohne Magnettaschen und mit Magneten bei Referenz- und Belastungsdrehzahl gemessenen Planlaufs 118
- Abbildung 6-53: Bei der Referenzdrehzahl 2.000 min^{-1} gemessene dauerhafte Änderung a) der Unwucht, b) des Rundlaufs und c) des Planlaufs (Gelb: Sechs Prüfkörper mit einem Blechpaket mit vergossenen Magneten, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket ohne Magnettaschen) 119
- Abbildung 6-54: Lage eines Magneten innerhalb der Magnettasche a) vor und b) nach einem Schleuderversuch bei Raumtemperatur 119
- Abbildung 6-55: Dauerhafte Änderungen von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei der Belastungsdrehzahl 15.000 min^{-1} gemessen) (Gelb: Sechs Prüfkörper mit einem Blechpaket mit vergossenen Magneten, Blau: 20 Prüfkörper mit einem Blechpaket ohne Magnettaschen) 120
- Abbildung 6-56: Pro Referenzlauf gemessene Änderung von a) Unwucht, b) Rundlauf und c) Planlauf (bei sechs Prüfkörpern mit jeweils einem Blechpaket mit Magneten) 120
- Abbildung 6-57: Zeitlicher Verlauf des Planlaufs aufgeheizter Prüfkörper mit Blechpaketen ohne Magnettaschen (bei der Referenzdrehzahl 2.000 min^{-1}) 121
- Abbildung 6-58: Unveränderte Lage eines Magneten a) vor und b) nach Erwärmung auf 155 °C und Schleuderversuch bei 120 °C 122
- Abbildung 6-59: Planlauf pro Referenzlauf bei zwei aufeinander folgenden Schleuderversuchen an einem Blechpaket mit Magneten. 123
- Abbildung 6-60: a) Verlauf des Planlaufs bei zwei Blechpaketen (stanzpaketiert mit anschließendem Single-Stack-Molding) zu Beginn des Schleuderversuchs, b) Planlauf pro Referenzlauf, c) Änderung des Planlaufs pro Referenzlauf 125
- Abbildung 6-61: Zeitliche Veränderung des stanzpaketierten Blechpakets während des Aufschumpfens: a) zu Beginn b) nach 10s und c) nach 80s 126
- Abbildung 6-62: a) Verlauf des Planlaufs bei drei Blechpaketen (stanzpaketiert und federnde Magnetfixierung) zu Beginn des Schleuderversuchs, b) Planlauf pro Referenzlauf, c) Änderung des Planlaufs pro Referenzlauf 127

Abbildung 6-63: In Kapitel 5 als kritisch identifizierte Verformungen und Relativbewegungen: a) unsymmetrische Aufweitung des Blechpakets, b) Verkipfung des Blechpakets und c) Setzbewegung der Magnete in Richtung der Höhe	128
Abbildung 6-64: Gegenüberstellung der bei Schleuderversuchen gemessenen a) vorübergehenden und b) dauerhaften Verkipfung des Blechpakets. c) und d) Darstellung der in a) und b) ausgewerteten Messgrößen	130
Abbildung 6-65: Beobachtete Wirkzusammenhänge entlang der Gestaltung, Fertigung und Montage der Prüfkörper sowie der aufgeprägten Belastungen und gemessenen Verformungen und Relativbewegungen	131
Abbildung 7-1: Vier Handlungsfelder zur reaktiven und proaktiven Reduzierung der Neigung von PM-Rotoren zu Unwuchtänderungen	134
Abbildung 7-2: Methodik zur Identifikation der Ursachen von Unwuchtänderungen	135
Abbildung 7-3: Änderung pro Referenzlauf im Vergleich zur erweiterten Messunsicherheit bei Schleuderversuchen an a) 20 Prüfkörpern mit je einem Blechpaket ohne Magnettaschen, b) sechs Prüfkörpern mit je zwei Blechpaketen ohne Magnettaschen und c) sechs Prüfkörpern mit je einem Blechpaket mit darin vergossenen Magneten	137
Abbildung 7-4: a) Schleuderstand mit beidseitig integrierten Planlaufsensoren, für adaptiven Schleuderprozess und b) Reduzierung der durchschnittlichen Prozesszeit	138
Abbildung 7-5: Schleuderprozess zur Reduzierung der Anzahl erforderlicher Belastungszyklen und zur Beobachtung vorübergehender und dauerhafter Planlaufänderungen	140
Abbildung 7-6: Besondere Bedeutung der Zylindrizität des Innendurchmessers des Blechpakets für die Unwucht und den Planlauf des Prüfkörpers	142
Abbildung 7-7: Erwarteter Einfluss der Verdrehung der Einzelbleche auf geometrische Abweichungen eines Rotorblechpakets	142
Abbildung 7-8: Ansatz der planlaufminimalen Rotormontage	143
Abbildung 7-9: Konstruktive Lösungsansätze zur Reduzierung von Unwuchtänderungen	146
Abbildung 7-10: Prozesskette zur Herstellung eines besonders leichten PM-Rotors	148

