

# Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen

Bearbeitet von  
Dierk Schröder

4. Auflage 2015. Buch. XXXII, 1879 S. Hardcover  
ISBN 978 3 642 30095 0  
Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Energietechnik, Elektrotechnik > Elektromotoren](#)

Zu [Leseprobe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

The logo for beck-shop.de features the text "beck-shop.de" in a bold, red, sans-serif font. Above the "i" in "shop" are three red dots of increasing size. Below the main text, the words "DIE FACHBUCHHANDLUNG" are written in a smaller, red, all-caps, sans-serif font.

**beck-shop.de**  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Regelungstechnische Grundbegriffe und Grundregeln</b>	<b>1</b>
1.1	Gegenüberstellung von Steuerung und Regelung . . . . .	1
1.2	Beschreibung des dynamischen Verhaltens durch Signalfusspläne	6
1.3	Frequenzgang . . . . .	10
1.3.1	Ortskurvendarstellung in rechtwinkligen Koordinaten . . . . .	13
1.3.2	Frequenzkennlinien, Bode-Diagramm . . . . .	15
1.4	Rechenregeln, Umwandlungsregeln, Signalfussplan . . . . .	22
1.5	Führungs- und Störungsübertragungsfunktion . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Stabilisierung und Optimierung von Regelkreisen</b>	<b>28</b>
2.1	Stabilität . . . . .	29
2.1.1	Nyquist-Kriterium . . . . .	31
2.1.2	Frequenzkennlinien . . . . .	34
2.2	Stabilitätsprüfung anhand der Übertragungsfunktion . . . . .	36
2.3	Optimierung bei offenem Kreis (Bode-Diagramm) . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Standard-Optimierungsverfahren</b>	<b>46</b>
3.1	Betragsoptimum (BO) . . . . .	46
3.1.1	Herleitung für Strecken ohne I-Anteil . . . . .	47
3.1.2	Verallgemeinerung und Anwendung des Betragsoptimums . .	50
3.1.3	Mathematische Herleitung des Betragsoptimums . . . . .	56
3.2	Symmetrisches Optimum (SO) . . . . .	60
3.2.1	Herleitung für Strecken mit I-Anteil . . . . .	60
3.2.2	Verallgemeinerung und Anwendung des Symmetrischen Opti- mums . . . . .	65
3.2.3	Mathematische Herleitung des Symmetrischen Optimums . .	72
3.3	Auswahl des Reglers und Bestimmung der Optimierung . . .	74
3.4	Optimierungstabelle . . . . .	81
3.5	Führungsverhalten bei rampenförmiger Anregung . . . . .	83
3.6	Resonanter P-Regler . . . . .	84

<b>4</b>	<b>Verallgemeinerte Optimierungsverfahren</b>	<b>88</b>
4.1	Dämpfungsoptimum (DO) . . . . .	88
4.1.1	Herleitung der Doppelverhältnisse . . . . .	89
4.1.2	Standardfunktionen des Dämpfungsoptimums . . . . .	90
4.1.3	Reglerauslegung nach dem Dämpfungsoptimum . . . . .	92
4.2	Beispiele zum Dämpfungsoptimum . . . . .	96
4.3	Zählerpolynom und äquivalente Sollwertglättung . . . . .	101
4.4	Erweitertes Dämpfungsoptimum . . . . .	103
4.4.1	Kompensation des Zählerpolynoms . . . . .	103
4.4.2	Divisionsmethode . . . . .	103
4.4.3	Allgemeine Methode für Strecken mit Zählerpolynomen . . .	104
4.5	Reglerentwurf durch Gütefunktionale . . . . .	108
4.6	Reglerauslegung mit MATLAB . . . . .	113
<b>5</b>	<b>Regelkreisstrukturen</b>	<b>117</b>
5.1	Allgemein vermaschter Regelkreis . . . . .	117
5.1.1	Begrenzungsregelung . . . . .	117
5.1.2	Störgrößenaufschaltung . . . . .	118
5.1.3	Hilfsstellgrößen . . . . .	119
5.2	Kaskadenregelung . . . . .	120
5.3	Modellbasierte Regelungen . . . . .	124
5.3.1	Conditional Feedback . . . . .	124
5.3.2	Internal Model Control (IMC) . . . . .	125
5.3.3	Smith-Prädiktor . . . . .	127
5.4	Vorsteuerung . . . . .	128
5.4.1	Übertragungsfunktionen . . . . .	129
5.4.2	Auslegung der Vorsteuerübertragungsfunktion $A(s)$ . . . . .	129
5.4.3	Beispiel: Nachlaufregelung mit I-T <sub>1</sub> -Strecke . . . . .	130
5.4.4	Beispiel: Nachlaufregelung mit zwei P-T <sub>1</sub> -Strecken und PI-Regler	132
5.5	Zustandsregelung . . . . .	133
5.5.1	Zustandsdarstellung . . . . .	133
5.5.2	Normalformen . . . . .	136
5.5.3	Lösung der Zustandsdifferenzialgleichung im Zeitbereich . . .	139
5.5.4	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	139
5.5.5	Entwurf einer Zustandsregelung . . . . .	142
5.5.6	Zustandsbeobachter . . . . .	146
5.5.6.1	Beobachtung mit Differentiation und Parallelmodell . . . . .	146
5.5.6.2	Luenberger-Beobachter . . . . .	147
5.5.6.3	Zustandsregelung mit Beobachter . . . . .	149
5.5.6.4	Kalman-Filter . . . . .	151
5.5.7	Zusammenfassung . . . . .	152
5.5.8	Alternative Strukturen . . . . .	153

5.6	Stellbegrenzungen in Regelkreisen	
	<i>Dr. P. Hippe, Prof. C. Wurmthaler . . . . .</i>	158
5.6.1	Allgemeine Vorbemerkungen . . . . .	158
5.6.2	Regler-Windup bei PI- und PID-Reglern . . . . .	159
5.6.2.1	Beschreibung des Phänomens . . . . .	159
5.6.2.2	Maßnahmen zur Vermeidung des Regler-Windup bei PI- und PID-Reglern . . . . .	161
5.6.3	Systematisches Vorgehen zur Beseitigung von Regler- und Strecken-Windup . . . . .	162
5.6.3.1	Vermeidung von Regler-Windup . . . . .	163
5.6.3.2	Vermeidung von Strecken-Windup . . . . .	167
5.6.4	Struktur zur Berücksichtigung von Begrenzungen der Stellgeschwindigkeit und der Stellamplitude . . . . .	173
5.6.5	Regelkreisstruktur mit zwei Freiheitsgraden . . . . .	179
5.7	Sensor-Begrenzung in Regelkreisen	
	<i>Dr. P. Hippe, Erlangen . . . . .</i>	184
5.7.1	Allgemeine Vorbemerkungen . . . . .	184
5.7.2	Formulierung des Problems . . . . .	186
5.7.3	Vermeidung von Windup durch Führungsgrößen . . . . .	186
5.7.4	Störverhalten des nichtlinearen Regelkreises . . . . .	187
5.7.5	Der neue Ansatz zur Windup-Vermeidung bei Sensor-Sättigung	190
5.7.6	Dimensionierung der Windup-Vermeidung . . . . .	192
5.7.7	Vermeidung von Windup bei gleichzeitigem Einwirken von Stör- und Führungssignalen . . . . .	193
<b>6</b>	<b>Abtastsysteme</b>	196
6.1	Grundlagen der $z$ -Transformation . . . . .	196
6.1.1	Abtastvorgang . . . . .	197
6.1.2	$z$ -Transformation . . . . .	198
6.1.3	Gesetze und Rechenmethoden der $z$ -Transformation . . . . .	200
6.1.4	Transformationstabelle . . . . .	208
6.2	Übertragungsfunktionen von Abtastsystemen . . . . .	212
6.2.1	Stabilität und Pollagen . . . . .	212
6.2.2	Übertragungsverhalten von zeitdiskreten Systemen . . . . .	217
6.2.3	Frequenzkennlinien-Darstellung von Abtastsystemen . . . . .	219
6.2.4	Systeme mit mehreren nichtsynchronen Abtastern . . . . .	223
6.3	Einschleifige Abtastregelkreise . . . . .	225
6.3.1	Aufbau von digitalen Abtastregelkreisen . . . . .	225
6.3.2	Elementare zeitdiskrete Regler . . . . .	227
6.3.3	Quasikontinuierlicher Reglerentwurf . . . . .	229
6.4	Optimierung des Reglers bei Abtastregelkreisen . . . . .	232
6.4.1	Realisierungsverfahren von Abtastreglern . . . . .	232
6.4.2	Parameteroptimierung des Reglers nach einem Gütekriterium	233

