



Edition
Harri 
Deutsch 

Taschenbuch der Regelungstechnik

mit MATLAB und Simulink

von

Prof. Dr.-Ing. Holger Lutz

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wendt

10., ergänzte Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 56788

Autoren:

Dr.-Ing. Holger Lutz, geb. Sinning, Elektromechanikerlehre in einer Firma für Steuer- und Regelungsanlagen, Studium an der Ingenieurschule Kassel zum Ing. grad., nach Berufstätigkeit als graduierter Ingenieur Studium der Elektrotechnik und Regelungstechnik an der TU Berlin zum Dipl.-Ing., Berufstätigkeit, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin im Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Promotion über die Steuerung und Regelung der Bewegungsachsen von Industrierobotern. Mitinhaber eines Ingenieurbüros, danach Professor an der University of Applied Sciences Technische Hochschule Mittelhessen für das Fachgebiet Steuer- und Regelungstechnik im Fachbereich Informationstechnik – Elektrotechnik – Mechatronik.



THM

CAMPUS FRIEDBERG

IEM

Informationstechnik-
Elektrotechnik-Mechatronik

TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

Professor Dr.-Ing. Holger Lutz
Technische Hochschule Mittelhessen
61169 Friedberg

Dr.-Ing. Wolfgang Wendt, Elektromechanikerlehre in einer Firma für steuerungs- und regelungstechnische Geräte, Studium an der Fachhochschule Darmstadt zum Ing. grad., danach Studium der Elektrotechnik an der TU Berlin zum Dipl.-Ing., wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin im Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Promotion über die Regelung von bahngesteuerten Arbeitsmaschinen, Mitarbeiter an einem staatlichen Forschungsinstitut, danach Professor an der University of Applied Sciences Hochschule Esslingen für das Fachgebiet Steuer- und Regelungstechnik in der Fakultät Maschinenbau.

Hochschule Esslingen
University of Applied Sciences

Professor Dr.-Ing. Wolfgang Wendt
Hochschule Esslingen
73728 Esslingen am Neckar

10., ergänzte Auflage 2014

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5679-5

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2014 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf
Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Druck: CPI | Ebner & Spiegel, 89075 Ulm

Vorwort

Das Taschenbuch der Regelungstechnik wendet sich an Studentinnen und Studenten der Fachrichtungen Elektrotechnik, Maschinenbau und der allgemeinen Ingenieurwissenschaften von Fachhochschulen, Technischen Hochschulen und Technischen Universitäten. Es ist aufgrund der ausführlichen und doch kompakten Darstellung für die Anwendung in der ingenieurtechnischen Praxis geeignet sowie als Begleittext für regelungstechnische Vorlesungen einsetzbar.

Der Themenbereich erstreckt sich von der Berechnung von einfachen Regelkreisen mit Proportional-Elementen, von Regelkreisen im Zeit- und Frequenzbereich bis zu digitalen Regelungen, Zustandsregelungen, nichtlinearen Regelungen und Fuzzy-Regelungen. Die Verfahren der Zustandsregelung werden auf Probleme der Antriebstechnik angewendet.

In vielen Anwendungsbereichen hat sich MATLAB als *Language of Technical Computing* auf breiter Ebene für die Berechnung, Visualisierung und Programmierung von technischen und wirtschaftlichen Problemstellungen durchgesetzt. Ergänzt wird MATLAB durch das Programmpaket Simulink, mit dem dynamische Systeme modelliert, simuliert und analysiert werden können. Zwei Abschnitte befassen sich daher mit der Anwendung des Programmsystems MATLAB, Simulink auf Problemstellungen der Regelungstechnik.¹ Die Beschreibungen der regelungstechnischen Verfahren und Methoden werden durch überschaubare Beispiele ergänzt. Zu vielen Beispielen sind m-Files und Simulink-Modelle für das Programmsystem MATLAB, Simulink angegeben², die mit den aktuellen Software-Versionen erstellt worden sind.

Das Taschenbuch enthält zahlreiche Tabellen, die in der Regelungstechnik benötigt werden. Für die Anwendung der LAPLACE-Transformation und z -Transformation wurden umfangreiche Transformationstabellen berechnet, z -Transformationen für Regelstrecken höherer Ordnung mit Halteglied sind in dem Taschenbuch dargestellt. Die Benutzung der Tabellen zur LAPLACE- und z -Transformation wird für die Anwender vereinfacht, da bei den Transformationspaaren neben den allgemeinen mathematischen Bezeichnungen auch die in der Regelungstechnik normierten Kenngrößen wie Zeitkonstanten und Kreisfrequenzen angegeben sind. Die Identifikation von Übertragungselementen mit der Sprungantwortfunktion ist ebenfalls tabellarisch angegeben.

Die Kapitel mit MATLAB- und Simulink-Anwendungen wurden an die aktuelle Release des Programmpakets angepasst. In die Tabelle mit den Simulink-Blöcken wurden neue Blöcke eingefügt und deren Funktionsweise mit Beispielen erklärt.

¹ MATLAB und Simulink werden in Deutschland von The MathWorks GmbH, 85737 Ismaning, vertrieben.

² Die m-, mdl- und slx-Files können von der Homepage von Holger Lutz über <http://homepages-fb.th-mittelhessen.de/hlutz/> heruntergeladen werden.

Autoren und Verlag Europa-Lehrmittel

Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG

Düsselberger Str. 23

42781 Haan-Gruiten

lektorat@europa-lehrmittel.de

<http://www.europa-lehrmittel.de>

E-Mail: holger.lutz@iem.th-mittelhessen.de

<http://www.iem.thm.de/iem/lutz.html>, <http://homepages-fb.th-mittelhessen.de/hlutz/>