Abbildung 7-11: Experimentelle Untersuchungen zur Herstellung eines besonders leichten PM-Rotors: a) Probekörper ohne Magnete, b) Quasistatische Torsionsprüfung, c) Probekörper mit Magneten und rot eingefärbter Vergussmasse, d) Magnete in radial äußerster Position fixiert

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Auszug aus (DIN ISO 21940-11 2017) zur Zuordnung von Rotortypen zu Auswucht-Gütestufen	15
Tabelle 3-1: Übersicht des ermittelten Forschungsbedarfs	50
Tabelle 5-1: Auswahl von Produkt-Parametern (Teil 1 von 2)	57
Tabelle 5-2: Auswahl von Produkt-Parametern (Teil 2 von 2)	58
Tabelle 5-3: Geometrieelemente der Rotorkomponenten, bei deren Fertigungsabweichungen ein Einfluss auf die Initialunwucht und Unwuchtänderung erwartet wird	60
Tabelle 5-4: Fertigungsabweichungen mit direktem Einfluss auf Verformungen und Relativbewegungen	62
Tabelle 5-5: Montageabweichungen, die aufgrund von Fertigungs- und Prozessabweichungen erwartet werden	63
Tabelle 5-6: Im Betrieb erwartete Verformungen und Relativbewegungen der Rotorkomponenten	64
Tabelle 5-7: Parameter für die Berechnung der Durchbiegung der Rotorwelle	66
Tabelle 5-8: Mindest- und Maximalwerte des Fügespiels, die sich aus den Toleranzfeldern der Magnettasche und der Magnete ergeben. OT = obere Toleranz, UT = untere Toleranz	69
Tabelle 5-9: Für den numerischen Versuchsplan gewählte Faktoren und Faktorstufen	73
Tabelle 6-1: Anforderungen an den Schleuderprüfstand	84
Tabelle 6-2: Aus unbekannter systematischer und zufälliger Messabweichung ermittelte erweiterte Messunsicherheit der Änderung von Unwuchtkraft, Rundlauf und Planlauf	91
Tabelle 6-3: Erweiterte Messunsicherheit bei der Bestimmung einer Änderung der statischen Unwucht des Prüfkörpers	92
Tabelle 6-4: Gegenüberstellung der Referenzgeometrie und der zwei industriellen Geometrien	124

Tabelle 7-1: Bestimmung der gewünschten Taktzeit	138
Tabelle 7-2: Beispielrechnung für wirtschaftliches Potential des adaptiven Schleuderprozesses	139