6.4.3	Entwurf als Kompensationsregler . . . . .	234
6.5	Entwurf zeitdiskreter Regelkreise auf endliche Einstellzeit . .	236
6.5.1	Reglerentwurf ohne Stellgrößenvorgabe . . . . .	238
6.5.2	Reglerentwurf mit Stellgrößenvorgabe . . . . .	242
6.5.3	Wahl der Abtastzeit bei Dead-Beat-Reglern . . . . .	244
6.5.4	Beispiel zum Dead-Beat-Regler . . . . .	245
6.6	Diskretisierungs-Nullstelle — Digitale Signalverarbeitung . .	248
<b>7</b>	<b>Regelung der Gleichstrommaschine</b>	<b>261</b>
7.1	Geregelte Gleichstromnebenschlußmaschine im Ankerstellbereich	262
7.1.1	Stromregelkreis . . . . .	262
7.1.1.1	EMK-Kompensation . . . . .	263
7.1.1.2	EMK-Bestimmung . . . . .	264
7.1.1.3	Ausführung der EMK-Aufschaltung . . . . .	266
7.1.1.4	Optimierung des Stromregelkreises . . . . .	267
7.1.1.5	Optimierung des Stromregelkreises mit Meßwertglättung . . .	271
7.1.2	Drehzahlregelkreis . . . . .	275
7.1.2.1	Optimierung des Drehzahlregelkreises mit Meßwertglättung .	278
7.1.2.2	Regelkreise mit Stromsollwertbegrenzung . . . . .	279
7.1.2.3	Direkte Drehzahlregelung . . . . .	283
7.1.2.4	Strombegrenzungsregelung . . . . .	285
7.1.3	Lageregelung . . . . .	286
7.2	Geregelte Gleichstromnebenschlußmaschine im Feldschwächbereich . . . . .	290
7.2.1	Erregerstromregelung . . . . .	294
7.2.2	Schaltungsvarianten . . . . .	296
7.2.3	Sammelschienenantrieb . . . . .	297
7.2.4	Contiflux-Regelung . . . . .	300
7.2.5	Spannungsabhängige Feldschwächung . . . . .	301
<b>8</b>	<b>Fehlereinflüsse und Genauigkeit bei geregelten Systemen</b>	<b>313</b>
8.1	Ausregelbare Fehler . . . . .	313
8.2	Nicht ausregelbare Fehler . . . . .	317
8.3	Abschätzung der Auswirkung der Fehler . . . . .	323
8.3.1	Statische Fehler . . . . .	323
8.3.1.1	Fehler des Operationsverstärkers . . . . .	324
8.3.1.2	Laständerungen . . . . .	326
8.3.1.3	Sollwertgeber . . . . .	327
8.3.1.4	Tachogenerator . . . . .	328
8.3.1.5	Istwertteiler . . . . .	329
8.4	Erreichbare Genauigkeit analog drehzahl geregelter Antriebe .	329
8.5	Fehler in Systemen mit digitaler Erfassung von Position und Drehzahl . . . . .	331

8.5.1	Digitale Positionsmessung . . . . .	331
8.5.2	Digitale Drehzahlfassung . . . . .	332
8.6	Geber . . . . .	334
8.6.1	Strommessung . . . . .	334
8.6.2	Spannungsmessung . . . . .	337
8.6.3	Gegenüberstellung von Drehzahl- und Positionsgebern <i>Prof. R. Kennel, München</i> . . . . .	338
8.6.3.1	Drehzahlregelung . . . . .	338
8.6.3.2	Positionsregelung . . . . .	340
8.7	EMV, störsichere Signalübertragung und Störschutzmaßnahmen	353
8.7.1	Oberschwingungen, EMV und Normen . . . . .	353
8.7.2	Störsichere analoge Signalübertragung . . . . .	355
8.7.3	Störschutzmaßnahmen . . . . .	356
<b>9</b>	<b>Netzgeführte Stromrichter</b>	<b>359</b>
9.1	Prinzipielle Funktion netzgeführter Stellglieder . . . . .	359
9.2	Vereinfachte Approximation . . . . .	363
9.3	Untersuchung des dynamischen Verhaltens netzgeführter Stromrichterstellglieder . . . . .	368
9.3.1	Analyse des Stromrichterstellglieds bei einer Zündwinkelver- stellung in Richtung abnehmendem Steuerwinkel . . . . .	369
9.3.2	Analyse des Stromrichterstellglieds bei einer Zündwinkelver- stellung in Richtung zunehmendem Steuerwinkel . . . . .	374
9.4	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	377
9.5	Laufzeitnäherung für das Großsignalverhalten, Symmetrierung	383
9.6	Großsignal-Approximationen für netzgeführte Stromrichter- stellglieder . . . . .	387
9.7	Zusammenfassung . . . . .	393
<b>10</b>	<b>Untersuchung von Regelkreisen mit Stromrichtern mit der Abtasttheorie</b>	<b>394</b>
10.1	Untersuchung des Steuergerätes ohne dynamische Symme- trierung . . . . .	396
10.2	Untersuchung des Stromrichters . . . . .	398
10.3	Stromrichterstellglied bei lückendem Strom . . . . .	403
10.4	Adaptive Stromregelung . . . . .	408
10.4.1	Allgemeine Betrachtung . . . . .	408
10.4.2	Praktische Realisierung . . . . .	413
10.4.3	Prädiktive Stromführung . . . . .	422
10.5	Zusammenfassung . . . . .	424