E-Mail: wolfgang.wendt@hs-esslingen.de

<http://www.hs-esslingen.de/de/mitarbeiter/wolfgang-wendt.html>

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Regelungstechnik	23
1.1	Steuerungen und Regelungen	23
1.2	Begriffe der Regelungstechnik	24
2	Hilfsmittel zur Darstellung von regelungstechnischen Strukturen	29
2.1	Wirkungs- oder Signalfusspläne	29
2.2	Elemente des Wirkungs- oder Signalfussplans	29
2.2.1	Übertragungsblock und Wirkungslinie	29
2.2.2	Verknüpfungselemente	31
2.3	Einfache Signalfussstrukturen und Vereinfachungsregeln	33
2.3.1	Anwendung der Wirkungs- oder Signalfusspläne	33
2.3.2	Kettenstruktur	34
2.3.3	Parallelstruktur	34
2.3.4	Kreisstrukturen	36
2.3.4.1	Struktur mit indirekter Gegenkopplung	36
2.3.4.2	Struktur mit direkter Gegenkopplung	37
2.4	Berechnungen von Regelkreisen mit Proportional-Elementen	38
2.5	Umformung von Wirkungs- und Signalfussplänen	40
2.5.1	Umformungsregeln	40
2.5.2	Tabelle der Umformungsregeln für Wirkungspläne	40
2.5.3	Anwendungsbeispiele	42
3	Mathematische Methoden zur Berechnung von Regelkreisen	45
3.1	Normierung von Gleichungen	45
3.2	Linearisierung von Regelkreiselementen	46
3.2.1	Definition der Linearität	46
3.2.2	Linearisierung mit grafischen Verfahren	47
3.2.3	Linearisierung mit analytischen Verfahren	48
3.2.4	Linearisierung bei mehreren Variablen	50
3.3	Berechnung von Differenzialgleichungen für Regelkreise	52
3.3.1	Differenzialgleichungen von physikalischen Systemen	52
3.3.2	Lösung von linearen Differenzialgleichungen	52
3.3.2.1	Überlagerung von Teillösungen	52
3.3.2.2	Lösung einer homogenen Differenzialgleichung	52
3.3.2.3	Partikuläre Lösung einer Differenzialgleichung	54
3.4	Testfunktionen	61
3.4.1	Vergleich mit Testfunktionen	61
3.4.2	Impulsfunktion	61
3.4.3	Sprungfunktion	62
3.4.4	Anstiegsfunktion	63
3.4.5	Harmonische Funktion	63
3.5	LAPLACE-Transformation	63
3.5.1	Einleitung	63
3.5.2	Mathematische Transformationen	64
3.5.2.1	Rechenvereinfachungen durch Transformationen	64
3.5.2.2	Original- und Bildbereich der LAPLACE-Transformation	64
3.5.3	LAPLACE-Transformation und LAPLACE-Rücktransformation	65

3.5.4	Anwendung der LAPLACE-Transformation	67
3.5.4.1	Allgemeines	67
3.5.4.2	Linearität	67
3.5.4.3	Verschiebungssätze	68
3.5.4.4	Ähnlichkeitssatz	69
3.5.4.5	Differenziations- und Integrationsatz	70
3.5.4.6	Faltungssatz	72
3.5.4.7	Grenzwertsätze	72
3.5.4.8	LAPLACE-Transformation von periodischen Funktionen	74
3.5.4.9	Lösung von linearen Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten mithilfe der LAPLACE-Transformation	75
3.5.5	Übertragungsfunktionen von Übertragungselementen	77
3.5.6	Partialbruchzerlegung	78
3.5.6.1	Allgemeines	78
3.5.6.2	Einfache reelle Polstellen	78
3.5.6.3	Mehrfache reelle Polstellen	79
3.5.6.4	Einfache komplexe Polstellen	80
3.5.7	Charakteristische Gleichung und Pol-Nullstellenplan	80
3.5.8	Tabellen für die LAPLACE-Transformation	83
3.6	Frequenzgang von Übertragungselementen	107
3.6.1	Dynamisches Verhalten im Frequenzbereich	107
3.6.2	Frequenzgang	107
3.6.3	Berechnung des Frequenzgangs aus der Differenzialgleichung des Übertragungselements	110
3.6.4	Frequenzgang und Übertragungsfunktion	112
3.6.5	Frequenzgang und Ortskurve	113
3.6.6	Frequenzgang und BODE-Diagramm	114
3.6.7	Frequenzgang und Sprungantwort	116
4	Elemente von Regleinrichtungen und Regelstrecken	117
4.1	Einteilung und Darstellung der Regelkreiselemente	117
4.2	Proportional-Element ohne Verzögerung	117
4.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	117
4.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	119
4.2.3	Proportional-Regler (P-Regler)	120
4.2.4	Proportionale Regelstrecken	121
4.2.4.1	Allgemeines	121
4.2.4.2	Proportional-Regelstrecke (P-Regelstrecke)	121
4.3	Proportional-Elemente mit Verzögerung	122
4.3.1	Allgemeines	122
4.3.2	PT ₁ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung	122
4.3.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	122
4.3.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	123
4.3.3	PT ₂ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung	127
4.3.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	127
4.3.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	130
4.3.4	Totzeit-Element (PT ₁ -Element)	138
4.3.4.1	Beschreibung im Zeitbereich	138
4.3.4.2	Beschreibung im Frequenzbereich	139

4.3.5	Allpass-Elemente	140
4.3.5.1	Beschreibung im Zeitbereich	140
4.3.5.2	Beschreibung im Frequenzbereich	145
4.3.6	Minimal- und nichtminimalphasige Elemente	148
4.4	Differenzierende Übertragungselemente	154
4.4.1	Differenzial-Element ohne Verzögerung (D-Element)	154
4.4.1.1	Beschreibung im Zeitbereich	154
4.4.1.2	Beschreibung im Frequenzbereich	154
4.4.2	Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung (DT ₁ -Element)	156
4.4.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	156
4.4.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	157
4.4.3	Proportional-Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung in multiplikativer Form (PDT ₁ -, PPT ₁ -Element)	161
4.4.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	161
4.4.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	162
4.4.4	Proportional-Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung in additiver Form (PDT ₁ -Element)	165
4.4.5	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler, PDT ₁ -Regler)	166
4.5	Integrierende Elemente	168
4.5.1	Integral-Element (I-Element)	168
4.5.1.1	Beschreibung im Zeitbereich	168
4.5.1.2	Beschreibung im Frequenzbereich	169
4.5.2	Integrale Regelstrecken	171
4.5.2.1	Allgemeines Verhalten	171
4.5.2.2	Integrale Regelstrecke (I-Regelstrecke)	171
4.5.2.3	Integrale Regelstrecke mit Verzögerung (IT ₁ -Regelstrecke)	173
4.5.2.4	Integrale Regelstrecke mit Totzeit (IT ₁ -Regelstrecke)	175
4.5.3	Regler mit integralem Verhalten	176
4.5.3.1	Integral-Regler (I-Regler)	176
4.5.3.2	Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	178
4.5.3.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	178
4.5.3.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	179
4.5.3.3	Proportional-Integral-Differenzial-Regler ohne Verzögerung in additiver (paralleler) Form (PID-Regler)	182
4.5.3.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	182
4.5.3.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	183
4.5.3.4	Proportional-Integral-Differenzial-Regler ohne Verzögerung in multiplikativer (serieller) Form (PID-Regler)	185
4.5.3.4.1	Beschreibung im Zeitbereich	185
4.5.3.4.2	Beschreibung im Frequenzbereich	186
4.5.3.5	Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung in additiver (paralleler) Form (PIDT ₁ -Regler)	188
4.5.3.5.1	Beschreibung im Zeitbereich	188
4.5.3.5.2	Beschreibung im Frequenzbereich	189
4.5.3.6	Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung in multiplikativer (serieller) Form (PIDT ₁ -Regler)	192
4.5.3.6.1	Beschreibung im Zeitbereich	192
4.5.3.6.2	Beschreibung im Frequenzbereich	193