Anhang

Tabelle A- 1: Maximale Drehzahlen elektrischer Traktionsantriebe

Hersteller	Modell- Bezeichnung	Jahr der Markteinführung	Max. Drehzahl in min ⁻¹	Quelle
Toyota	Prius	2004	6.000	(Agamloh & Jouanne et al. 2020, S. 3)
Honda	Accord	2006	6.000	
Toyota	Camry	2007	14.000	
Lexus		2008	10.230	
Chevrolet	Volt Gen 1	2010	9.000	(Krings & Monissen 2020, S. 1808)
Toyota	Prius	2010	13.500	(Agamloh & Jouanne et al. 2020, S. 3)
Hyundai	Sonata	2011	6.000	
Nissan	Leaf	2012	10.390	
Toyota	Camry	2013	14.000	
Audi	A3 e-tron	2014	6.000	(Krings & Monissen 2020, S. 1808)
Chevrolet	Spark	2014	14.000	(Agamloh & Jouanne et al. 2020, S. 3)
Honda	Accord	2014	14.000	
BMW	i3	2016	11.400	
BMW	225xe	2016	14.000	(Krings & Monissen 2020, S. 1808)
Chevrolet	Volt	2016	12.000	(Agamloh & Jouanne et al. 2020, S. 3)
Chevrolet	Bolt	2017	8.810	
Nissan	Leaf	2017	10.390	
Tesla	Model 3	2017	18.000	
Toyota	Prius	2017	17.000	
BJEV	EU5	2018	11.000	(Thangavel & Mohanraj et al. 2023, S. 21006)
Ford	Mustang Mach-e	2019	13.500	
Jaguar	I-Pace	2019	13.000	(Krings & Monissen 2020, S. 1808)
DS	Cross back E- Tense	2020	3.670	(Thangavel & Mohanraj et al. 2023, S. 21006)
NIO	ES6	2020	16.500	
NIO	EC6	2020	9.000	
Renault	kwid	2020	5.500	
Kia	Niro EV	2022	3.800	
Xiaomi	HyperEngine V8s	2025	27.200	¹⁵

¹⁵ Electric Motor News (2024), *The two E-motors developed by Xiaomi*. <https://www.electricmotor-news.com/gb/eventi/motori-elettrici-sviluppati-xiaomi/> [09.06.2024]

Hersteller	Bezeichnung des Antriebs	Jahr der Markteinführung	Max. Drehzahl in min ⁻¹	Quelle
AVL	Highspeed E-Axle	<i>ohne Jahreszahl</i>	30.000	¹⁶
Borg Warner	155 Permanent Magnet Synchronous Drive Motor	<i>ohne Jahreszahl</i>	17.000	¹⁷
Borg Warner	180 Permanent Magnet Synchronous Drive Motor	<i>ohne Jahreszahl</i>	18.000	¹⁷
Borg Warner	220 Permanent Magnet Synchronous Drive Motor	<i>ohne Jahreszahl</i>	18.000	¹⁷
Bosch	eAxle	<i>ohne Jahreszahl</i>	18.500	¹⁸
Xiaomi	HyperEngine V6/V6s	<i>ohne Jahreszahl</i>	21.000	¹⁵
Xiaomi	HyperEngine	<i>ohne Jahreszahl</i>	35.000	¹⁵

¹⁶ AVL Deutschlang GmbH (2024), *E-Achsen-Systeme. Ein modularer, kostenattraktiver Ansatz für die elektrifizierte Mobilität.* <https://www.avl.com/de-de/engineering/e-mobility-engineering/electric-driveline-development/e-axle-system> [29.06.2024]

¹⁷ BorgWarner Inc. (2024) *Electric Drive Motors.* <https://www.borgwarner.com/technologies/electric-drive-motors> [29.06.2024]

¹⁸ Robert Bosch GmbH (2024), *eAxle. The modular eAxle drive system – compact, cost-attractive and efficient.* <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/electric-motors/eaxle/> [29.06.2024]