<b>11</b>	<b>Beschreibungsfunktion des Stromrichters mit natürlicher Kommutierung</b>	<b>425</b>
11.1	Allgemeine Einführung . . . . .	425
11.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	428
11.3	Untersuchung von Regelkreisen mit der Beschreibungsfunktion	435
11.4	Grenzen des Verfahrens . . . . .	440
<b>12</b>	<b>Vergleich verschiedener Approximationen für netzgeführte Stromrichter</b>	<b>441</b>
12.1	Ermittlung von $G_l(z, m)$ , Sprungfähigkeit . . . . .	442
12.2	Berechnung der ersten Ableitung der Steuersatzeingangsspannung . . . . .	445
12.3	Überprüfung der Stromrichterstellglied-Approximationen . . .	449
12.4	Synthese von Regelkreisen mit Stromrichter-Stellgliedern . . .	456
<b>13</b>	<b>Asynchronmaschine</b>	<b>461</b>
13.1	Grundlagen . . . . .	461
13.1.1	Funktionsprinzip der Drehfeld-Asynchronmaschine . . . . .	462
13.1.2	Raumzeigerdarstellung . . . . .	463
13.1.2.1	Definition eines Raumzeigers . . . . .	463
13.1.2.2	Rücktransformation auf Momentanwerte . . . . .	467
13.1.2.3	Koordinatensysteme . . . . .	467
13.1.2.4	Differentiation im umlaufenden Koordinatensystem . . . . .	470
13.1.2.5	Bestimmung der Raumzeiger aus Motordaten . . . . .	471
13.2	Signalflusspläne der Asynchronmaschine im Koordinatensystem $K$ . . . . .	472
13.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem . . . . .	473
13.2.2	Verallgemeinerter Signalflussplan der spannungsgesteuerten Asynchronmaschine . . . . .	487
13.2.3	Signalflussplan der stromgesteuerten Asynchronmaschine . . .	490
13.2.4	Stationärer Betrieb der Asynchronmaschine . . . . .	491
13.2.5	Umrechnung für Stern- und Dreieckschaltung . . . . .	494
13.3	Steuerverfahren der Asynchronmaschine . . . . .	497
13.3.1	Signalflussplan bei Statorflussorientierung . . . . .	498
13.3.2	Signalflussplan bei Rotorflussorientierung . . . . .	499
13.3.3	Signalflussplan bei Luftspaltflussorientierung . . . . .	506
13.4	Regelungsverfahren der Asynchronmaschine . . . . .	512
13.4.1	Entkopplungsregelung der Asynchronmaschine . . . . .	513
13.4.2	Entkopplung bei Umrichtern mit eingepprägter Spannung . . .	515
13.4.3	Entkopplung bei Umrichtern mit eingepprägtem Strom . . . .	524
13.4.4	Feldorientierte Regelung der Asynchronmaschine . . . . .	531
13.5	Modellbildung der Asynchronmaschine . . . . .	539
13.5.1	$I_1$ -Modell (Strommodell) . . . . .	539

13.5.2	$I_1\beta_L$ -Modelle und $I_1\Omega_L$ -Modelle . . . . .	545
13.5.3	$U_1I_1$ -Modell . . . . .	549
13.5.4	$U_1I_1\Omega_L$ -Modell . . . . .	553
13.5.5	$U_1\Omega_L$ -Modell . . . . .	554
13.5.6	Zusammenfassung der Modelle . . . . .	557
13.6	Parameterbestimmung an DASM <i>Prof. W. Michalik, Dresden</i> . . . . .	562
13.6.1	Übersicht zu Methoden der Parameterbestimmungen an Drehstrom-Asynchronmaschinen . . . . .	562
13.6.2	Parameterbestimmungen mit herkömmlichen Verfahren der Maschinenprüfung . . . . .	566
13.6.2.1	Vorgehensweise . . . . .	568
13.6.3	Parameterbestimmungen mit Parameterschätzverfahren . . .	576
13.6.3.1	Prinzip der Parameterschätzung . . . . .	576
13.6.3.2	Parameterschätzungen an Asynchronmaschinen bei linearem Parametereinfluss auf die Schätzfehler . . . . .	577
13.6.3.3	Parameterschätzungen an Drehstrom-Asynchronmaschinen bei nichtlinearem Parametereinfluss auf die Schätzfehler . . . . .	592
13.7	Asynchronmaschine in normierter Darstellung . . . . .	613
13.8	Feldschwächbetrieb der Asynchronmaschine . . . . .	618
13.9	Einschränkungen bei der Realisierung der Regelung von Drehfeldantrieben . . . . .	620
13.9.1	Abtastender Regler . . . . .	620
13.9.2	Sättigungseffekte . . . . .	622
13.9.3	Realisierbare Entkopplungsstruktur . . . . .	623
13.9.4	Zusammenfassung . . . . .	625
<b>14</b>	<b>Stromregelverfahren für Drehfeldmaschinen</b>	<b>626</b>
14.1	Regelstrecke und Stellglied der Statorstromregelung . . . . .	626
14.2	Indirekte Verfahren der Statorstromregelung . . . . .	631
14.3	Modulationsverfahren <i>Prof. A. Steimel, Bochum</i> . . . . .	633
14.3.1	Grundfrequenztaktung . . . . .	633
14.3.2	Nichtsynchronisierte („freie“) Pulsweitenmodulation . . . . .	637
14.3.2.1	Sinus-Dreieck-Modulation . . . . .	637
14.3.2.2	Symmetrierte Sinus-Dreieck-Modulation mit Zusatzsignalen .	639
14.3.2.3	Ströme des Wechselrichters bei symmetrierter Sinus-Dreieck- Modulation . . . . .	643
14.3.2.4	Digitale Realisierung der Pulsweitenmodulation . . . . .	644
14.3.3	Diskontinuierliche Taktungen . . . . .	645
14.3.3.1	Flat-Top-Modulation . . . . .	645
14.3.3.2	Übermodulation . . . . .	648
14.3.4	Synchrone Taktungen . . . . .	650

14.3.4.1	Dreifachtaktung . . . . .	651
14.3.4.2	Fünffachtaktung . . . . .	654
14.3.4.3	Siebenfachtaktung . . . . .	657
14.3.4.4	Taktfrequenzbereiche, -wechsel . . . . .	660
14.3.5	WR-Spannungsfehler . . . . .	664
14.4	Optimierte Pulsverfahren . . . . .	667
14.4.1	Spannungsraumzeigermodulation . . . . .	667
14.4.2	On-line optimierte Pulsmustererzeugung . . . . .	669
14.4.3	Raumzeiger-Hystereseverfahren . . . . .	676
14.4.4	Prädiktive Stromregelung mit Schalttablelle . . . . .	686
14.4.5	Dead-Beat-Pulsmustererzeugung . . . . .	693
14.5	Direkte Regelungen <i>Prof. A. Steimel, Bochum</i> . . . . .	700
14.5.1	Direkte Selbstregelung . . . . .	700
14.5.2	Indirekte Statorgrößen-Regelung . . . . .	712
14.5.3	Direct Torque Control . . . . .	714
14.6	Stromregelverfahren für Drehfeldmaschinen <i>Dr.N.Hoffmann, Prof.F.W.Fuchs</i> . . . . .	719
14.6.1	Motivation zur digitalen Stromregelung . . . . .	719
14.6.2	Modellbildung . . . . .	720
14.6.2.1	Stromdynamik eines Stators . . . . .	721
14.6.2.2	Abtastung und Dynamik der Pulsweitenmodulation . . . . .	725
14.6.2.3	Zeitdiskrete Modellierung des abgetasteten Systems . . . . .	731
14.6.3	Klassifizierung der indirekten Regelverfahren . . . . .	736
14.6.4	Stromregelung im rotierenden Koordinatensystem . . . . .	739
14.6.4.1	Grundlegende Auslegungsstrategie . . . . .	740
14.6.4.2	Vernachlässigung der Verkopplungseffekte . . . . .	744
14.6.4.3	Entkopplung der PWM-Verkopplungsdynamiken . . . . .	747
14.6.4.4	Kompensation der Statorstrom-Verkopplungsdynamiken durch Vorsteuerung . . . . .	752
14.6.4.5	PI-basierter Stromregler mit Regelung der Verkopplungsdynamiken . . . . .	757
14.6.4.6	Komplexwertiger Regelungsentwurf durch eine rein zeitdiskrete Betrachtung . . . . .	761
14.6.4.7	Gegenüberstellung der dargestellten Regelungsansätze . . . . .	766
14.6.5	Praktische Aspekte bei der Regelungsimplementierung . . . . .	768
14.6.6	Zusammenfassung . . . . .	770
14.7	Stromzustandsregelung <i>Prof. U. Nuß, Offenburg</i> . . . . .	772
14.7.1	Motivation für den Einsatz eines Zustandsreglers . . . . .	772
14.7.2	Zustandsraumbeschreibung der Statorstromregelstrecke bei Drehstromantrieben . . . . .	773
14.7.2.1	Zustandsdifferentialgleichungen der Statorstromregelstrecke bei der Asynchronkäfigläufermaschine . . . . .	774

