



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 • E-Mail: 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

Formelzeichen und Abkürzungen	xi
1 Einleitung	1
2 Motivation	5
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
3 Grundlagen, Stand der Wissenschaft und Technik	23
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

4	Zielsetzung und Vorgehensweise	89
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 Lösungsansätze 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
5	Auslegung des Synchronreluktanzantriebs	111
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 Tangentialstege	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 Flussperren	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
6	Auslegung des Spindel-Lager-Systems	191
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
7	Thermische Modellbildung des starren Spindel-Lager-Systems mit Synchronreluktanzantrieb	215
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
8	Experimentelle Untersuchungen	233
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
9	Zusammenfassung und Ausblick	275
	Literaturverzeichnis	281
A	Anhang	315
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