	4.5.3.7	PID-Reglerstrukturen, Umrechnung zwischen additiven und multiplikativen Formen	195
	4.5.3.8	PID-Regler mit zwei Freiheitsgraden	201
4.6		Standardisierte Parameter von Übertragungsfunktionen	205
	4.6.1	Koeffizienten und standardisierte Parameter	205
	4.6.2	Ermittlung der stationären Verstärkungsfaktoren	206
	4.6.2.1	Integrierverstärkung K_I	206
	4.6.2.2	Proportionalverstärkung K_P	207
	4.6.2.3	Differenzierverstärkung K_D	207
	4.6.2.4	Ermittlung der Verstärkungsfaktoren bei Übertragungsfunktionen mit mehreren Übertragungskomponenten	208
	4.6.3	Ermittlung von Zeitkonstanten, Dämpfung und Kennkreisfrequenz	209
	4.6.3.1	Ermittlung von Zeitkonstanten	209
	4.6.3.2	Ermittlung von standardisierten Zeitkonstanten	210
	4.6.3.3	Ermittlung von standardisierten Koeffizienten bei Systemen II. Ordnung mit komplexen Nullstellen	211
4.7		Gleichungen und Symbole für Regelkreiselemente	212
	4.7.1	Differenzialgleichungen von Regelkreiselementen	212
	4.7.2	Frequenzgangfunktionen von Regelkreiselementen	214
	4.7.3	Übertragungsfunktionen von Regelkreiselementen	216
5		Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen für Führungs- und Störverhalten	219
5.1		Gleichungen für Regelkreise mit direkter Gegenkopplung	219
	5.1.1	Strukturbild und Abkürzungen	219
	5.1.2	Gleichungen für das Führungsübertragungsverhalten	221
	5.1.3	Gleichungen für das Störungsübertragungsverhalten von Versorgungsstörgrößen	222
	5.1.4	Gleichungen für das Störungsübertragungsverhalten von Laststörgrößen	222
	5.1.5	Berechnungsbeispiel	223
	5.1.6	Gleichungen für das Stellgrößenverhalten	225
5.2		Ausregelbarkeit von Störungen	228
5.3		Gleichungen für Regelkreise mit indirekter Gegenkopplung	229
5.4		Stationäre Regelfehler höherer Ordnung	232
6		Stabilität von Regelkreisen	235
6.1		Entstehung des Stabilitätsproblems bei Regelkreisen	235
6.2		Definition der Stabilität	236
6.3		Verfahren zur Stabilitätsbestimmung	239
	6.3.1	Algebraische und geometrische Stabilitätskriterien	239
	6.3.2	ROUTH-Kriterium	240
	6.3.2.1	Eigenschaften des ROUTH-Verfahrens	240
	6.3.2.2	Stabilitätskriterium nach ROUTH	240
	6.3.2.3	Abhängigkeit der Stabilität von einem Parameter	242
	6.3.3	Kriterium von HURWITZ	243
	6.3.3.1	Allgemeines	243
	6.3.3.2	Stabilitätskriterium nach HURWITZ	243
	6.3.4	NYQUIST-Kriterium	245
	6.3.4.1	Eigenschaften des NYQUIST-Kriteriums	245
	6.3.4.2	Vereinfachtes Stabilitätskriterium nach NYQUIST	245
	6.3.4.3	Beispiele zum vereinfachten NYQUIST-Kriterium	247
	6.3.4.4	Vollständiges NYQUIST-Kriterium	248

	6.3.4.5	Beispiele zum vollständigen NYQUIST-Kriterium	250
	6.3.4.6	Stabilität von Regelungssystemen mit Totzeit	251
6.4		Wurzelortskurven	253
	6.4.1	Einleitung	253
	6.4.2	Kriterium für das Wurzelortskurven-Verfahren (WOK-Verfahren)	255
	6.4.3	Regeln für die Konstruktion von Wurzelortskurven	261
	6.4.3.1	Allgemeines	261
	6.4.3.2	Prinzipieller Verlauf der WOK (Regel 1)	262
	6.4.3.3	WOK auf der reellen Achse (Regel 2)	262
	6.4.3.4	Schnittpunkt der Asymptoten (Regel 3)	263
	6.4.3.5	Anstiegswinkel der Asymptoten (Regel 4)	263
	6.4.3.6	Verzweigungspunkte (Regel 5)	263
	6.4.3.7	Schnittwinkel der WOK-Zweige in Verzweigungspunkten (Regel 6)	266
	6.4.3.8	Schnittpunkte der WOK mit der imaginären Achse (Regel 7)	268
	6.4.3.9	Austrittswinkel der WOK aus Polstellen, Eintrittswinkel in Nullstellen (Regel 8)	269
	6.4.3.10	Skalierung der WOK mit dem Kurvenparameter (Regel 9)	271
	6.4.3.11	Tabelle der Schritte des WOK-Verfahrens	273
	6.4.3.12	Anwendung des WOK-Verfahrens	274
	6.4.3.13	Tabelle mit WOK für Regelungssysteme bis IV. Ordnung	279
	6.4.4	Erweiterung der Anwendung des WOK-Verfahrens	283
	6.4.4.1	WOK-Verfahren für andere Regelkreisparameter	283
	6.4.4.2	WOK für mehrere Kurvenparameter (WOK-Kontur)	285
	6.4.5	Zusammenfassung	289
7		BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen	291
7.1		Einleitung	291
7.2		BODE-Diagramme	291
	7.2.1	BODE-Diagramm des offenen Regelkreises	291
	7.2.2	BODE-Diagramme der wichtigsten Übertragungselemente	292
	7.2.2.1	Einleitung	292
	7.2.2.2	Proportional-Element (P-Element)	292
	7.2.2.3	Integral-Element (I-Element)	293
	7.2.2.4	Differenzial-Element (D-Element)	293
	7.2.2.5	Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung (PT ₁ -Element)	294
	7.2.2.6	Proportional-Differenzial-Element (PD-Element)	295
	7.2.2.7	Totzeit-Element (PT _z -Element)	296
	7.2.2.8	Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung (PT ₂ -Element)	296
7.3		Stabilitätsgrenze im BODE-Diagramm	299
	7.3.1	Vergleich mit der Ortskurvendarstellung	299
	7.3.2	Amplitudenreserve und Phasenreserve	300
7.4		Anwendung des BODE-Verfahrens	302
	7.4.1	Einstellung der Stabilitätsgüte	302
	7.4.2	Einstellung des Verstärkungsfaktors	303
	7.4.3	Anhebung des Phasengangs	304
	7.4.4	Anwendung von phasenanehebenden Netzwerken	306
	7.4.5	Absenkung des Amplitudengangs	309
	7.4.6	Anwendung von amplitudenabsenkenden Netzwerken	310
	7.4.7	Zusammenfassung	313

