

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.)

bei 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 prozessseitiger 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	Blechpakete	94
6.4.3	Magnete	101
6.5	Bewertung von Montageabweichungen	101
6.5.1	Magnetmontage	102
6.5.2	Schrumpfprozess des Blechpakets auf die Welle	103
6.6	Bewertung von Verformungen und Relativbewegungen	108
6.6.1	Blechpaket ohne Magnettaschen	109
6.6.2	Zwei Blechpakete ohne Magnettaschen	115
6.6.3	Blechpaket mit Magneten	117
6.6.4	Einfluss einer Temperaturbelastung	121
6.7	Schleuderversuche an industriell hergestellten Blechpaketen	123
6.7.1	Blechpaket mit Single-Stack-Molding	124
6.7.2	Blechpaket 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