14.7.2.2	Zustandsdifferenzialgleichungen der Statorstromregelstrecke bei der permanentmagneterregten Synchronmaschine . . . . .	776
14.7.2.3	Motorartunabhängige Darstellung der Zustandsdifferenzialgleichungen der Statorstromregelstrecke von Asynchronkäfigläufermaschine und permanentmagneterregter Synchronmaschine . . . . .	777
14.7.2.4	Zustandsdifferenzengleichungen der Statorstromregelstrecke von Asynchronkäfigläufermaschine und permanentmagneterregter Synchronmaschine . . . . .	778
14.7.2.5	Einfluss der Rechenzeit auf die Modellbildung . . . . .	783
14.7.3	Entwurf des Statorstromzustandsreglers . . . . .	784
14.7.3.1	Grundsätzliche Überlegungen . . . . .	784
14.7.3.2	Statorstromzustandsreglerentwurf ohne Berücksichtigung einer Rechentotzeit . . . . .	786
14.7.3.3	Statorstromzustandsreglerentwurf unter Berücksichtigung einer Rechentotzeit . . . . .	795
14.7.3.4	Stellgrößenbegrenzung und Statorstromsollwertkorrektur . . . . .	803
14.7.4	Vergleich der Statorstromzustandsregelung mit anderen Stromregelverfahren . . . . .	807
14.8	Drehzahlzustandsregelung <i>Prof. U. Nuß, Offenburg</i> . . . . .	811
14.8.1	Vorbemerkungen . . . . .	811
14.8.2	Erreichbare Dynamik mit klassischen Drehzahlreglern . . . . .	812
14.8.3	Erreichbare Dynamik mit einem Drehzahlzustandsregler . . . . .	820
14.9	Zusammenfassung Statorstrom-Regelungen . . . . .	835
14.10	Polfesselung <i>Dr.C.Heising, Prof.A.Steimel</i> . . . . .	848
14.10.1	Stabilitätsanalyse leistungselektronischer Systeme . . . . .	848
14.10.1.1	Gesteuerter Betrieb mit sinusförmig schwingendem Übersetzungsverhältnis . . . . .	850
14.10.1.2	Geregelter Betrieb . . . . .	852
14.10.2	Der neue Polfesselungs-Ansatz . . . . .	854
14.10.2.1	Beobachter mit Polfesselung (pole-restraining observer) . . . . .	854
14.10.2.2	Regler mit Polfesselung (pole-restraining control) . . . . .	858
14.10.2.2.1	Allgemeine Vorgehensweise . . . . .	859
14.10.2.2.2	Anwendung auf den Vierquadrantsteller . . . . .	861
14.10.3	Anwendung in der Praxis . . . . .	864
14.10.3.1	Vierquadrantsteller für Hochleistungslokomotive 6,4 MW . . . . .	864
14.10.3.2	Mehrgrößenregelung für den Vierquadrantsteller . . . . .	867
14.10.3.2.1	Mehrgrößen-Zustandsregelung . . . . .	869
14.10.3.2.2	Luenberger-Beobachter . . . . .	870
14.10.3.3	Simulationsergebnisse . . . . .	871
14.10.4	Pulsstromrichter am Dreileiternetz (Active Front End) . . . . .	877
14.10.5	Ausblick . . . . .	881

<b>15</b>	<b>Regelung von Drehfeldmaschinen ohne Drehzahlsensor</b>	<b>882</b>
15.1	Einführung . . . . .	882
15.1.1	Prinzipielle Grundgleichungen . . . . .	888
15.2	Grundlegendes nichtadaptives Verfahren . . . . .	891
15.3	Nichtadaptive Verfahren: Statorspannungsgleichungen . . . . .	895
15.4	Nichtadaptive Verfahren: Flußgleichungen . . . . .	899
15.5	Nichtadaptive Verfahren: Sollgrößenansatz . . . . .	901
15.6	Direkte Schätzung der Rotordrehzahl . . . . .	903
15.7	Adaptive Verfahren . . . . .	908
15.7.1	MRAS-Verfahren . . . . .	914
15.7.2	Problematik bei tiefen Frequenzen . . . . .	916
15.7.3	MRAS-Verfahren: EMK-Berechnung . . . . .	919
15.7.4	MRAS-Verfahren: Flußberechnung . . . . .	920
15.7.5	MRAS-Verfahren, basierend auf Blindleistungsberechnung . . . . .	922
15.7.6	Verfahren mittels Zustandsschätzung . . . . .	923
15.7.6.1	Verfahren auf Basis eines Luenberger-Beobachters . . . . .	924
15.7.6.2	Verfahren auf Basis eines Kalman-Filters . . . . .	933
15.8	Schätzverfahren mit neuronalen Netzen . . . . .	937
15.9	Auswertung von Harmonischen . . . . .	940
15.10	Anisotropie-basierte Schätzung der Rotorlage <i>Dr. P. Landsmann, München</i> . . . . .	943
15.10.1	Analytische Betrachtung der Anisotropie einer Induktivität . . . . .	943
15.10.2	Verfahren zur Identifikation der Anisotropie . . . . .	947
15.10.2.1	INFORM . . . . .	948
15.10.2.2	Rotierende Injektion . . . . .	951
15.10.2.3	Alternierende Injektion . . . . .	955
15.10.2.4	Beliebige Injektion . . . . .	958
15.10.3	Zusammenhang zwischen Anisotropie und Rotorlage . . . . .	962
15.10.3.1	Winkelkorrektur . . . . .	964
15.10.3.2	Kompensation von Oberwellen . . . . .	966
15.10.3.3	Mehrdimensionale Ausnutzung von Oberwellen . . . . .	968
15.10.4	Initiale Bestimmung der Polarität . . . . .	972
15.11	Zusammenfassung sensorlose Drehfeldantriebe . . . . .	974
<b>16</b>	<b>Synchronmaschine</b>	<b>985</b>
16.1	Synchron-Schenkelpolmaschine ohne Dämpferwicklung . . . . .	986
16.1.1	Beschreibendes Gleichungssystem . . . . .	986
16.1.2	Synchron-Schenkelpolmaschine in normierter Darstellung . . . . .	991
16.1.3	Signalflußplan bei Spannungseinprägung . . . . .	997
16.1.4	Signalflußplan bei Stromeinprägung . . . . .	999
16.1.5	Ersatzschaltbild der Synchron-Schenkelpolmaschine . . . . .	1002
16.2	Synchron-Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung . . . . .	1004
16.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalflußplan . . . . .	1004