7.5	Zusammenhang zwischen Kenngrößen von Zeit- und Frequenzbereich	314
7.5.1	Anforderungen an das Zeitverhalten von Regelungssystemen	314
7.5.2	Zusammenhang für das Übertragungselement II. Ordnung	314
7.5.2.1	Kenngrößen für das Übertragungselement II. Ordnung	314
7.5.2.2	Berechnungsformeln	316
7.5.2.3	Erweiterung der Anwendung	319
8	Regleinrichtungen mit Operationsverstärkern	323
8.1	Prinzipieller Aufbau	323
8.1.1	Aufgaben von Regleinrichtungen	323
8.1.2	Kenngrößen von Operationsverstärkern	323
8.1.2.1	Stationäre Kenngrößen	323
8.1.2.2	Dynamische Kenngrößen	324
8.1.2.3	Zusammenfassung	327
8.2	Grundsaltungen mit Operationsverstärkern	327
8.2.1	Allgemeines	327
8.2.2	Allgemeine Schaltung eines Operationsverstärkers	328
8.2.3	Invertierende Schaltung	329
8.2.4	Nichtinvertierende Schaltung	329
8.3	Schaltungen zur Bildung der Regeldifferenz	331
8.3.1	Schaltung mit Spannungsvergleichsstelle	331
8.3.2	Schaltung mit Stromvergleichsstelle	332
8.4	Schaltungen zur Bildung der Stellgröße	332
8.4.1	Allgemeines	332
8.4.2	Proportional-Regler (P-Regler)	333
8.4.2.1	Invertierender Proportional-Regler	333
8.4.2.2	Nichtinvertierender Proportional-Regler	333
8.4.3	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler), Proportional-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PDT ₁ -Regler)	334
8.4.3.1	Invertierender PD/PDT ₁ -Regler	334
8.4.3.2	Nichtinvertierender PD/PDT ₁ -Regler	334
8.4.3.3	PD/PDT ₁ -Regler mit getrennt einstellbaren Parametern	335
8.4.4	Integral-Regler (I-Regler)	337
8.4.4.1	Invertierender Integral-Regler	337
8.4.4.2	Nichtinvertierender Integral-Regler	338
8.4.5	Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	339
8.4.5.1	Invertierender PI-Regler	339
8.4.5.2	Nichtinvertierender PI-Regler	339
8.4.5.3	PI-Regler mit unabhängig einstellbaren Parametern	340
8.4.6	Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID-Regler), Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PIDT ₁ -Regler)	341
8.4.6.1	PID/PIDT ₁ -Regler in additiver (paralleler) Form mit unabhängig voneinander einstellbaren Parametern	341
8.4.6.2	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit einem Verstärker	342
8.4.6.3	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit zwei Verstärkern	343
8.4.6.4	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit Entkopplung	344
8.4.6.5	Nichtinvertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form	345

8.5	Kontinuierliche Einstellung von Reglerparametern	345
8.6	Schaltungen zur Glättung von Regelkreissignalen	347
8.6.1	PT ₁ -Element mit invertierendem Trennverstärker	347
8.6.2	PT ₁ -Element mit nichtinvertierendem Trennverstärker	349
8.7	Zusammenfassung	350
9	Ermittlung mathematischer Modelle für regelungstechnische Übertragungselemente (Identifikation)	357
9.1	Einteilung von mathematischen Modellen	357
9.2	Anwendung der Modellbildung in der Regelungstechnik	358
9.2.1	Theoretische und experimentelle Analyse	358
9.2.2	Zusammenfassung	361
9.3	Experimentelle Analyse von linearen Übertragungselementen	361
9.3.1	Vorgehensweise bei der experimentellen Analyse	361
9.3.2	Experimentelle Analyse mit Sprungfunktionen	362
9.3.2.1	Bestimmung des prinzipiellen Übertragungsverhaltens aus dem Endwert der Sprungantwort	362
9.3.2.2	Bestimmung des Elementtyps aus Anfangswert und Anfangssteigung der Sprungantwort	365
9.3.2.3	Ableitung von Identifikationsmerkmalen aus den Eigenschaften von Sprungantworten	367
9.3.2.4	Sprungantwortverlauf ohne Überspringen und ohne periodisches Schwingen	368
9.3.2.5	Sprungantwortverlauf mit Über- und Unterschwingen ohne periodisches Schwingen	369
9.3.2.6	Sprungantwortverläufe mit periodischem Schwingen	371
9.3.2.6.1	Identifikationsmerkmale von PT ₂ -Elementen	371
9.3.2.6.2	PT ₂ -Elemente mit Vorhalt- oder Verzögerungselement	377
9.3.2.7	Sprungantwortverläufe von Elementen mit Totzeit	380
9.3.3	Sprungantwortverläufe mit Wendepunkt und ohne Überspringen	381
9.3.3.1	Prinzip des Wendetangentenverfahrens	381
9.3.3.2	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten	383
9.3.3.3	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit gleichen Zeitkonstanten	387
9.3.3.4	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit mehreren Zeitkonstanten	390
9.3.3.5	Zusammenfassung des Wendetangentenverfahrens	394
9.3.3.6	Zeitprozentkennwertmethode	395
9.3.4	Sprungantwortverläufe von Integral-Elementen	400
9.3.4.1	Eigenschaften von Integral-Elementen	400
9.3.4.2	Identifikation von reinen Integral-Elementen	400
9.3.4.3	Identifikation von Integral-Elementen mit Verzögerung	402
9.3.4.4	Identifikation von Integral-Elementen mit Totzeit	405
9.4	Sprungantworten und Identifizierungsgleichungen	407
9.4.1	Einleitung	407
9.4.2	Zusammenstellung von Sprungantwortfunktionen und mathematischen Modellen von Übertragungselementen	407
9.4.3	Zusammenfassung	433

