



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Markus Weber

# **Schnelldrehende Motorspindelsysteme mit Synchronreluktanzmotor und starrer Lageranstellung**

**Schriftenreihe des PTW  
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber  
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele  
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich  
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold



Institut für  
Produktionsmanagement,  
Technologie und  
Werkzeugmaschinen

Schnelldrehende Motorspindelsysteme  
mit  
Synchronreluktanzmotor und starrer Lageranstellung

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt  
zur  
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

**Markus Weber, M. Sc.**

aus Hameln

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Hans-Christian Möhring  
Tag der Einreichung: 30.04.2024  
Tag der mündlichen Prüfung: 27.06.2024



Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

**Markus Weber**

**Schnelldrehende Motorspindelssysteme mit  
Synchronreluktanzmotor und starrer Lageranstellung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2024

### **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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9627-9

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort des Herausgebers

Motorspindelssysteme bilden für viele zerspanende Fertigungsprozesse, welche auf Hochgeschwindigkeits- oder Hochleistungsbearbeitung abzielen, die Kernkomponente in Werkzeugmaschinen als auch neuerdings in Anwendungsbereichen mit Industrierobotern. Motorspindeln wandeln durch den integrierten Elektromotor die bereitgestellte elektrische Energie in die für die Zerspanungsarbeit erforderliche mechanische Energie um. Die Forschungsarbeiten zu Motorspindelssystemen sind traditionell geprägt von der Zielsetzung stetiger Produktivitätssteigerungen und gleichermaßen kontinuierlicher Verbesserung in den erreichbaren Bearbeitungsqualitäten. Nun kommen im Zuge verstärkter Nachhaltigkeitszielsetzungen, Ziele des energieeffizienten Betriebs und der Materialsubstitution kritischer Rohstoffe hinzu. Bei der Entwicklung neuer Systeme bestehen hohe Anforderungen an die statische und dynamische Steifigkeit, eine hohe dynamische Rundlaufgenauigkeit und minimale Wellenverlagerungen im Betrieb, da diese Eigenschaften die Fertigungsgenauigkeit und Produktivität maßgeblich beeinflussen. Hinzu kommen neue Anforderungen an den Wirkungsgrad und die Kompaktheit der Systeme. An diesem Punkt setzt die vorliegende Dissertation von Herr Markus Weber auf. Das übergeordnete Ziel seiner Dissertation ist die Entwicklung eines Antriebssystems, welches diese Systemanforderungen in ein neuartiges Motorspindelssystem mit Synchronreluktanzantrieb und starrer Lageranstellung für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ermöglicht.

Darmstadt, im Juni 2024

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold



## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen der TU Darmstadt. Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold danke ich für die wissenschaftliche Betreuung und Diskussion der Arbeit. Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring gilt mein Dank für die bereitwillige Übernahme des Korreferats und die fachlichen Anregungen.

Einen großen Anteil am Gelingen der Arbeit hatten die Partner im AiF ZIM-Projekt Dr. Gebert Technologie und Wälzlager GmbH, Herr Dr. Karl Gebert und Frau Gabriele Laugisch, sowie die Partner der ATE Antriebstechnik und Entwicklungs GmbH & Co. KG, Herr Stefan Heinz, Marco Laubenberger und Daniel Schindler.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts danke ich für die stete Unterstützung bei der täglichen Arbeit. Angefangen beim Support, über die Buchhaltung hin zur IT und der Mechanischen Werkstatt. Für die vielen hilfreichen Ratschläge und Diskussionen rund um die Elektronikentwicklung der Telemetrieinheit zur rotorintegrierten Temperaturmessung und Messdatenerfassung gilt mein besonderer Dank dem ehemaligen Leiter der Elektronikwerkstatt Hans-Jürgen Hermann.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen, mit denen ich in Forschungsprojekten oder sonstigen Nebenaktivitäten zusammenarbeiten durfte. Besonders hervorheben möchte ich meinen langjährigen und sehr geschätzten Bürokollegen und Freund Florian Unterderweide. Ein großes Dankeschön geht ebenfalls an meine studentischen Hilfskräfte Patrick Fehn, Melvin Barreiro und Aaron Kappes für ihre aktive Unterstützung und Hilfsbereitschaft. Insbesondere möchte ich den ehemaligen Studenten Matthias Deffaa und Fuzhang He danken, die durch das Anfertigen ihrer Abschlussarbeiten in enger Abstimmung mit dem Betreuer zu vielen neuen Erkenntnissen beigetragen haben.

Ein herzliches Dankeschön gilt meiner Mutter Jutta Weber für Verbesserung des sprachlichen Stils. Für das Studium und meine Promotion gab mir meine Familie stets den nötigen Rückhalt und Ansporn. Es ist schön zu wissen, dass man mit euch immer einen festen Ankerpunkt hat und sich stets auf eure Unterstützung verlassen kann.