16.2.2	Ersatzschaltbild der Schenkelpolmaschine mit Dämpferwicklung	1006
16.3	Synchron-Vollpolmaschine . . . . .	1010
16.3.1	Beschreibendes Gleichungssystem und Signalfußpläne . . . . .	1010
16.3.2	Ersatzschaltbild der Synchron-Vollpolmaschine . . . . .	1014
16.3.3	Feldorientierte Darstellung der Synchron-Vollpolmaschine mit Dämpferwicklung . . . . .	1020
16.3.4	Steuerbedingungen der Vollpolmaschine ohne Dämpferwicklung	1029
16.4	Regelung der Synchronmaschine durch Entkopplung . . . . .	1030
16.5	Regelung der SM durch Feldorientierung <i>Dr. F. Bauer, Erlangen</i> . . . . .	1040
16.5.1	Modelle zur Flußermittlung . . . . .	1041
16.5.2	Spannungsmodell ( $U_1 I_1$ -Modell) . . . . .	1041
16.5.2.1	Spannungsmodell als Wechselgrößenmodell . . . . .	1042
16.5.2.2	Polares Spannungsmodell . . . . .	1044
16.5.2.3	Spannungsmodell als Gleichgrößenmodell . . . . .	1045
16.5.2.4	Strommodell der Schenkelpolmaschine . . . . .	1048
16.5.3	Regelung der Synchronmaschine . . . . .	1050
16.5.3.1	Berechnung des Erregerstroms mit dem Strommodell . . . . .	1051
16.5.4	Ablösung verschiedener Modelle . . . . .	1056
16.5.5	Flußregelung . . . . .	1063
16.5.6	Flußführung im Feldschwächbereich . . . . .	1064
16.5.7	Steuerung des $\cos \varphi$ der fremderregten Synchronmaschine . . . . .	1065
16.6	Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PM-Maschine) . . . . .	1069
16.6.1	Signalfußplan der PM-Maschine . . . . .	1069
16.6.2	Regelung der PM-Maschine ohne Reluktanzeinflüsse . . . . .	1075
16.6.3	Rechteckförmige Stromeinprägung ohne Reluktanzeinflüsse . . . . .	1078
16.6.4	Vergleich der sinus- und rechteckförmig gespeisten PM-Maschine	1082
16.6.5	Feldschwächbereich der PM-Maschine . . . . .	1083
16.7	PM-Maschine mit Reluktanzeinflüssen . . . . .	1091
16.7.1	Maximales Moment pro Ampere . . . . .	1095
16.7.2	Verlustminimierung . . . . .	1100
16.7.3	Maximales Moment pro Volt . . . . .	1105
16.7.4	Feldschwächung unter Strom- und Spannungsbegrenzung . . . . .	1107
16.7.5	Zusammenfassung der Steuerverfahren . . . . .	1108
16.7.6	Einbindung in ein Antriebssystem . . . . .	1117
16.7.7	Feldschwächregelung mit Rückkopplung . . . . .	1120
16.7.8	Hybride Feldschwächregelungsstruktur . . . . .	1120

## 17 Geschaltete Reluktanzmaschine

*Prof. R. de Donker, Aachen* 1124

17.1	Funktionsweise und Aufbau . . . . .	1124
17.2	Grundgleichungen . . . . .	1128
17.2.1	Spannungsgleichung . . . . .	1128

17.2.2	Drehmomentengleichung und Energiebilanz . . . . .	1129
17.2.3	Einfluss der Sättigung . . . . .	1134
17.3	Umrichterschaltungen . . . . .	1135
17.4	Antriebskonfigurationen . . . . .	1136
17.5	Steuerung und Regelung . . . . .	1140
17.5.1	Drehzahlregelung . . . . .	1140
17.5.2	Drehmomentregelung . . . . .	1140
17.5.3	Sensorlose Regelung . . . . .	1143
17.6	Ansätze und Methoden zur Optimierung . . . . .	1144
17.6.1	Minimierte Zwischenkreiskapazität . . . . .	1144
17.6.2	Akustische Analyse . . . . .	1145
17.6.3	Verlustmodellierung . . . . .	1147
17.6.4	Modellierung mithilfe von Reluktanz-Netzwerken . . . . .	1148
<b>18</b>	<b>Identifikation linearer dynamischer Systeme</b>	<b>1150</b>
18.1	Grundlagen der Identifikation . . . . .	1151
18.1.1	Parametrische und nichtparametrische Identifikationsverfahren	1151
18.1.2	Identifikation . . . . .	1152
18.2	Lineare dynamische Modellstrukturen . . . . .	1153
18.2.1	Modelle mit Ausgangsrückkopplung . . . . .	1156
18.2.1.1	Autoregressive with Exogenous Input Model . . . . .	1156
18.2.1.2	Output Error Model . . . . .	1158
18.2.2	Modelle ohne Ausgangsrückkopplung . . . . .	1160
18.2.2.1	Finite Impulse Response Model . . . . .	1161
18.2.2.2	Orthonormal Basis Function Model . . . . .	1163
18.3	Identifikationsbeispiele . . . . .	1168
18.3.1	ARX-Modell . . . . .	1168
18.3.2	OE-Modell . . . . .	1173
18.3.3	FIR-Modell . . . . .	1173
18.3.4	OBF-Modell . . . . .	1175
18.4	Lerngesetz: Least-Squares-Verfahren . . . . .	1179
18.4.1	Nichtrekursiver Least-Squares-Algorithmus (LS) . . . . .	1179
18.4.2	Rekursiver Least-Squares-Algorithmus (RLS) . . . . .	1182
18.5	Gradientenabstiegsverfahren . . . . .	1185
18.6	Zusammenfassung . . . . .	1187
<b>19</b>	<b>Drehzahlregelung bei elastischer Verbindung zur Arbeitsmaschine</b>	<b>1188</b>
19.1	Regelung der Arbeitsmaschinendrehzahl . . . . .	1190
19.1.1	Streckenübertragungsfunktion $G_{S1}(s)$ . . . . .	1190
19.1.2	Analyse der Übertragungsfunktion $G_{S1}(s)$ . . . . .	1192
19.1.3	Einfluß der elastischen Kopplung auf den Drehzahlregelkreis .	1193
19.2	Regelung der Antriebsmaschinendrehzahl . . . . .	1196

19.2.1	Streckenübertragungsfunktion $G_{S2}(s)$ . . . . .	1196
19.2.2	Analyse der Übertragungsfunktion $G_{S2}(s)$ . . . . .	1196
19.2.3	Einfluß der elastischen Kopplung auf den Drehzahlregelkreis .	1198
19.2.4	Simulative Untersuchung der Arbeitsmaschinendrehzahl . . .	1201
19.2.5	Bewertung der konventionellen Kaskadenregelung . . . . .	1205
19.3	Zustandsregelung des Zweimassensystems . . . . .	1206
19.3.1	Zustandsdarstellung . . . . .	1206
19.3.2	Zustandsregelung ohne I-Anteil . . . . .	1208
19.3.3	Auslegung einer Zustandsregelung nach dem Dämpfungsoptimum . . . . .	1211
19.3.4	Zustandsregelung mit I-Anteil . . . . .	1216
19.4	Verallgemeinerung: Mehrmassensysteme . . . . .	1220
19.5	Nichtlineare Systeme — Intelligente Strategien . . . . .	1227
19.6	Abschließende Überlegungen . . . . .	1235
<b>20</b>	<b>Schwingungsdämpfung</b>	<b>1237</b>
20.1	Allgemeine Problemstellung . . . . .	1237
20.2	Local Absorption of Vibrations <i>Dr. D. Filipović, München</i> . . . . .	1244
20.2.1	Introduction . . . . .	1244
20.2.2	Resonant Absorbers: Linear Active Resonator (LAR) . . . .	1245
20.2.2.1	Design of the LAR . . . . .	1246
20.2.2.1.1	Stability Analysis of the Combined System . . . . .	1249
20.2.2.1.2	Degree-of-stability Analysis . . . . .	1252
20.2.2.2	Single-mass Multi-frequency Resonator . . . . .	1252
20.2.2.3	Comments . . . . .	1256
20.2.3	Absorbers with Local Feedback in Multi-mass Systems . . .	1258
20.2.3.1	Analysis of the Primary System . . . . .	1260
20.2.3.2	Combined System with the Absorber . . . . .	1263
20.2.3.2.1	Stability Analysis of the Multi-mass System . . . . .	1268
20.2.3.3	Related Problems . . . . .	1269
20.2.3.3.1	Vibration Isolation . . . . .	1269
20.2.3.3.2	Support Excitation . . . . .	1270
20.2.3.4	Verification of Results . . . . .	1270
20.2.3.5	Comments . . . . .	1277
20.2.4	Bandpass Absorber (BPA) . . . . .	1278
20.2.4.1	Concept of the BPA . . . . .	1279
20.2.4.2	A Case Study: Paper Mill Vibrations . . . . .	1283
20.2.4.3	Simulation Results of the Paper Mill Model . . . . .	1286
20.2.4.3.1	Disturbance frequency sweep . . . . .	1286
20.2.4.3.2	Random vibrations . . . . .	1287
20.2.4.4	Comments . . . . .	1288
20.2.5	Conclusion . . . . .	1289

