

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichenkonvention</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Thematische Einordnung . . . . .	1
1.2 Stand der Technik und Forschung . . . . .	2
1.2.1 EMK-basierte Verfahren . . . . .	2
1.2.2 Verfahren mittels Ausnutzung parasitärer Effekte . . . . .	3
1.2.3 Anisotropie-basierte Verfahren mit HF-Injektion . . . . .	4
1.2.4 Gezielte Erzeugung einer Anisotropie durch das Maschinendesign . . . . .	5
1.3 Forschungsleitende Hypothesen . . . . .	6
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>Formelzeichenverzeichnis</b>	<b>1</b>
<b>2 Beschreibung des Antriebssystems</b>	<b>9</b>
2.1 Gesamtsystem . . . . .	9
2.2 Elektrische Maschine - Modellierung der Induktionsmaschine . . . . .	10
2.2.1 Raumzeiger . . . . .	11
2.2.2 Vereinfachtes Modell der Induktionsmaschine mit Raumzeigern . . . . .	12
2.2.3 Berechnung des Drehmoments . . . . .	15
2.2.4 Betriebsbereiche . . . . .	15
2.3 Leistungselektronik - Zweipunktwechselrichter . . . . .	16
2.3.1 Pulsdauermodulation . . . . .	17
2.3.2 Abbildungsfehler des Wechselrichters . . . . .	19
2.4 Feldorientierte Regelung . . . . .	20
2.4.1 Stellwertbegrenzung und Anti-Windup-Regler . . . . .	21
2.4.2 Parametrierung der Regler . . . . .	22
2.4.3 Rotorflussschätzung . . . . .	22
<b>3 Modell der Induktionsmaschine mit nicht-sinusförmiger Feldverteilung</b>	<b>25</b>
3.1 Ermittlung der Induktivität mittels der Wicklungsfunktion . . . . .	25
3.1.1 Berücksichtigung der Schrägung . . . . .	26
3.1.2 Berücksichtigung der Nutzung . . . . .	26
3.1.3 Berücksichtigung der Exzentrizitäten . . . . .	27
3.1.4 Berücksichtigung der Sättigung . . . . .	28
3.1.5 Bestimmung der resultierenden Leitwertwelle . . . . .	29

3.2	Ermittlung der Streuinduktivitäten . . . . .	30
3.2.1	Nutstreuung (Einschichtwicklung) . . . . .	30
3.2.2	Nutstreuung (Zweischichtwicklung) . . . . .	31
3.2.3	Wicklungskopfstreuung . . . . .	32
3.3	Modell der IM . . . . .	33
3.3.1	Berechnung der Maschineninduktivitäten . . . . .	34
3.3.2	Berechnung des Drehmoments . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Verfahren zur geberlosen Regelung von Induktionsmaschinen</b>	<b>39</b>
4.1	Herleitung der Beobachterstruktur . . . . .	40
4.1.1	Beobachter im $\alpha\beta$ -Koordinatensystem . . . . .	40
4.1.2	Beobachter im $\hat{x}\hat{y}$ -Koordinatensystem . . . . .	42
4.2	Analytische Beschreibung des Beobachterfehlers . . . . .	45
4.2.1	Beobachterfehler in $\alpha\beta$ -Koordinaten . . . . .	45
4.2.2	Beobachterfehler in geschätzten $\hat{x}\hat{y}$ -Koordinaten . . . . .	46
4.2.3	Simulative Untersuchung des Beobachterfehlers . . . . .	48
4.3	Drehzahlschätzung mit EMK-basierter Auswertung . . . . .	55
4.3.1	Gradientenabstiegsverfahren . . . . .	55
4.3.2	Bestimmung des Gradienten für die Drehzahlschätzung . . . . .	56
4.3.3	Modifikation der Drehzahladaption . . . . .	58
4.3.4	Parametrierung der Drehzahladaption . . . . .	59
4.3.5	Bewertung des Übertragungsverhaltens der Drehzahlschätzung . . . . .	67
4.4	Integration der Rotorlageschätzung mit Anisotropie-basierter Auswertung . . . . .	72
4.4.1	Injektionsmuster . . . . .	73
4.4.2	Anisotropie-basierte Auswertung des Beobachterfehlers . . . . .	75
4.4.3	Design der Rotorlageschätzung . . . . .	76
4.4.4	Erweiterung der Beobachterstruktur für HF-Parameter . . . . .	81
4.4.5	Bewertung des Übertragungsverhaltens der Lageschätzung . . . . .	84
4.5	Synthese der EMK- und Anisotropie-basierten Auswertungen . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Anisotropie aufgrund einer einachsigen Zusatzwicklung im Rotor</b>	<b>89</b>
5.1	Prinzip . . . . .	89
5.2	Modell der IM mit Zusatzwicklung . . . . .	90
5.2.1	Mathematische Beschreibung der Wirkung der Zusatzwicklung auf HF-Signale . . . . .	91
5.2.2	Einfluss der Parameter der Zusatzwicklung auf die Anisotropie . . . . .	92
5.2.3	Erweiterung des Modells mit nicht-sinusförmiger Feldverteilung für die IM mit Zusatzwicklung . . . . .	94
5.2.4	Ermittlung der Anisotropie auf Basis des detaillierten IM-Modells mit Zusatzwicklung . . . . .	96
5.3	Designmöglichkeiten . . . . .	97
5.3.1	Anzahl der Zusatzwicklung pro Polteilung . . . . .	98
5.3.2	Material der Zusatzwicklung . . . . .	98
5.3.3	Form der Zusatzleiter und Abmessungen . . . . .	99
5.3.4	Ausführung des Wicklungskopfs . . . . .	100
5.3.5	Bezeichnungcode der Designs . . . . .	100
5.4	Untersuchung des Einflusses der Zusatzwicklung auf die Anisotropie . . . . .	101
5.4.1	Ermittlung der Anisotropie . . . . .	101