9.5	Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren	434
9.5.1	Stochastische Prozesse, Modellbegriffe	434
9.5.2	MA-Modell (moving-average model)	434
9.5.3	AR-Modell (auto-regressive model)	436
9.5.4	ARMA-Modell (auto-regressive moving-average model)	437
9.5.5	Modelle mit zusätzlicher deterministischer Eingangsgröße	438
9.5.5.1	Allgemeine Modellstruktur	438
9.5.5.2	Modellarten mit deterministischer und stochastischer Eingangsgröße	440
9.5.6	Parameterschätzung von ARX-Modellen	440
9.5.6.1	Prinzip der Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren (experimentelle Identifikation)	440
9.5.6.2	Fehlerarten für die Anwendung von Parameterschätzverfahren	441
9.5.6.3	Modellbestimmung bei Prozessen mit vernachlässigbaren Störgrößen	443
9.5.6.4	Modellbestimmung mit der Methode der kleinsten Quadrate	449
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise, erweiterte Regelkreisstrukturen	457
10.1	Einleitung	457
10.2	Parameteroptimierung im Zeitbereich	458
10.2.1	Begriff der Regelfläche	458
10.2.2	Integralkriterien im Zeitbereich, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	459
10.2.2.1	Integralkriterium der Linearen Regelfläche, IE-Kriterium (Integrated Error criterion)	459
10.2.2.2	Integralkriterien der Betragsregelfläche	461
10.2.2.3	Integralkriterien der Quadratischen Regelfläche	486
10.2.3	Berechnung der Integralkriterien für Standardregelkreise II. Ordnung	490
10.3	Einstellregeln für Regelkreise	493
10.3.1	Anwendung der Einstellregeln	493
10.3.2	Einstellregeln von ZIEGLER und NICHOLS	494
10.3.3	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK	495
10.3.4	Regler-Einstellung nach der T-Summen-Regel	497
10.3.4.1	Summenzeitkonstante einer Regelstrecke	497
10.3.4.2	Experimentelle Bestimmung der Summenzeitkonstanten	499
10.3.4.3	T-Summen-Regel für PI- und PID-Regler	499
10.3.4.4	Anwendung der T-Summen-Regel	501
10.4	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Betragsoptimum	504
10.4.1	Prinzip der Optimierung im Frequenzbereich	504
10.4.2	Einstellung von Regelkreisen nach dem Betragsoptimum	504
10.4.3	Anwendung des Verfahrens	508
10.4.3.1	Vereinfachung von Streckenübertragungsfunktionen	508
10.4.3.2	Satz von der Summe der kleinen Zeitkonstanten	508
10.4.3.3	Vereinfachung von Totzeitelementen	509
10.4.4	Anwendung des Betragsoptimums bei Regelstrecken höherer Ordnung	509
10.4.4.1	Kompensation einer großen Zeitkonstanten	509
10.4.4.2	Kompensation von zwei großen Zeitkonstanten	510
10.4.5	Einstellregeln für das Betragsoptimum	515
10.5	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Symmetrisches Optimum	516
10.5.1	Prinzip des Verfahrens und Anwendung bei IT_1 -Regelstrecken	516
10.5.2	Standardeinstellung des Symmetrischen Optimums	521

10.5.3	Anwendung des Verfahrens bei integralen Regelstrecken mit Verzögerung höherer Ordnung	524
10.5.4	Anwendung des Verfahrens bei proportionalen Regelstrecken mit Verzögerungen höherer Ordnung	525
10.5.4.1	PT_n -Regelstrecken mit einer großen Zeitkonstanten	525
10.5.4.2	PT_n -Regelstrecken mit zwei großen Zeitkonstanten	525
10.5.5	Einstellregeln für das Symmetrische Optimum	526
10.5.6	Zusammenfassung zur Optimierung im Frequenzbereich	528
10.6	Erweiterte Regelkreisstrukturen	529
10.6.1	Einleitung	529
10.6.2	Regelungen mit Störgrößenaufschaltung	529
10.6.2.1	Anwendungsbeispiele	529
10.6.2.2	Störgrößenaufschaltung auf den Regelstreckeneingang	530
10.6.2.3	Störgrößenaufschaltung auf den Reglereingang	535
10.6.3	Regelstrecken mit Totzeit (SMITH-Regler, SMITH-Prädiktor)	541
11	Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)	547
11.1	Prinzipielle Arbeitsweise von digitalen Regelkreisen	547
11.1.1	Einleitung	547
11.1.2	Kontinuierliche und diskrete Signale in digitalen Regelungssystemen	547
11.1.3	Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	548
11.2	Basisalgorithmen für digitale Regelungen	549
11.2.1	Einleitung	549
11.2.2	Proportionalalgorithmus	550
11.2.3	Approximation von Integration und Differenziation durch diskrete Operationen	550
11.2.3.1	Integralalgorithmen mit Rechtecknäherung	550
11.2.3.2	Integralalgorithmus mit Trapeznäherung	554
11.2.3.3	Einfache Differenzialalgorithmen	555
11.2.3.4	Differenzialalgorithmen mit Mittelwertbildung	557
11.2.4	Regelalgorithmen für Standardregler	557
11.2.4.1	PID-Stellungsalgorithmus	557
11.2.4.2	PID-Geschwindigkeitsalgorithmus, Regler mit Pulsweitenmodulation	558
11.2.4.3	PID-Standardregelalgorithmen	565
11.2.4.4	Modifizierte PID-Regelalgorithmen	567
11.3	Einstellregeln für digitale Regelkreise	567
11.3.1	Quasikontinuierliche digitale Regelkreise	567
11.3.2	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen der Regelstrecke	568
11.3.3	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen des Regelkreises	569
11.3.4	Einstellregeln mit Berücksichtigung der Abtastzeit	574
11.4	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Zeitbereich	576
11.4.1	Allgemeines	576
11.4.2	Differenzgleichungen	576
11.4.3	Lösung von Differenzgleichungen	576
11.4.3.1	Ermittlung der Lösung durch Rekursion	576
11.4.3.2	Lösung mit homogenem und partikulärem Ansatz	578
11.4.4	Stabilität von Abtastsystemen im Zeitbereich	581
11.5	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Frequenzbereich	583
11.5.1	Technische und mathematische Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	583
11.5.1.1	Allgemeines	583

