

# 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 Motorspindelsysteme	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 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 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
<b>5 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 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 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 Drehzahlfestigkeit . . . . .	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 Spindelwellenwerkstoff . . . . .	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 Kühlhülse . . . . .	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 Motor-spindeln . . . . .	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