5.4.2	Bewertungskriterien für Anisotropiebetachtung . . . . .	105
5.4.3	Betrachtung der Designs mit Variation des Materials der Zusatzwicklung	107
5.4.4	Betrachtung der Designs mit Variation der Form . . . . .	108
5.4.5	Betrachtung der Designs mit Variation der Abmessungen . . . . .	108
5.4.6	Betrachtung der Designs mit Variation der Anzahl der Zusatzleiter pro Polteilung und Verbindungsweise . . . . .	110
5.4.7	Ableitung allgemeiner Designempfehlungen . . . . .	110
5.5	Aufbau eines Prototypen mit Zusatzwicklung . . . . .	111
5.6	Experimentelle Validierung . . . . .	112
5.6.1	Bestimmung der Anisotropie mittels Impedanzmessung . . . . .	112
5.6.2	Bestimmung der Anisotropie mittels Stromanstiegsauswertung . . . . .	116
5.6.3	Bestimmung der Anisotropie mittels rotierender HF-Injektion . . . . .	121
5.6.4	Vergleich der Messmethoden zur die Bestimmung der Anisotropie . . . . .	123
5.6.5	Vergleich mit IM ohne Zusatzwicklung . . . . .	125
5.6.6	Vergleich mit FEM-Simulation . . . . .	125
5.6.7	Vergleich mit der Berechnung basierend auf dem detaillierten IM- Modell mit Zusatzwicklung . . . . .	128
<b>6</b>	<b>Simulation des Antriebssystems</b>	<b>131</b>
6.1	Aufbau des Simulationsmodells . . . . .	131
6.1.1	Simulationsmodell der IM . . . . .	131
6.1.2	Simulationsmodell des WR . . . . .	131
6.1.3	Simulationsmodell der Stromsensorik . . . . .	134
6.1.4	Simulationsmodell der Last . . . . .	135
6.1.5	Simulationsmodell der FOR . . . . .	135
6.1.6	Lage-/ Drehzahlschätzung . . . . .	135
6.2	Simulationsergebnisse . . . . .	136
6.2.1	Simulation der stromgeregelte IM aus Prüfstand P1 . . . . .	136
6.2.2	Simulation der drehzahlgeregelten IM aus Prüfstand P1 . . . . .	137
6.2.3	Simulation der stromgeregelter IM aus Prüfstand P2 . . . . .	139
6.2.4	Simulation der drehzahlgeregelte IM aus Prüfstand P2 . . . . .	140
<b>7</b>	<b>Experimentelle Validierung</b>	<b>145</b>
7.1	Versuchsaufbau . . . . .	145
7.1.1	Prüfstand P1 . . . . .	145
7.1.2	Prüfstand P2 . . . . .	147
7.2	Ergebnisse der EMK-basierten Auswertung . . . . .	148
7.2.1	Drehzahlgeregelter Betrieb . . . . .	149
7.2.2	Drehmomentgeregelter Betrieb . . . . .	162
7.3	Ergebnisse der Anisotropie-basierten Auswertung . . . . .	169
7.3.1	Genauigkeit der Rotorlageschätzung . . . . .	169
7.3.2	Kompensation des Rotorlageschätzfehlers . . . . .	172
7.3.3	Stromgeregelter Betrieb . . . . .	174
7.3.4	Drehzahlgeregelter Betrieb . . . . .	180
7.3.5	Synthese . . . . .	184
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>187</b>

<b>A Anhang</b>	<b>191</b>
A.1 Raumzeigertransformation . . . . .	191
A.2 Optimierungskriterien zur Parametrierung von Reglern . . . . .	193
A.3 Herleitung zur Berechnung der Induktivität mittels der Wicklungsfunktion . . . . .	198
A.4 Widerstandsmatrix und Induktivitätsmatrix für die Käfigwicklung für das IM- Modell mit nicht-sinusförmiger Feldverteilung . . . . .	203
A.5 Berechnung des stationären Arbeitspunktes einer Induktionsmaschine . . . . .	204
A.6 Herleitung der Übertragungsfunktion des Beobachters mittels Linearisierung . . . . .	205
A.7 Komponenten des Prüfstands P1 . . . . .	207
A.8 Komponenten des Prüfstands P2 . . . . .	211
A.9 Ergebnisse zur Kompensation des Abbildungsfehlers des WR . . . . .	215
A.9.1 Messtechnische Bestimmung der Störspannung . . . . .	215
A.9.2 Methoden zur Kompensation der Störspannung . . . . .	218
A.9.3 Experimentelle Ergebnisse zur Kompensation des Abbildungsfehlers . . . . .	219
A.10 Identifikation der Maschinenparameter . . . . .	223
A.10.1 Ergebnisse der Parameteridentifikation . . . . .	224
A.11 Weitere am Prüfstand P1 erzielte Ergebnisse für die EMK-basierte Auswertung im drehzahlgeregelten Betrieb . . . . .	229
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>257</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>263</b>