11.5.1.2	Abtastung von kontinuierlichen Signalen	584
11.5.1.3	Darstellung von zeitdiskreten Signalen durch Folgen	586
11.5.1.4	Ausführung des Regelalgorithmus (Berechnung der Stellgröße)	586
11.5.1.5	Speicherung der diskreten Stellgröße (Halteglied)	587
11.5.2	z -Transformation	589
11.5.2.1	Einleitung	589
11.5.2.2	Definition der z -Transformation	590
11.5.2.3	Rechenregeln der z -Transformation	592
11.5.2.4	Tabellen zur z -Transformation	598
11.5.2.5	Anwendung der Tabellen zur z -Transformation	624
11.5.3	Inverse z -Transformation (z -Rücktransformation)	625
11.5.3.1	Verfahren zur z -Rücktransformation	625
11.5.3.2	Rücktransformation mit dem komplexen Umkehrintegral	626
11.5.3.3	Partialbruchzerlegung, Rücktransformation mit Tabelle	626
11.5.3.4	Rücktransformation mit der Potenzreihenentwicklung	628
11.5.3.5	Berechnung der Impulsfunktion mit Rekursion	629
11.5.4	z -Übertragungsfunktionen (Impulsübertragungsfunktionen)	630
11.5.4.1	z -Übertragungsfunktionen von zeitdiskreten Elementen	630
11.5.4.2	z -Übertragungsfunktionen von Regelalgorithmen	631
11.5.4.3	z -Übertragungsfunktionen von zeitkontinuierlichen Elementen	632
11.5.4.4	Tabelle von z -Übertragungsfunktionen für zeitkontinuierliche Elemente (Regelstrecken mit Halteglied)	634
11.5.4.5	Eigenschaften von z -Übertragungsfunktionen	638
11.5.4.6	Normierte Testfolgen für z -Übertragungsfunktionen	641
11.5.4.7	Umformungsregeln für z -Übertragungsfunktionen	642
11.5.4.7.1	Voraussetzungen für die Anwendung der Umformungsregeln	642
11.5.4.7.2	Einfache Strukturen	643
11.5.4.7.3	Reihenschaltung von Übertragungselementen	644
11.5.4.7.4	Parallelschaltung von Übertragungselementen	645
11.5.4.7.5	Kreisstrukturen	645
11.5.4.8	z -Übertragungsfunktionen von digitalen Regelkreisen	646
11.5.4.8.1	Voraussetzungen	646
11.5.4.8.2	Führungsübertragungsverhalten	647
11.5.4.8.3	Störungsübertragungsverhalten (Versorgungsstörgröße)	647
11.5.4.8.4	Störungsübertragungsverhalten (Laststörgröße)	649
11.5.4.8.5	Berechnung von z -Übertragungsfunktionen	650
11.6	Stabilität von digitalen Regelungssystemen	653
11.6.1	Stabilitätsdefinition	653
11.6.2	Verfahren zur Stabilitätsbestimmung	655
11.6.2.1	Stabilitätskriterien	655
11.6.2.2	Anwendung der Bilineartransformation	656
11.6.2.3	Koeffizientenkriterien (Bilineartransformation)	659
11.6.2.4	Stabilitätskriterium von JURY	662
11.7	Kompensationsregler für digitale Regelkreise	664
11.7.1	Prinzip der Kompensation	664
11.7.2	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit (Dead-Beat-Regler)	665
11.7.3	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit mit Vorgabe des ersten Stellgrößenwerts	677

11.8	Diskretisierung von kontinuierlichen Übertragungsfunktionen	682
11.8.1	Anwendung von Diskretisierungsverfahren	682
11.8.2	Substitutionsverfahren	683
11.8.3	Stabilität der Verfahren	690
11.8.4	Systemantwortinvariante Transformationen	693
11.8.4.1	Invariante Systemreaktionen im Zeitbereich	693
11.8.4.2	Impulsinvariante Transformation	694
11.8.4.3	Sprunginvariante Transformation	694
12	Zustandsregelungen	697
12.1	Allgemeines	697
12.2	Mathematische Methoden zur Berechnung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	698
12.2.1	Beschreibung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	698
12.2.1.1	Allgemeine Form des Gleichungssystems	698
12.2.1.2	Beschreibung linearer Mehrgrößensysteme mit Zustandsvariablen	699
12.2.1.3	Beschreibung linearer Eingrößensysteme mit Zustandsvariablen	703
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich	705
12.2.2.1	Berechnung der Matrix-e-Funktion	705
12.2.2.2	Differenziation der Matrix-e-Funktion	706
12.2.2.3	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	706
12.2.2.4	Transitionsmatrix	707
12.2.3	Lösung der Zustandsgleichung im Frequenzbereich	711
12.2.4	Normalformen von Übertragungssystemen	713
12.2.4.1	Allgemeines	713
12.2.4.2	Regelungsnormform	713
12.2.4.3	Beobachtungsnormform	718
12.2.4.4	Zusammenfassung	723
12.2.5	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit von Übertragungssystemen	723
12.2.5.1	Steuerbarkeit	723
12.2.5.2	Beobachtbarkeit	725
12.2.5.3	Untersuchung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit eines Regelungssystems	727
12.2.6	Transformation auf Regelungs- und Beobachtungsnormform	729
12.2.6.1	Allgemeine Form der Transformationsgleichungen	729
12.2.6.2	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Regelungsnormform	730
12.2.6.3	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Beobachtungsnormform	732
12.3	Regelung durch Zustandsrückführung	734
12.3.1	Allgemeines	734
12.3.2	Berechnung von Zustandsregelungen	735
12.3.2.1	Ermittlung von Zustandsreglern durch Polvorgabe	735
12.3.2.2	Berechnung des Vorfilters	737
12.3.3	Zustandsregelung mit Beobachter	744
12.3.3.1	Prinzipielle Arbeitsweise von Beobachtern	744
12.3.3.2	Ermittlung von Zustandsbeobachtern durch Polvorgabe	748
12.3.4	Systematische Vorgehensweise bei der Berechnung von Zustandsreglern und Zustandsbeobachtern	754
12.3.5	Zusammenfassung	754

12.4	Regelungen durch Zustandsrückführung mit verbessertem Störungsverhalten	755
12.4.1	Allgemeines	755
12.4.2	Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	756
12.4.2.1	Berechnung des Zustandsreglers mit Vorfilter	756
12.4.2.2	Störungsverhalten der Zustandsregelung	758
12.4.2.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	760
12.4.2.4	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	765
12.4.3	Proportional-Integral-(PI)-Zustandsregelung	765
12.4.3.1	Zustandsgleichungen für die PI-Zustandsregelung	765
12.4.3.2	Berechnung der Zustandsregelung mit überlagertem PI-Regler	769
12.4.3.3	Störungsverhalten der PI-Zustandsregelung	773
12.4.4	Robuste Regelung – Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung	774
12.4.4.1	Begriff der robusten Regelung	774
12.4.4.2	Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung auf Robustheit	774
12.4.5	Zusammenfassung	777
13	Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik	779
13.1	Allgemeines	779
13.2	Regelstrecken für elektrische Antriebe	779
13.2.1	Mathematisches Modell der Regelstrecke	779
13.2.1.1	Elektrischer Teil der Regelstrecke	779
13.2.1.2	Mechanischer Teil der Regelstrecke	782
13.2.2	Vereinfachung der Regelstrecke	784
13.3	Zeitverläufe von Führungs- und Störgrößen bei Antriebsregelungen von Drehmaschinen	785
13.4	Einschleifige Lageregelung	787
13.4.1	Berechnung des Lagereglers	787
13.4.2	Führungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	788
13.4.3	Störungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	790
13.5	Lageregelung mit Kaskadenstruktur	791
13.5.1	Allgemeines	791
13.5.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	791
13.5.2.1	Berechnung des Momentenreglers	791
13.5.2.2	Drehzahlregelung mit unterlagertem Momentenregelung	792
13.5.2.2.1	Berechnung des Drehzahlreglers	792
13.5.2.2.2	Führungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagertem Momentenregelung	793
13.5.2.3	Lageregelung mit unterlagertem Drehzahl- und Momentenregelung	795
13.5.2.3.1	Berechnung des Lagereglers	795
13.5.2.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagertem Drehzahl- und Momentenregelung	797
13.5.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	799
13.5.3.1	Störungsverhalten der Regelstrecke	799
13.5.3.2	Störungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagertem Momentenregelung	800
13.5.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagertem Drehzahl- und Momentenregelung	802