Tabelle A- 2: Für die Ermittlung von Geometriedaten verwendete Fahrzeugantriebe

Hersteller	Modell-Bezeichnung	Jahr der Markteinführung
Aiways	U5 Premium	2020
Audi	Q4 e-tron 50 quattro	2021
Honda	e Advance	2020
Hyundai	Kona	2017
Hyundai	Ioniq 5 Project 45	2021
Jaguar	I-Pace	2018
Nissan	Leaf Tekna	2018
Peugeot	208 e GT	2020
Polestar	Polestar 2, Rear Drive	2020
Polestar	Polestar 2, Front Drive	2020
Skoda	Enyaq iV50	2021
Volkswagen	ID.3	2019
Volkswagen	ID.4	2021

Tabelle A- 3: Fertigungsabweichungen und deren Anwendbarkeit auf die Geometrie-primitive Zylinder, Quader und Punktmasse

Art der Fertigungs- abweichung	Eigenschaft	Quelle	Anwendbarkeit auf		
			Zylinder	Quader	Punkt- masse
Allgemein	Unwucht	Eigene Ergänzung	x		
	Masse		x	x	x
	Abweichungen vom Nennmaß		x	x	
Werkstoff	Inhomogenität		x	x	
	Anisotropie		x	x	
	Eigenspannung		x	x	
Form	Geradheit			x	
	Ebenheit		x	x	
	Rundheit		x		
	Zylindrizität		x		
	Linienprofil				
Richtung	Flächenprofil	(DIN EN ISO Nr.1101 2017)			
	Parallelität		x	x	
	Rechtwinkligkeit		x	x	
	Neigung		x	x	
	Linienprofil				
Ort	Flächenprofil				
	Position		x	x	x
	Konzentrizität (für Mittel- punkte)		x	x	
	Koaxialität (für Mittellinien)		x	x	
	Symmetrie		x	x	
Lauf	Linienprofil				
	Flächenprofil				
	Einfacher Lauf		x	x	
Oberfläche	Gesamtlauf	(DIN EN ISO 21920- 1 2022)	x	x	
	Welligkeit		x	x	
	Rauheit		x	x	

Tabelle A- 4: Eigenschaften der zur Messung von Unwuchtkraft, Rundlauf und Planlauf verwendeten Sensoren

Änderung von:	Unwuchtkraft	Rundlauf	Planlauf
Messprinzip	Piezokeramisch	Chromatisch konfokal	Lasertriangulation
Sensor	9217A	5005126	LJ-V7060
Ladungsverstärker / Controller	5018A	CHRcodile 2 S H S	LJ-X8000A
Hersteller	Kistler	Precitec	Keyence
Messabstand	-	14 mm	60 mm
Messbereich	±500 N	±1 mm	±8 mm
Empfindlichkeit	≈-105 pC/N		
Linearität	≈±0,3 %	660 nm	±0,1 %
Ansprechschwelle bzw. Auflösung	<0,001 N	6 nm	0,4 µm
Wiederholgenauig- keit			0,4 µm
Betriebstemperatur	-50...150 °C	<70 °C	0...45 °C
Temperatureigen- schaften	≈<0,04 %/°C		0,01 %/°C
Gewählte Abtastrate	10 kHz	10 kHz	16 kHz

Tabelle A- 5: Fragestellungen zur Priorisierung der Ursachen von Unwuchtänderungen an PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe

Teilschritt	Fragestellung	Kapitel
Priorisierung	1 Aus welchen Komponenten besteht der PM-Rotor? Wie werden die Komponenten gefertigt und montiert?	5.1
	Welche Belastungen treten an den Komponenten während des Betriebs auf?	5.1
	Welche Fertigungsabweichungen sind an den Komponenten zu erwarten?	5.2.1
	Welche dieser Fertigungsabweichungen beeinflussen die Initialunwucht des Rotors?	5.2.1
	Welche dieser Fertigungsabweichungen führen unter Einwirkung von Belastungen zu Verformungen und/oder Relativbewegungen?	5.2.1
	2 Welche Fertigungsabweichungen führen in Interaktion miteinander zu Montageabweichungen?	5.2.2
	Welche Prozessabweichungen liegen bei Montageprozessen vor?	5.2.2
	Welche Montageabweichungen resultieren aus diesen Prozessabweichungen hieraus?	5.2.2
	Welche dieser Montageabweichungen beeinflussen die Initialunwucht des Rotors?	5.2.2
	Welche dieser Montageabweichungen führen unter Einwirkung von Belastungen zu Verformungen und/oder Relativbewegungen?	5.2.2
	3 In welcher Höhe sind Verformungen und/oder Relativbewegungen der Rotorkomponenten zu erwarten?	5.3
	Welche dieser Verformungen und/oder Relativbewegungen wirken sich besonders stark auf Änderungen der Rotorunwucht aus?	5.4
Ergebnis:	Verformungen und Relativbewegungen mit besonders starkem Einfluss auf erwartete Unwuchtänderungen	5.5