**21 Objektorientierte Modellierung v. Antriebssystemen***Prof. M. Otter, Gilching*

1292

21.1	Modulare Signalflusspläne . . . . .	1294
21.2	Objektdiagramme . . . . .	1301
21.3	Ein vollständiges Beispiel . . . . .	1305
21.4	Modelica — Kontinuierliche Systeme . . . . .	1310
21.5	Modelica — Komponenten-Schnittstellen . . . . .	1320
21.6	Modelica — Modellierung elektrischer Maschinen A. Haumer, Ch. Kral . . . . .	1327
21.6.1	Ungeregelte elektrische Maschinen . . . . .	1328
21.6.2	Geregelte elektrische Antriebe . . . . .	1334
21.7	Transformationsalgorithmen . . . . .	1344
21.7.1	Reguläre Deskriptorsysteme . . . . .	1344
21.7.2	Singuläre Deskriptorsysteme . . . . .	1351
21.7.3	Strukturell inkonsistente Deskriptorsysteme . . . . .	1358
21.8	Lineare Deskriptorsysteme . . . . .	1360
21.9	Modelica — Hybride Systeme . . . . .	1368
21.10	Modelica — Strukturvariable Systeme . . . . .	1382
21.10.1	Ideale elektrische Schaltelemente . . . . .	1382
21.10.2	Coulomb-Reibung . . . . .	1389
21.10.3	Reibungsbehaftete Komponenten . . . . .	1398

**22 Modellierung u. Regelung kont. Fertigungsanlagen***Dr. W. Wolfermann, München*

1412

22.1	Einführung . . . . .	1412
22.2	Modellierung des Systems . . . . .	1413
22.2.1	Technologisches System . . . . .	1413
22.2.1.1	Stoffbahn . . . . .	1414
22.2.1.2	Linearisierung . . . . .	1420
22.2.1.3	Verhalten der Mechanik . . . . .	1421
22.2.2	Elektrische Antriebe . . . . .	1422
22.2.3	Linearer Signalfußplan des Gesamtsystems . . . . .	1422
22.3	Systemanalyse . . . . .	1423
22.3.1	Regelbarkeit der Bahnkräfte . . . . .	1424
22.3.2	Stillstand der Maschine . . . . .	1425
22.3.3	Dynamik des unregelmäßigen Teilsystems . . . . .	1425
22.4	Drehzahlregelung mit PI-Reglern in Kaskadenstruktur . . . . .	1428
22.4.1	Nicht schwingfähiges unregelmäßiges System . . . . .	1429
22.4.2	Schwingfähiges unregelmäßiges System . . . . .	1430
22.4.2.1	Regelung ohne Entkopplung . . . . .	1430
22.4.2.2	Regelung mit Entkopplung . . . . .	1431
22.5	Bahnkraftregelung mit PI-Reglern . . . . .	1433
22.6	Registerfehler bei Rotationsdruckmaschinen . . . . .	1436

22.6.1	Einführung . . . . .	1436
22.6.2	Ableitung des Registerfehlers . . . . .	1438
22.6.3	Linearisierung des Registerfehlers . . . . .	1439
22.6.4	Zusammenhang der Registerfehler aufeinanderfolgender Druckwerke . . . . .	1440
22.6.5	Linearisierter Signalflußplan . . . . .	1441
22.6.6	Dynamisches Verhalten des Registerfehlers . . . . .	1441
22.6.6.1	Druckmaschine mit Drehzahlregelung . . . . .	1442
22.6.6.2	Druckmaschine mit Winkelregelung . . . . .	1445
22.6.6.3	Druckmaschine mit Registerfehlerregelung . . . . .	1445
22.7	Zustandsregelung des Gesamtsystems . . . . .	1446
22.8	Dezentrale Regelung . . . . .	1448
22.8.1	Regelung des isolierten Teilsystems . . . . .	1448
22.8.2	Dezentrale Entkopplung . . . . .	1452
22.8.2.1	Grundlagen des Verfahrens . . . . .	1452
22.8.2.2	Mathematische Beschreibung . . . . .	1453
22.8.2.3	Modaltransformation des Teilsystems . . . . .	1454
22.8.2.4	Berechnung der Rückführkoeffizienten . . . . .	1454
22.8.2.5	Algorithmus . . . . .	1455
22.8.2.6	Beispiel . . . . .	1455
22.9	Beobachter . . . . .	1458
22.9.1	Zentrale Beobachter . . . . .	1458
22.9.2	Dezentrale Beobachter . . . . .	1459
22.9.2.1	Allgemeines . . . . .	1459
22.9.2.2	Approximation durch Störmodelle . . . . .	1460
22.9.2.3	Beispiel: Dezentraler Beobachter für zwei Teilsysteme . . . .	1462
22.9.2.4	Parameteränderungen . . . . .	1465
22.9.2.5	Informationsaustausch zwischen den Teilbeobachtern . . . .	1467
22.9.2.6	Zustandsregelung mit dezentralen Beobachtern . . . . .	1469
22.9.2.7	Beinflussung von dezentralen Reglern und Beobachtern . . . .	1469
22.10	Zusammenfassung . . . . .	1470

## 23 Prozessmodelle für Rotationsdruckmaschinen

*Prof. Dr.-Ing. G.Brandenburg* 1472

23.1	Kräfte, Spannungen und Dehnungen in der Bahn . . . . .	1474
23.1.1	Funktionsweise einer Rollen-Offsetdruckmaschine . . . . .	1474
23.1.2	Kräfte, Spannungen und Dehnungen . . . . .	1475
23.2	Farbregisterfehler und Dublieren . . . . .	1483
23.2.1	Druckwerksaufbau Farbübertragung . . . . .	1483
23.2.2	Dublieren innerhalb eines Druckwerks . . . . .	1484
23.2.3	Dublieren zwischen zwei Druckwerken . . . . .	1484
23.3	Teil-Schnittregisterfehler . . . . .	1489
23.3.1	Problemstellung . . . . .	1489