Der größte Dank gilt jedoch dir, Nora. Ohne deine Unterstützung, deine Geduld mit meiner Arbeit sowie beim Verbessern der Präsentation und insbe-

sondere den Verzicht von dir an vielen Wochenenden und Abenden wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen.

Nürnberg, im Juni 2024

Markus Weber

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Motivation</b>	<b>5</b>
2.1 Anspruchsvolle Fertigungstechnologien in der zerspanenden Metallbearbeitung . . . . .	5
2.2 Schäden in Motorspindeln vermeiden und Zuverlässigkeit erhöhen . . . . .	11
2.3 Energieeffiziente und ressourcenschonende Motorspindelssysteme	15
2.4 SynRM-Potenzial für eine alternative starre Lagergestaltung .	19
<b>3 Grundlagen, Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>23</b>
3.1 Aufbau von Motorspindeln . . . . .	23
3.1.1 Allgemeine Anforderungen an Spindelwellen und Umbauteile . . . . .	24
3.1.2 Werkstoffe für Spindelwellen . . . . .	26
3.1.3 Lagerung von Spindelwellen . . . . .	31
3.1.4 Wälzlager - Aufbau und Betriebsverhalten . . . . .	32
3.1.5 Grundlegende Beschreibung zum Aufbau und Bewegungsverhalten von Wälzlagern . . . . .	36
3.1.6 Wälzlagerschmierung . . . . .	45
3.1.7 Lageranordnungen . . . . .	49
3.1.8 Lagerungsanordnung und Lageranstellung, Anstellungsverfahren . . . . .	54
3.2 Antriebssysteme für Motorspindeln . . . . .	60
3.2.1 Anforderungen an elektrische Antriebe für Motorspindeln	60
3.2.2 Auswahl elektrischer Antriebe für Motorspindeln . . .	61
3.2.3 Asynchronmotor . . . . .	64
3.2.4 Permanentmagneterregte Synchronmotoren . . . . .	66
3.2.5 Synchronreluktanzmotoren . . . . .	70
3.2.6 Zusammenfassung Stand der Technik Antriebssysteme und Synchronreluktanzmotor . . . . .	80
3.3 Elektrische Leistungsversorgung von Motorspindeln . . . . .	81

<b>4</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>89</b>
4.1	Zielsetzung . . . . .	89
4.2	Lösungskonzeption und Aufgabenstellung . . . . .	90
4.2.1	Problemstellungen zur technischen Realisierbarkeit des angestrebten Motorspindel­systems . . . . .	90
4.2.2	Problemstellungen und Nachteile in Bezug auf Lösungs- ansätze nach Stand der Technik . . . . .	91
4.2.3	Lösungsansätze . . . . .	93
4.2.4	Aufgabenstellung . . . . .	95
4.3	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit . . . . .	98
4.4	Anforderungsdefinition . . . . .	101
4.5	Erstellung des Designentwurfs . . . . .	101
4.5.1	Auswahl der Wälzlager . . . . .	103
4.5.2	Definition des Lastfalls . . . . .	105
4.5.3	Abschätzung der ersten biegekritischen Drehzahl des Designentwurfs . . . . .	106
4.5.4	Optimierung des Designentwurfs . . . . .	107
<b>5</b>	<b>Auslegung des Synchronreluktanzantriebs</b>	<b>111</b>
5.1	Einführung - Bezugssysteme und Modellbildung . . . . .	111
5.1.1	Bezugssysteme elektrischer Maschinen . . . . .	111
5.1.2	Modellgleichungen der SynRM . . . . .	112
5.1.3	Elektrische Verluste in SynRM . . . . .	114
5.2	Auslegungskriterien für SynRM . . . . .	118
5.3	Auslegungsmethodik für SynRM . . . . .	124
5.4	Analytische Berechnung des SynRM-Entwurfdesigns . . . . .	127
5.4.1	Eingangsdaten und Zielgrößen der Auslegung . . . . .	127
5.4.2	Vorstellung ausgewählter SynRM-Konfigurationen . . . . .	129
5.5	Numerische elektromagnetische Anpassung des Entwurfs . . . . .	134
5.6	Numerische mechanische Anpassung des Zieldesigns . . . . .	138
5.6.1	Auswahl des Blechwerkstoffs . . . . .	139
5.6.2	Maßnahmen im Rotorquerschnitt zur Steigerung der Drehzahlfestigkeit . . . . .	140
5.6.3	Anpassung der Rotorgeometrie durch Radial- und Tan- gentialstege . . . . .	146
5.6.4	Simulation des Synchronreluktanzmotors zur Verlust- und Leistungsprognose . . . . .	149
5.7	Steigerung der Drehzahlfestigkeit des Rotorblechpakets . . . . .	154
5.7.1	Verguss der Fluss­sperr­en . . . . .	155
5.7.2	Auslegung und Wirkung von Stützblechen . . . . .	156