Tabelle A- 6: Fragestellungen zur Validierung der Ursachen von Unwuchtänderungen an PM-Rotoren elektrischer Traktionsantriebe

Forschungs- frage	Fragestellung	Kapitel
Validierung	An welchen Komponenten treten die Verformungen und Relativbewegungen auf, bei denen ein besonders starker Einfluss auf Unwuchtänderungen erwartet wird?	6.1
	4 Wie kann ein Referenzsystem gestaltet sein, das auf diese Komponenten reduziert ist? (bei Bedarf mehrere unterschiedliche Ersatzsysteme)	6.1
	Wie können im Betrieb wirkende Lasten nachgebildet werden? (bspw. in Schleuderversuchen)	6.2 & 6.3
	Wie können Messdaten systematisch abgespeichert werden? (insbesondere für statistische Auswertungen und Korrelationsanalysen)	6.2
	5 Wie können Fertigungsabweichungen der Komponenten messtechnisch erfasst werden?	6.4
	Wie können Montageabweichungen des Ersatzsystems messtechnisch erfasst werden?	6.5
	Wie kann das Ersatzsystem vor, während und nach einem Schleuderversuch vermessen werden?	6.6 & 6.7
	Welche Messdaten aus Fertigungs- und Montageabweichungen sowie Schleuderprozessen weisen statistische Auffälligkeiten auf?	6.4 - 6.7
	6 Welche Verformungen und Relativbewegungen treten vorübergehend auf?	6.6 - 6.7
	Welche Verformungen und Relativbewegungen treten dauerhaft auf?	6.6 - 6.7
	7 Welche Korrelationen liegen zwischen Fertigungs- und Montageabweichungen sowie vorübergehenden Verformungen und Relativbewegungen vor?	6.4 - 6.7
	Welche Korrelationen liegen zwischen Fertigungs- und Montageabweichungen sowie dauerhaften Verformungen und Relativbewegungen vor?	6.4 - 6.7
	8 Welche kausalen Zusammenhänge liegen diesen Korrelationen zugrunde?	6.4 - 6.7
Ergebnis	Ursachen von Unwuchtänderungen identifiziert	6.8

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

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qí

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten
Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

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

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

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

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

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

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

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

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

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

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16

Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17

Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18

Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19

Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20

Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21

Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22

Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24

Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25

Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem 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 fünffachsignen 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 Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90

Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und 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 Fünfschneidfräsbearbeitung 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

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management-Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser
Abrasive Strahl schneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des
Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen
Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönninger

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in
Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungs-
organisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikrobauteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung
von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und
ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen
in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere
geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile
mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung
auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels
Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden in der Kleinserienproduktion

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

Development of a database to consider multi wear mechanisms within chip forming simulation

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

Ausfallgerechte Ersatzteilerstellung 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 μ 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 Fügepalts 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-Antriebsselementen

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 Kugelgewinde-trieben 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 Segebadé

Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotextrurierung

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

Wälzschälen mit kleinen Achskreuzwinkeln

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken
Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

Integration des Vereinzelungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und

