



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.<sup>1</sup> 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 angegeben<sup>2</sup>, 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.

---

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

<sup>2</sup> 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](mailto: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](mailto:wolfgang.wendt@hs-esslingen.de)

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung in die Regelungstechnik</b>	<b>23</b>
1.1	Steuerungen und Regelungen	23
1.2	Begriffe der Regelungstechnik	24
<b>2</b>	<b>Hilfsmittel zur Darstellung von regelungstechnischen Strukturen</b>	<b>29</b>
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
<b>3</b>	<b>Mathematische Methoden zur Berechnung von Regelkreisen</b>	<b>45</b>
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
<b>4</b>	<b>Elemente von Regleinrichtungen und Regelstrecken</b> . . . . .	<b>117</b>
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 <sub>1</sub> -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 <sub>2</sub> -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 <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -, PPT <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -Element) . . . . .	165
4.4.5	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler, PDT <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -Regelstrecke) . . . . .	173
4.5.2.4	Integrale Regelstrecke mit Totzeit (IT <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -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
<b>5</b>		<b>Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen für Führungs- und Störverhalten</b>	<b>219</b>
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
<b>6</b>		<b>Stabilität von Regelkreisen</b>	<b>235</b>
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
<b>7</b>		<b>BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen</b>	<b>291</b>
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 <sub>1</sub> -Element)	294
	7.2.2.6	Proportional-Differenzial-Element (PD-Element)	295
	7.2.2.7	Totzeit-Element (PT <sub>z</sub> -Element)	296
	7.2.2.8	Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung (PT <sub>2</sub> -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
<b>8</b>	<b>Regleinrichtungen mit Operationsverstärkern</b> .....	<b>323</b>
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 <sub>1</sub> -Regler) .....	334
8.4.3.1	Invertierender PD/PDT <sub>1</sub> -Regler .....	334
8.4.3.2	Nichtinvertierender PD/PDT <sub>1</sub> -Regler .....	334
8.4.3.3	PD/PDT <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -Regler) .....	341
8.4.6.1	PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in additiver (paralleler) Form mit unabhängig voneinander einstellbaren Parametern .....	341
8.4.6.2	Invertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit einem Verstärker .....	342
8.4.6.3	Invertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit zwei Verstärkern .....	343
8.4.6.4	Invertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit Entkopplung .....	344
8.4.6.5	Nichtinvertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -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 <sub>1</sub> -Element mit invertierendem Trennverstärker . . . . .	347
8.6.2	PT <sub>1</sub> -Element mit nichtinvertierendem Trennverstärker . . . . .	349
8.7	Zusammenfassung . . . . .	350
<b>9</b>	<b>Ermittlung mathematischer Modelle für regelungstechnische Übertragungselemente (Identifikation)</b> . . . . .	<b>357</b>
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 Überschwingen 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 <sub>2</sub> -Elementen . . . . .	371
9.3.2.6.2	PT <sub>2</sub> -Elemente mit Vorhalt- oder Verzögerungselement . . . . .	377
9.3.2.7	Sprungantwortverläufe von Elementen mit Totzeit . . . . .	380
9.3.3	Sprungantwortverläufe mit Wendepunkt und ohne Überschwingen . . . . .	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
<b>10</b>	<b>Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise, erweiterte Regelkreisstrukturen</b>	<b>457</b>
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
<b>11</b>	<b>Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)</b>	<b>547</b>
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	Differenzengleichungen . . . . .	576
11.4.3	Lösung von Differenzengleichungen . . . . .	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
<b>12</b>	<b>Zustandsregelungen</b>	<b>697</b>
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	Regelungsnormalform	713
12.2.4.3	Beobachtungsnormalform	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 Beobachtungsnormalform	729
12.2.6.1	Allgemeine Form der Transformationsgleichungen	729
12.2.6.2	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Regelungsnormalform	730
12.2.6.3	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Beobachtungsnormalform	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
<b>13</b>	<b>Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik</b>	<b>779</b>
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 unterlagerter Momentenregelung	792
13.5.2.2.1	Berechnung des Drehzahlreglers	792
13.5.2.2.2	Führungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagerter Momentenregelung	793
13.5.2.3	Lageregelung mit unterlagerter Drehzahl- und Momentenregelung	795
13.5.2.3.1	Berechnung des Lagereglers	795
13.5.2.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter 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 unterlagerter Momentenregelung	800
13.5.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter 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
<b>14</b>	<b>Nichtlineare Regelungen</b>	<b>841</b>
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
<b>15</b>	<b>Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik</b>	<b>991</b>
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
<b>16</b>	<b>Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB</b>	<b>1105</b>
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