23.3.2	Mathematisches Modell . . . . .	1492
23.4	Vergleich des Gesamt-Schnittregisterfehlers mit dem Teil-Schnittregisterfehler . . . . .	1493
23.4.1	Gesamt-Schnittregisterfehler . . . . .	1493
23.4.2	Teil-Schnittregisterfehler . . . . .	1494
23.5	Rekonstruktion von Transportstörungen . . . . .	1496
23.5.1	Allgemeine Beziehungen . . . . .	1496
23.5.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	1497
23.6	Walzen mit Gleitschlupf . . . . .	1498
23.7	Walzen mit Partialschlupf und das q-Modell . . . . .	1501
23.7.1	System . . . . .	1501
23.7.2	Das stationäre q-Modell . . . . .	1502
23.7.2.1	Das rekursive, stationäre q-Modell . . . . .	1503
23.7.2.2	Das nichtrekursive stationäre q-Modell . . . . .	1504
23.7.3	Das dynamische q-Modell . . . . .	1505
23.7.3.1	Das dynamische q-Modell für Geschwindigkeit und Dehnung . . . . .	1505
23.7.3.2	Das dynamisches q-Modell der Schnittregisterfehler . . . . .	1507
23.7.4	Bewertung des q-Modells . . . . .	1510
23.8	Kaskadenregelungen des Schnittregisterfehlers . . . . .	1511
23.8.1	Regelung eines Teil-Schnittregisterfehlers . . . . .	1511
23.8.2	Zweigrößenregelung von Bahnzugkraft und Schnittregisterfehlern	1512
23.8.2.1	Verhalten der Druckmaschine . . . . .	1512
23.8.2.2	Entwurf der Zweigrößen-Regelung . . . . .	1515
23.8.2.3	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	1516
23.8.2.4	Erweiterungen der Regelung . . . . .	1520
23.9	Einfluss der Viskoelastizität, fortgeschrittene Regelungen und Lateralverhalten . . . . .	1520
23.9.1	Viskoelastizität . . . . .	1520
23.9.2	Fortgeschrittene Regelungen . . . . .	1521
23.9.3	Lateralverhalten elastischer Bahnen . . . . .	1521
23.10	Anhang 1: Ableitung des Teil-Schnittregisterfehlers . . . . .	1524
23.10.1	Anhang 1.1: Druckzeitpunkt von Formzylinder 1 . . . . .	1524
23.10.2	Anhang 1.2: Längenbilanz . . . . .	1525
23.10.3	Anhang 1.3: Massenbilanz . . . . .	1525
23.10.4	Anhang 1.4: Linearisierung der Längenbilanz . . . . .	1526
23.10.5	Anhang 1.5: Linearisierung der Massenbilanz . . . . .	1530
23.10.6	Anhang 1.6: Linearisierung des Druckzeitpunkts . . . . .	1530
23.10.7	Anhang 1.7: Formulierung der Systemgleichungen bei Messung des Registerfehlers am Ort der Klemmstelle 2 . . . . .	1530
23.10.8	Anhang 1.8: Übergang auf eine neue Zeitkoordinate . . . . .	1531
23.10.9	Anhang 1.9: Laplace-Transformation der linearisierten Systemgleichungen . . . . .	1533
23.10.10	Anhang 1.10: Teil-Schnittregisterfehler . . . . .	1533
23.11	Anhang 2: Ableitung des dynamischen q-Modells . . . . .	1534

23.12	Anhang 3: Optimierung der Zweigrößenregelung . . . . .	1536
23.12.1	Anhang 3.1: Regelstrecke . . . . .	1536
23.12.2	Anhang 3.2: Regelkreis 1 . . . . .	1537
23.12.3	Anhang 3.3: Regelkreis 2 . . . . .	1539
23.12.4	Anhang 3.4: Resultierende Struktur . . . . .	1539
<b>24</b>	<b>Modellierung &amp; Regelung von Windkraftanlagen</b>	
	<i>Dr. C. Hackl et. al., München</i>	1540
24.1	Motivation und Einleitung . . . . .	1540
24.1.1	Windenergie: Hoffnungsträger der Energiewende . . . . .	1541
24.1.2	Moderne Windkraftanlagen . . . . .	1541
24.1.2.1	Funktionsprinzip . . . . .	1541
24.1.2.2	Energie und Leistung des Windes . . . . .	1542
24.1.2.3	Maximal mögliche Leistungsentnahme: Der Betz-Faktor . . .	1543
24.1.2.4	Kernkomponenten . . . . .	1546
24.1.2.5	Anlagenregelung, Betriebsführung und Betriebsbereiche . . .	1547
24.2	Nomenklatur und Grundlagen . . . . .	1549
24.2.1	Elektrische Dreiphasensysteme . . . . .	1549
24.2.1.1	Symmetrisches Dreiphasensystem . . . . .	1550
24.2.1.2	Zusammenhang zwischen Phasen- und verketteten Größen . .	1551
24.2.1.3	Raumzeigerdarstellung in Vektor-/Matrixschreibweise . . . .	1552
24.2.2	Leistungsberechnung . . . . .	1555
24.2.2.1	Momentanleistung . . . . .	1556
24.2.2.2	Wirk-, Blind- und Scheinleistung . . . . .	1557
24.2.2.3	Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Raumzeigern . . . . .	1558
24.3	Modellierung von Windkraftanlagen . . . . .	1559
24.3.1	Turbine . . . . .	1559
24.3.1.1	Turbinenleistung . . . . .	1560
24.3.1.2	Approximation des Leistungsbeiwerts . . . . .	1561
24.3.1.3	Turbinenmoment . . . . .	1563
24.3.2	Getriebe . . . . .	1564
24.3.3	Elektrisches Netzwerk . . . . .	1566
24.3.4	Elektrische Maschine (Generator) . . . . .	1567
24.3.5	Point of Common Coupling (PCC), Trafo und Netz . . . . .	1567
24.3.6	Filter . . . . .	1568
24.3.7	Back-to-Back Converter . . . . .	1569
24.3.7.1	Schaltvektor, Spannungsvektoren und Spannungshexagon . .	1569
24.3.7.2	Spannungszwischenkreis . . . . .	1570
24.3.7.3	Verkettete Spannungen und Ströme im Zwischenkreis . . . . .	1571
24.3.7.4	Verzögerung der Spannungserzeugung . . . . .	1571
24.3.7.5	Zusammenhang zwischen verketteten Spannungen und Spannungen im statorfesten Koordinatensystem . . . . .	1571
24.4	Steuerung und Regelung von Windkraftanlagen . . . . .	1572
24.4.1	Netzseitige Stromregelung . . . . .	1572

