

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXI</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>XXIII</b>
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XXIII
Symbolverzeichnis . . . . .	XXIV
<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Motivation . . . . .	3
1.2 Ziele der Arbeit . . . . .	5
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2 Anforderungen an Prüfstände in der Automobilindustrie</b>	<b>9</b>
2.1 Einteilung von Antriebsstrangprüfständen . . . . .	10
2.2 Analytische Berechnungen zu Drehmomentprofilen . . .	12
2.2.1 Gaskraft . . . . .	12
2.2.2 Massenkräfte . . . . .	17
2.2.3 Gesamtkraft . . . . .	19
2.2.4 Drehmoment an der Kurbelwelle . . . . .	19
2.2.5 Berechnung von Mehrzylindermotoren . . . . .	24
2.3 Mess- und Simulationsdaten zu Drehmomentprofilen . .	28
2.3.1 Messdaten . . . . .	28
2.3.1.1 Anlassvorgang . . . . .	29
2.3.1.2 Rennstrecke . . . . .	31
2.3.2 Simulationsdaten . . . . .	35
2.3.3 Zusammenfassung . . . . .	39
2.4 Genauigkeit der Drehmomentnachbildung . . . . .	40
2.5 Zusammenfassung . . . . .	43

<b>3</b>	<b>Oberschwingungsregelung</b>	<b>45</b>
3.1	Einleitung . . . . .	45
3.2	Stand der Technik . . . . .	47
3.2.1	Feldorientierte Regelung . . . . .	47
3.2.2	Direkte Drehmomentregelung . . . . .	50
3.2.3	Verallgemeinerte PI-Regler . . . . .	51
3.2.4	Sonstige Vorarbeiten . . . . .	53
3.3	Oberschwingungsregelung . . . . .	55
3.4	Stabilitätsuntersuchung . . . . .	58
3.5	Simulationsumgebung . . . . .	70
3.6	Ordnungen der notwendigen Oberschwingungsregelblöcke	71
3.6.1	Numerischer Nachweis . . . . .	71
3.6.2	Analytischer Nachweis . . . . .	74
3.6.3	Simulativer Nachweis . . . . .	78
3.7	Harmonische in verschiedenen Bezugssystemen . . . . .	82
3.8	Gegenseitige Beeinflussung von Oberschwingungsreglern	91
3.9	Prüfstand . . . . .	94
3.10	Messungen . . . . .	97
3.10.1	Vorbereitung . . . . .	97
3.10.2	Untersuchungen am Maschinenprüfstand . . . . .	98
3.11	Zusammenfassung . . . . .	106
<b>4</b>	<b>Verlustbestimmung</b>	<b>107</b>
4.1	Betrachtung verschiedener Stromrichter . . . . .	107
4.1.1	Einleitung . . . . .	107
4.1.2	Stand der Technik . . . . .	108
4.1.3	Aufbau von 2- und 3-Level-Stromrichtern . . . . .	110
4.1.4	Analytische Berechnung der Verluste und Sperrschichttemperatur . . . . .	114
4.1.4.1	Verlustberechnung für 2-Level-Stromrichter . . . . .	116
4.1.4.2	Verlustberechnung für 3-Level-Stromrichter . . . . .	118
4.1.4.3	Berechnung der Sperrschichttemperatur	120
4.1.5	Gegenüberstellung der Kosten großer Stromrichter	120
4.1.6	Gegenüberstellung der Verluste und Sperrschichttemperaturen . . . . .	123

4.1.7	Zusammenfassung . . . . .	126
4.2	Analytische Berechnung der Verluste in PMSM . . . . .	129
4.2.1	Stand der Technik . . . . .	129
4.2.2	Stromwärmeverluste . . . . .	131
4.2.3	Ummagnetisierungsverluste . . . . .	133
4.2.4	Verluste in den Magneten . . . . .	137
4.2.4.1	Lastunabhängige Oberflächenverluste . . . . .	137
4.2.4.2	Lastabhängige Oberflächenverluste . . . . .	139
4.2.4.3	Stromrichterbedingte Zusatzverluste . . . . .	140
4.3	Gegenüberstellung von Messungen und Berechnungen . . . . .	143
4.3.1	Stromrichterverluste . . . . .	143
4.3.2	Maschinenverluste abhängig von Topologie und Pulsfrequenz des Stromrichters . . . . .	145
4.3.2.1	Gesamtverluste in der Maschine . . . . .	147
4.3.2.2	Stromwärmeverluste . . . . .	149
4.3.2.3	Ummagnetisierungsverluste . . . . .	151
4.3.2.4	Verluste in den Magneten . . . . .	152
4.3.3	Verluste durch Zwischenharmonische . . . . .	153
4.3.4	Gesamtsystembetrachtung . . . . .	161
4.4	Zusammenfassung . . . . .	162
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>165</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	165
5.2	Ausblick . . . . .	166
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>169</b>
A.1	Überblick zu installierten Prüfständen . . . . .	169
A.2	Tangentialkraftverläufe von Mehrzylindermotoren . . . . .	173
A.3	Auftretende Harmonische in einer PMSM . . . . .	175
A.4	Oberschwingungsregelung in Mit- und Gegensystem . . . . .	178
A.5	Daten der PMSM . . . . .	179
A.6	Daten und Messungen des Prüfstandes . . . . .	181
	<b>Literatur</b>	<b>185</b>