

Inhaltsverzeichnis

1	Regelungstechnische Grundbegriffe und Grundregeln	1
1.1	Gegenüberstellung von Steuerung und Regelung	1
1.2	Beschreibung des dynamischen Verhaltens durch Signalflusspläne	6
1.3	Frequenzgang	10
1.3.1	Ortskurvendarstellung in rechtwinkligen Koordinaten	13
1.3.2	Frequenzkennlinien, Bode-Diagramm	15
1.4	Rechenregeln, Umwandlungsregeln, Signalflussplan	22
1.5	Führungs- und Störungsübertragungsfunktion	26
2	Stabilisierung und Optimierung von Regelkreisen	28
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
3	Standard-Optimierungsverfahren	46
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 Optimums	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

4	Verallgemeinerte Optimierungsverfahren	88
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
5	Regelkreisstrukturen	117
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 ₁ -Strecke	130
5.4.4	Beispiel: Nachlaufregelung mit zwei P-T ₁ -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
6	Abtastsysteme	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 nichtsynchrone 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
7	Regelung der Gleichstrommaschine	261
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
8	Fehlereinflüsse und Genauigkeit bei geregelten Systemen	313
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 Drehzahlerfassung	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, stör sichere Signalübertragung und Störschutzmaßnahmen	353
8.7.1	Oberschwingungen, EMV und Normen	353
8.7.2	Störsichere analoge Signalübertragung	355
8.7.3	Störschutzmaßnahmen	356
9	Netzgeführte Stromrichter	359
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
10	Untersuchung von Regelkreisen mit Stromrichtern mit der Abtasttheorie	394
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

11	Beschreibungsfunktion des Stromrichters mit natürlicher Kommutierung	425
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
12	Vergleich verschiedener Approximationen für netzgeführte Stromrichter	441
12.1	Ermittlung von $G_1(z, m)$, 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
13	Asynchronmaschine	461
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	Signalfusspläne der Asynchronmaschine im Koordinatensystem K	472
13.2.1	Beschreibendes Gleichungssystem	473
13.2.2	Verallgemeinerter Signalfussplan der spannungsgesteuerten Asynchronmaschine	487
13.2.3	Signalfussplan 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	Signalfussplan bei Statorflussorientierung	498
13.3.2	Signalfussplan bei Rotorflussorientierung	499
13.3.3	Signalfussplan 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
14	Stromregelverfahren für Drehfeldmaschinen	626
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	Nichtsynchrone („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 Schalttabelle	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 Verkopplungsdyn- amiken	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	Zustandsdifferenzialgleichungen 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	Zustandsdifferenzialgleichungen 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

15	Regelung von Drehfeldmaschinen ohne Drehzahlsensor	882
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
16	Synchronmaschine	985
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 Signalflußpläne	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	Signalflußplan 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	
	<i>Prof. R. de Donker, Aachen</i>	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
18	Identifikation linearer dynamischer Systeme	1150
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
19	Drehzahlregelung bei elastischer Verbindung zur Arbeitsmaschine	1188
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
20	Schwingungsdämpfung	1237
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	1292
	<i>Prof. M. Otter, Gilching</i>	
21.1	Modulare Signalfusspläne	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 <i>A. Haumer, Ch. Kral</i>	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	1412
	<i>Dr. W. Wolfermann, München</i>	
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 unregulierten Teilsystems	1425
22.4	Drehzahlregelung mit PI-Reglern in Kaskadenstruktur	1428
22.4.1	Nicht schwingfähiges unreguliertes System	1429
22.4.2	Schwingfähiges unreguliertes 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 1472
Prof. Dr.-Ing. G.Brandenburg

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 Schnittregisterfehler n1512	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
24	Modellierung & Regelung von Windkraftanlagen	
	<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 Generator Drehzahl (bzw. der Schnelllaufzahl) .	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
25	Dynamische Reibungsmodellierung	
	<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
26 POD zur Optimalsteuerung		
	<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
Variablenübersicht		
		1685
Variablenübersicht zu Kapitel 23		1703
Allgemeine Bemerkungen		1703
Formelzeichen und Abkürzungen		1703
Variablenübersicht zu Kapitel 25		1705

Literaturverzeichnis	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
Stichwortverzeichnis	1858