24.4.1.1	Spannungsorientierung durch Phase-Locked Loop (PLL) . . .	1573
24.4.1.2	Netzseitiges Netzwerk in Spannungsorientierung . . . . .	1575
24.4.1.3	Kompensation der netzseitigen Störterme . . . . .	1576
24.4.1.4	Auslegung der netzseitigen Stromregelung . . . . .	1578
24.4.2	Generatorseitige Stromregelung und Momentenbildung . . . .	1579
24.4.2.1	Flussorientierung . . . . .	1579
24.4.2.2	Maschinenseitiges Netzwerk in Flussorientierung . . . . .	1580
24.4.2.3	Kompensation der maschinenseitigen Störterme . . . . .	1581
24.4.2.4	Auslegung der maschinenseitigen Stromregelung . . . . .	1581
24.4.2.5	Momentenbildung und approximierte Momentendynamik . .	1583
24.4.3	Regelung der Generatordrehzahl (bzw. der Schnellaufzahl) .	1584
24.4.3.1	Regelziel . . . . .	1585
24.4.3.2	Umschreiben der nichtlinearen Mechanik . . . . .	1586
24.4.3.3	Nichtlinearer Reglerentwurf . . . . .	1587
24.4.3.4	Regelkreisanalyse und -verhalten . . . . .	1587
24.4.4	Regelung der Zwischenkreisspannung . . . . .	1589
24.4.4.1	Nichtlineares Modell . . . . .	1591
24.4.4.2	Regelziel . . . . .	1592
24.4.4.3	Linearisierung im Arbeitspunkt . . . . .	1592
24.4.4.4	Führungs- und Störverhalten des linearisierten Systems . .	1594
24.4.4.5	Analyse der linearisierten strukturvarianten Strecke . . . . .	1596
24.4.4.6	Wurzelortskurve des linearisierten Regelkreises . . . . .	1597
24.4.4.7	Stabilitätsanalyse nach Hurwitz . . . . .	1598
24.4.5	Steuerung des Leistungsflusses (in Betriebsbereich II) . . . .	1600
24.4.5.1	Übergeordnete Ziele der Betriebsführung . . . . .	1600
24.4.5.2	Leistungsfluss in Windkraftanlagen . . . . .	1600
24.4.5.3	Leistungsbilanz (stationäre Leistungsbetrachtung) . . . . .	1603
24.4.5.4	Wirk- & Blindleistung am Point of Common Coupling (PCC)	1605
24.4.5.5	Auswirkungen der Anlagenregelung auf den Leistungsfluss . .	1606
24.5	Simulation der Gesamtanlage . . . . .	1607
24.5.1	Implementierung des geregelten Gesamtsystems . . . . .	1607
24.5.1.1	Windkraftanlage . . . . .	1607
24.5.1.2	Regelung . . . . .	1608
24.5.1.3	Winddaten . . . . .	1608
24.5.1.4	Simulations-, Modell- und Reglerparameter . . . . .	1608
24.5.2	Dikussion der Simulationsergebnisse . . . . .	1610
24.5.2.1	Wind, Leistungsernte und Drehzahlregelung . . . . .	1610
24.5.2.2	Turbinenleistung und Momenten-/Stromregelung . . . . .	1610
24.5.2.3	Blindleistungssteuerung & Spannungszwischenkreisregelung .	1612
<b>25</b>	<b>Dynamische Reibungsmodellierung</b>	
	<i>Dr. C. Hackl, München</i>	1615
25.1	Motivation . . . . .	1615
25.1.1	Modellierung starrer und elastischer Antriebssysteme . . . .	1617

25.1.1.1	Ein-Massen-System (1MS) . . . . .	1618
25.1.1.2	Zwei-Massen-System (2MS) . . . . .	1619
25.1.2	Beispielhafte Parameter und Reibkennlinien eines antriebstechnischen Laboraufbaus . . . . .	1620
25.1.3	Kernfrage: Wie kann Reibung modelliert werden? . . . . .	1624
25.2	Reibungsmodellierung . . . . .	1624
25.2.1	Erkenntnisse aus der Tribologie . . . . .	1625
25.2.2	Statische Reibungsmodellierung . . . . .	1629
25.2.3	Dynamische Reibungsmodellierung: Das LuGre Reibmodell . . . . .	1632
25.2.3.1	Das allgemeine Lund-Grenoble Reibmodell . . . . .	1633
25.2.3.2	Das vereinfachte Lund-Grenoble Reibmodell mit linearer viskoser Reibung . . . . .	1635
25.2.4	Darstellbare Reibeffekte mithilfe des LuGre Reibmodells . . . . .	1636
25.2.5	Systemtheoretische Untersuchung des LuGre Reibmodells . . . . .	1642
25.3	Konsequenzen der dynamischen Reibungsmodellierung . . . . .	1646
25.3.1	Stetigkeit des dynamischen Reibmodells . . . . .	1646
25.3.2	Umrechnen zwischen motor- und lastseitiger Reibung . . . . .	1648
25.3.3	Starre und elastische Antriebssysteme mit LuGre Reibung . . . . .	1650
25.4	Regelung von Antriebssystemen mit dynamischer Reibung . . . . .	1651
25.4.1	Einprägen von zusätzlichem Rauschen (engl. dither signals) . . . . .	1652
25.4.2	Hohe Reglerverstärkungen . . . . .	1653
25.4.3	Reibungsidentifikation und -kompensation . . . . .	1654
25.5	Fazit . . . . .	1656

<b>26</b>	<b>POD zur Optimalsteuerung</b>	
	<i>Prof. S. Volkwein, Konstanz</i>	1658

26.1	Einleitung . . . . .	1658
26.2	POD am Beispiel der Wärmeleitungsgleichung . . . . .	1661
26.2.1	Die schwache Formulierung . . . . .	1661
26.2.2	Die Finite-Elemente-Methode . . . . .	1665
26.2.3	Die POD-Methode . . . . .	1668
26.2.4	Das reduzierte Modell . . . . .	1673
26.3	Das quadratische Optimalsteuerproblem . . . . .	1677
26.3.1	Das Optimalsteuerproblem . . . . .	1677
26.3.2	Die Diskretisierung des Optimalitätssystems . . . . .	1679
26.3.3	Die POD-Galerkin-Approximation des Optimalitätssystems . . . . .	1682
26.4	Literaturhinweise auf numerische Tests . . . . .	1684

<b>Variablenübersicht</b>	1685
---------------------------	------

Variablenübersicht zu Kapitel 23 . . . . .	1703
Allgemeine Bemerkungen . . . . .	1703
Formelzeichen und Abkürzungen . . . . .	1703
Variablenübersicht zu Kapitel 25 . . . . .	1705

<b>Literaturverzeichnis</b>	1706
Grundlagen . . . . .	1706
Stellbegrenzungen in Regelkreisen . . . . .	1714
Antriebstechnik und benachbarte Gebiete . . . . .	1715
Netzgeführte Stromrichter: Regelung . . . . .	1716
Direktumrichter . . . . .	1722
Untersynchrone Kaskade (USK) . . . . .	1724
Stromrichtermotor . . . . .	1725
Stromzwischenkreis-Umrichter (I-Umrichter) . . . . .	1728
Spannungszwischenkreis-Umrichter (U-Umrichter) . . . . .	1730
Regelung von Asynchron- und Synchronmaschine . . . . .	1732
Motoridentifikation . . . . .	1744
Indirekte Verfahren der Statorstromregelung . . . . .	1749
Stromzustandsregelung, Drehzahlzustandsregelung . . . . .	1756
Direkte Selbstregelung von Drehfeldmaschinen . . . . .	1758
Polfesselung, PRC . . . . .	1761
Geberlose Regelungen von Drehfeldmaschinen . . . . .	1764
Reluktanzmaschine . . . . .	1788
Geschaltete Reluktanzmaschine . . . . .	1793
Geschaltete Reluktanzmaschine: Auslegung und Regelung . . . . .	1797
Geschaltete Reluktanzmaschine: Optimierter Betrieb . . . . .	1801
Geschaltete Reluktanzmaschine: Geberloser Betrieb . . . . .	1802
Reluktanzmaschine: Synchron-Reluktanzmotor . . . . .	1805
Identifikation linearer dynamischer Systeme . . . . .	1809
Systemintegration elektrischer Antriebe . . . . .	1811
Schwingungsdämpfung . . . . .	1812
Objektorientierte Modellierung, Deskriptorsysteme . . . . .	1815
Kontinuierliche Fertigungsanlagen . . . . .	1824
Fortgeschrittene Prozessmodelle und Regelungsverfahren für Rollen- Rotationsdruckmaschinen . . . . .	1826
Modellierung und Regelung von Windkraftanlagen . . . . .	1834
Dynamische Reibungsmodellierung . . . . .	1837
Proper Orthogonal Decomposition, POD . . . . .	1846
<b>Stichwortverzeichnis</b>	1858

Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen

Schröder, D.

2015, XXXII, 1879 S. 200 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-642-30095-0