13.6	Zusammenfassung	803
13.7	Digitale Lageregelung mit Kaskadenstruktur	804
13.7.1	Allgemeines	804
13.7.2	Digitale Winkelgeschwindigkeitsregelung (Drehzahlregelung) mit unterlagerter Momentenregelung	804
13.7.2.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	804
13.7.2.2	Führungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagerter Momentenregelung	805
13.7.2.3	Störungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagerter Momentenregelung	808
13.7.3	Digitale Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	809
13.7.3.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	809
13.7.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	809
13.7.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	810
13.7.4	Zusammenfassung	811
13.8	Lageregelung mit Zustandsregler	811
13.8.1	Allgemeines	811
13.8.2	Berechnung der Zustandsregelung	811
13.8.2.1	Ermittlung des Zustandsreglers durch Polvorgabe	811
13.8.2.2	Berechnung des Vorfilters für den Zustandsregler	815
13.8.2.3	Sprungverhalten der Lageregelung mit Zustandsregler	816
13.8.2.4	Stellgliedzeitkonstante und Stellgrößenaufwand	818
13.8.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	820
13.8.3.1	Struktur des Zustands- und Störgrößenbeobachters	820
13.8.3.2	Ermittlung des Beobachters durch Polvorgabe	822
13.8.3.3	Berechnung des Vorfilters für die Störgrößenaufschaltung	825
13.8.3.4	Dynamisches Verhalten des Beobachters	826
13.8.3.5	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter und Störgrößenaufschaltung	828
13.8.4	Zustandslageregelung mit Störgrößenaufschaltung	829
13.9	Digitale Drehzahl- und Lageregelungen mit Zustandsregler	831
13.9.1	Zustandsdarstellung für digitale Regelungen	831
13.9.2	Digitale Drehzahlregelung mit Zustandsregler	831
13.9.3	Digitale Integral-Zustandslageregelung	837
13.10	Zusammenfassung	840
14	Nichtlineare Regelungen	841
14.1	Einleitung	841
14.1.1	Verfahren zur Untersuchung nichtlinearer Systeme	841
14.1.2	Definition der Nichtlinearität	841
14.1.3	Lineare und nichtlineare Operationen	843
14.1.4	Eigenschaften von nichtlinearen Regelkreiselementen und -systemen	846
14.2	Grundtypen von nichtlinearen Elementen	853
14.2.1	Prinzipielle Eigenschaften von nichtlinearen Funktionen	853
14.3	Verfahren der Linearisierung	856
14.3.1	Allgemeines	856

14.3.2	Linearisierung mit inversen Kennlinien	856
14.3.3	Linearisierung durch Rückführung	858
14.3.4	Linearisierung im Arbeitspunkt (Tangentenlinearisierung), Vernachlässigung höherer Ableitungen der TAYLOR-Reihe	860
14.3.5	Harmonische Linearisierung mit der Beschreibungsfunktion, Vernachlässigung von höheren Harmonischen der FOURIER-Reihe	861
14.3.5.1	Grundlage des Verfahrens	861
14.3.5.2	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit eindeutigen Kennlinienfunktionen	864
14.3.5.3	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit mehrdeutigen Kennlinienfunktionen	873
14.3.5.4	Direkte Berechnung von Beschreibungsfunktionen aus Kennlinienfunktionen	877
14.3.5.5	Rechenregeln für Beschreibungsfunktionen	882
14.3.5.6	Beschreibungsfunktionen von Kennlinienelementen (Tabelle)	891
14.3.5.7	Berechnung der Gleichung der Harmonischen Balance	919
14.3.5.8	Stabilität von Grenzwahlungen	930
14.4	Untersuchung der Stabilität nichtlinearer Systeme	934
14.4.1	Methode der Phasenebene (Zustandsebene)	934
14.4.2	Eigenschaften von Zustandskurven in der Phasenebene	935
14.4.3	Berechnung von linearen Systemen II. Ordnung im Zeitbereich und in der Phasenebene	936
14.4.4	Ruhelagen von linearen und nichtlinearen Systemen	940
14.4.5	Stabilität von Ruhelagen	940
14.4.6	Berechnung der Stabilität von Ruhelagen	944
14.4.7	Stabilitätsuntersuchung mit der direkten Methode von LJAPUNOW	948
14.4.7.1	Grundgedanke der direkten Methode	948
14.4.7.2	Stabilitätsuntersuchung mit der LJAPUNOW-Funktion	950
14.4.8	Stabilitätskriterium von POPOW	952
14.4.8.1	Absolute Stabilität	952
14.4.8.2	Numerische Form des POPOW-Kriteriums	953
14.4.8.3	Ortskurvenform des POPOW-Kriteriums	956
14.5	Regelkreise mit schaltenden Reglern	958
14.5.1	Anwendung von schaltenden Reglern	958
14.5.2	Regelkreise mit Zweipunktreglern	960
14.5.2.1	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und proportionalen Regelstrecken	960
14.5.2.2	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken mit Totzeit	964
14.5.2.3	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken ohne Totzeit	972
14.5.2.4	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und Regelstrecken mit Integral-Anteil	973
14.5.3	Berechnung von Regelkreisen mit Dreipunktreglern	978
14.5.4	Schaltende Regler mit Rückführung	981
14.5.4.1	Eigenschaften von quasistetigen Reglern	981
14.5.4.2	Einfluss der Rückführung bei schaltenden Reglern	982
14.5.4.3	Quasistetige Standardregler (Regler mit Rückführung)	985
15	Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	991
15.1	Grundbegriffe der Fuzzy-Logik	991
15.1.1	Scharfe und unscharfe Mengen, Zugehörigkeitsfunktionen	991