Topografievorhersage an komplexen Geometrien

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von

Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an

Kugelgewindetriebsspindeln

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels

Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur

Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Band 268

Dr.-Ing. Rainer Maria Silbernagel

Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 269

Dr.-Ing. Jonas Nieschlag

Gestaltung und Prozessanalyse für im Schleuderverfahren hergestellte FKV-Metall-Hohlstrukturen

Band 270

Dr.-Ing. Lukas Matthias Weiser

In-Process Porositätserkennung für den PBF-LB/M-Prozess

Band 271

Dr.-Ing. Leonard Vincent Overbeck

Digital Twins of production systems

Automated validation and update of material flow simulation models with real data

Band 272

Dr.-Ing. Felix Klenk

Transparenzsteigerung in der Rückführungslogistik zur Verbesserung der Materialbedarfsplanung für das Remanufacturing

Band 273

Dr.-Ing. Benjamin Bold

Kompensation der Wrinkle-Bildung beim Kalandrieren von Lithium-Ionen-Kathoden

Vom Prozessverständnis des Kalandrierens bis zur Prozessoptimierung mittels Anti-Wrinkle-Modul

Band 274

Dr.-Ing. Daniel Gauder

Adaptive in-line Qualitätsregelung in der Mikro-Verzahnungsfertigung

Band 275

Dr.-Ing. Fabian Sasse

Ontologie-basierte Entscheidungsunterstützung für die Auswahl von Messsystemen in unreifen Produktionsprozessen

Band 276

Dr.-Ing. Jonas Hillenbrand

Unsupervised Condition-Monitoring für Kugelgewindetriebe mittels Acoustic Emission

Band 277

Dr.-Ing. Manuela Neuenfeldt

Untersuchung des Einflusses der PBF-LB-Stellgrößen auf die zerspanende Bearbeitung additiv gefertigter Stahlbauteile

Band 278

Dr.-Ing. Marvin Carl May

Intelligent production control for time-constrained complex job shops

Band 279

Dr.-Ing. Philipp Gönzheimer

Automatisierte Bereitstellung von Maschinensteuerungsdaten in Brownfield-Produktionssystemen

Ein Beitrag zur Digitalisierung von Bestandsanlagen am Beispiel von Werkzeugmaschinen

Band 280

Dr.-Ing. Markus Schäfer

Kollisionsvermeidung für Endeffektoren mit integriertem LiDAR-System in der MRK

Ein Beitrag zur Mensch-Roboter-Kollaboration

Band 281

Dr.-Ing. Oliver Brützel

Decision Support System for the Optimisation of Global Production Networks

Development of a Digital Twin for Product Allocation and Robust Line Configuration

Band 282

Dr.-Ing. Gregor Graf

Qualifizierung der Legierung FeNiCoMoVTiAl im LPBF-Prozess unter Verwendung einer Doppellaser-Belichtungsstrategie

Band 283

Dr.-Ing. Maximilian Torsten Halwas

Kompaktwickelprozess zur Erhöhung der Performance von Statoren elektrischer Traktionsantriebe

Band 284

Dr.-Ing. Magnus Kandler

Menschzentriertes Implementierungsvorgehen für das Digitale Shopfloor Management - Förderung der Selbstorganisation unter Berücksichtigung der Mitarbeiterakzeptanz

Band 285

Dr.-Ing. Michael Baranowski

Additive Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile mit dem Laser-Sinterprozess

Maschinentechnik, Prozessentwicklung und -modellierung

Band 286

Dr.-Ing. Tobias Storz

Flexibel automatisierte Assemblierung von Li-Ionen-Pouchzellen

Agile Anlagentechnik für die Prozesskette Stapelbildung, Kontaktierung und Heißsiegeln

Band 287

Dr.-Ing. Nikolas Sven Matkovic

Additive Individualization of Continuous-Discontinuous Reinforced Thermoplastics

Band 288

Dr.-Ing. Marco Wurster

Planung und Steuerung agiler hybrider Demontagesysteme im Remanufacturing

Band 289

Dr.-Ing. Felix Johannes Wirth

Prozessgeregelter 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