5.7.3	Axiale Stäbe aus UHM-CFK . . . . .	158
5.7.4	Axialdruck - Bemessung der Vorspannkraft . . . . .	159
5.7.5	Axialdruck mittels Wellenmutter . . . . .	161
5.7.6	Axialdruck durch Stangen mit Verschraubung . . . . .	167
5.7.7	Einfluss der Welle-Nabe-Verbindung auf die Drehzahl- festigkeit . . . . .	170
5.7.8	Schleuderversuche zur experimentellen Validierung . .	179
<b>6</b>	<b>Auslegung des Spindel-Lager-Systems</b>	<b>191</b>
6.1	Vorauslegung . . . . .	191
6.1.1	Machbarkeitsanalyse . . . . .	191
6.1.2	Definition von Lastfällen . . . . .	193
6.1.3	Vorauslegung der Lagerstellen . . . . .	194
6.2	Qualifizierung des Werkstoffs Ni42 . . . . .	196
6.2.1	Anforderungen an die Randschichthärte der Spindelwelle	197
6.2.2	Verfahren zum Randschichthärten von Ni42 . . . . .	198
6.2.3	Härteprüfung von Materialproben aus Ni42 . . . . .	200
6.2.4	Fazit zur Qualifizierung von Ni42 als Spindelwellen- werkstoff . . . . .	202
6.3	Berechnung der starren Lageranstellung . . . . .	202
6.3.1	Modell der Motorspindel mit starrer Lagerung und SynRM	202
6.3.2	Berechnungen zur starr angestellten Lagerauslegung .	203
6.4	Simulative Untersuchung des dynamischen Betriebsverhaltens	211
<b>7</b>	<b>Thermische Modellbildung des starren Spindel-Lager-Systems mit Synchronreluktanzantrieb</b>	<b>215</b>
7.1	Vorgehensweise zur numerischen thermischen Modellerstellung	215
7.2	Wärmequellen . . . . .	216
7.2.1	Elektrische Verluste des SynRM . . . . .	216
7.2.2	Lagerreibungsverluste . . . . .	217
7.2.3	Luftreibungsverluste . . . . .	219
7.3	Wärmesenken . . . . .	220
7.3.1	Wärmeabgabe an die Umgebung . . . . .	220
7.3.2	Wärmeabgabe durch Flüssigkeitskühlung . . . . .	221
7.4	Wärmeübertragung . . . . .	221
7.4.1	Wärmetransport in und zwischen Bauteilen . . . . .	221
7.4.2	Wärmeübergang in der Kühllülse . . . . .	221
7.4.3	Wärmeübergang im Luftspalt . . . . .	222
7.4.4	Wärmeübergang in Wälzlagern . . . . .	222
7.5	Thermische Modellberechnungen . . . . .	224

7.6	Ergebnisse der numerischen Modellberechnungen . . . . .	226
7.6.1	Verlustaufteilung . . . . .	226
7.6.2	Stationäre Temperaturverteilung . . . . .	229
7.6.3	Lageranalyse . . . . .	230
<b>8</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>233</b>
8.1	Motorspindelprüfstand . . . . .	233
8.2	Identifikation der Motorparameter . . . . .	237
8.2.1	Experimentelle Vorgehensweise . . . . .	239
8.2.2	Identifizierte Induktivitäten . . . . .	239
8.3	Systemwirkungsgrad und Leistungsfaktor . . . . .	245
8.3.1	Experimentelle Vorgehensweise . . . . .	246
8.3.2	Ergebniskennfelder . . . . .	247
8.3.3	Aufteilung der Verlustanteile . . . . .	249
8.4	Thermisches Betriebsverhalten . . . . .	254
8.4.1	Experimentelle Vorgehensweise . . . . .	254
8.4.2	Thermisches Verhalten im Leerlauf . . . . .	256
8.4.3	Thermisches Verhalten unter Last . . . . .	260
8.5	Dynamisches Betriebsverhalten . . . . .	263
8.5.1	Rundlauf im Betrieb . . . . .	263
8.5.2	Frequenzganganalyse . . . . .	267
8.6	Fazit zu den experimentellen Untersuchungen . . . . .	269
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>275</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>281</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>315</b>
A.1	Berechnungen zum Einsatzpotenzial von Synchronreluktanzmotoren in Motorspindeln . . . . .	315
A.2	Toleranzklassen und Passungswahl für schnelldrehende Motorspindeln . . . . .	316
A.3	Auslegung der elastischen Federvorspannkraft . . . . .	316
A.4	Analytisches Modell des Spindel-Lager-Systems . . . . .	321
A.5	Berechnungsablauf zur analytischen SynRM-Vorauslegung . . . . .	327
A.6	Statistische Versuchsplanung zur Auslegung optimierter SynRM-Rotoren . . . . .	329
A.7	Werkstoffdaten des Elektrobands NO20HS . . . . .	331
A.8	Werkstoffdaten der Spindelwellen . . . . .	333
A.9	Härtevergleichstabelle . . . . .	336