15.1.2	Beschreibung von scharfen und unscharfen Mengen	992
15.1.2.1	Beschreibungsformen von scharfen Mengen	992
15.1.2.2	Beschreibungsformen von unscharfen Mengen	993
15.1.3	Darstellung von unscharfen Mengen mit Zugehörigkeitsfunktionen	996
15.1.4	Linguistische Variablen und Werte	1000
15.1.4.1	Linguistische Variablen zur Beschreibung von unscharfen Aussagen	1000
15.1.4.2	Struktur von linguistischen Variablen, linguistische Operatoren	1002
15.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1008
15.2.1	Elementaroperationen mit scharfen Mengen	1008
15.2.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1009
15.2.2.1	Elementaroperationen mit unscharfen Mengen	1009
15.2.2.2	Allgemeine Anforderungen an Fuzzy-Operatoren	1012
15.2.2.3	t -Normen und t -Konormen (s -Normen)	1014
15.2.2.4	Parametrisierte t -Normen und t -Konormen	1019
15.2.2.5	Kompensatorische und mittelnde Operatoren	1020
15.3	Unschärfe Relationen	1023
15.3.1	Einstellige Relationen	1023
15.3.2	Scharfe Relationen mit scharfen Mengen	1024
15.3.3	Unschärfe Relationen mit scharfen Mengen	1025
15.3.4	Unschärfe Relationen mit unscharfen Mengen	1026
15.3.5	Verknüpfung von unscharfen Relationen	1028
15.3.6	Verkettung (Komposition) von unscharfen Relationen	1030
15.3.7	Unschärfes Schließen (Fuzzy-Inferenz)	1034
15.4	Fuzzy-Regelungen und -Steuerungen (Fuzzy-Control)	1038
15.4.1	Anwendungsgebiete von Fuzzy-Reglern	1038
15.4.2	Arten von Fuzzy-Reglern	1039
15.4.3	Struktur und Komponenten von relationalen Fuzzy-Reglern	1039
15.4.3.1	Prinzipieller Aufbau	1039
15.4.3.2	Fuzzifizierung	1040
15.4.4	Inferenzkomponenten von Fuzzy-Reglern	1043
15.4.4.1	Regelbasis	1043
15.4.4.2	Teilschritte des Inferenzverfahrens	1046
15.4.4.3	Auswertung der Regelprämissen	1046
15.4.4.4	Regelaktivierung und Aggregation	1049
15.4.5	Defuzzifizierung	1055
15.4.5.1	Defuzzifizierungsverfahren	1055
15.4.5.2	Defuzzifizierung mit der maximalen Höhe der Zugehörigkeitsfunktion	1055
15.4.5.3	Defuzzifizierung mit Schwerpunktverfahren	1057
15.4.5.4	Allgemeines Schwerpunktverfahren	1057
15.4.5.5	Schwerpunktsummen-Verfahren für die Inferenz mit der SUM-MIN-, SUM-PROD-Methode	1060
15.4.5.6	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Rechteckfunktionen)	1065
15.4.5.7	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Singletons)	1068
15.4.5.8	Schwerpunktverfahren für erweiterte Zugehörigkeitsfunktionen	1070
15.4.6	Struktur und Komponenten von funktionalen Fuzzy-Reglern	1071
15.4.6.1	Unterschiede von relationalen und funktionalen Fuzzy-Reglern	1071
15.4.6.2	Prinzipieller Aufbau von funktionalen Fuzzy-Reglern	1073

15.5	Übertragungsverhalten von Fuzzy-Reglern	1075
15.5.1	Allgemeine Eigenschaften von Fuzzy-Reglern	1075
15.5.2	Kennlinien von Fuzzy-Reglern	1076
15.5.2.1	Einfluss der Defuzzifizierung	1076
15.5.2.2	Einstellung von linearen Übertragungsfunktionen	1078
15.5.2.3	Einstellung von nichtlinearen Übertragungsfunktionen	1081
15.5.3	Fuzzy-PID-Regler	1085
15.5.3.1	PID-ähnliche Fuzzy-Regler	1085
15.5.3.2	Fuzzy-P-Regler	1086
15.5.3.3	Fuzzy-PD-Regler	1090
15.5.3.4	Fuzzy-PI-Regler (Stellungsalgorithmus)	1095
15.5.3.5	Fuzzy-PI-Regler (Geschwindigkeitsalgorithmus)	1098
15.5.3.6	Fuzzy-PID-Regler	1099
15.5.4	Strukturen von Fuzzy-Regelkreisen	1101
15.5.4.1	Einsatz von Fuzzy-Komponenten	1101
15.5.4.2	Fuzzy-Regler als Ersatz für konventionelle Regler	1101
15.5.4.3	Erweiterung von konventionellen Regelkreisstrukturen mit Fuzzy-Komponenten (Fuzzy-Hybrid-Strukturen)	1102
16	Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB	1105
16.1	Allgemeines	1105
16.2	Einführung in MATLAB	1106
16.2.1	Einfache Berechnungen mit MATLAB	1106
16.2.2	Vektoren, Matrizen und Polynome – Eingabe und Grundoperationen	1109
16.2.2.1	Vektoren	1109
16.2.2.2	Matrizen	1111
16.2.2.3	Polynome	1113
16.2.2.4	Elementweise Multiplikation und Division von Vektoren und Matrizen	1115
16.2.3	m-Files	1115
16.2.3.1	Script-Files und Function-Files	1115
16.2.3.2	Script-Files	1116
16.2.3.3	Function-Files	1116
16.2.4	Kontrollstrukturen	1117
16.2.4.1	Arten von Kontrollstrukturen	1117
16.2.4.2	for-Schleife	1117
16.2.4.3	while-Schleife	1118
16.2.4.4	if-elseif-else-Struktur	1118
16.2.4.5	switch-case-otherwise-Struktur	1120
16.2.4.6	Verkürzung der Rechenzeit	1120
16.2.5	Nützliche Anweisungen: echo, keyboard, pause, type, what	1121
16.2.6	Grafische Darstellungen	1121
16.2.6.1	Zweidimensionale Grafiken	1121
16.2.6.2	Dreidimensionale Grafiken	1126
16.2.7	Tabellen wichtiger Standardfunktionen für MATLAB	1132
16.3	Objektorientierte Programmierung	1139
16.3.1	LTI-Objekte für lineare zeitinvariante Systeme	1139
16.3.2	Daten und Methoden für LTI-Objekte	1140
16.3.3	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Erzeugung und Konversion von LTI-Modellen	1147