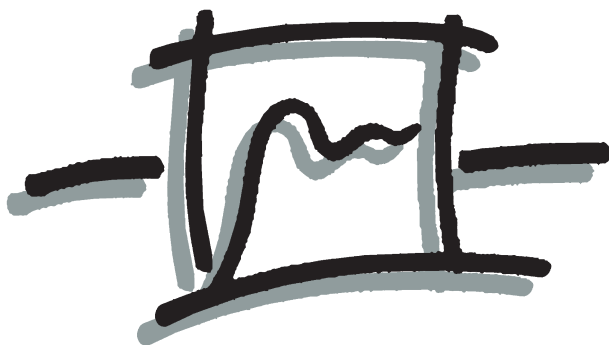


Lutz  
Wendt



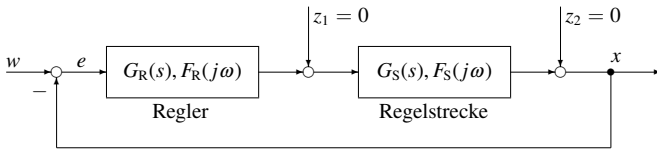
# TASCHENBUCH DER REGELUNGSTECHNIK

mit MATLAB und Simulink

Edition  
Harri  
Deutsch



## Gleichungen für das Führungsübertragungsverhalten



## Gleichungen für die Berechnung mit Übertragungsfunktionen

$$x(s) = G(s) \cdot w(s),$$

$$G(s) = \frac{x(s)}{w(s)} = \frac{G_R(s) \cdot G_S(s)}{1 + G_R(s) \cdot G_S(s)} = \frac{Z_R(s) \cdot Z_S(s)}{N_R(s) \cdot N_S(s) + Z_R(s) \cdot Z_S(s)}$$

$$e(s) = w(s) - x(s) = [1 - G(s)] \cdot w(s)$$

$$= \frac{1}{1 + G_R(s) \cdot G_S(s)} \cdot w(s) = \frac{N_R(s) \cdot N_S(s)}{N_R(s) \cdot N_S(s) + Z_R(s) \cdot Z_S(s)} \cdot w(s)$$

$$e(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot e(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s \cdot N_R(s) \cdot N_S(s)}{N_R(s) \cdot N_S(s) + Z_R(s) \cdot Z_S(s)} \cdot w(s)$$

## Gleichungen für die Berechnung mit Frequenzgangfunktionen

$$x(p) = F(p) \cdot w(p), \quad p := j\omega,$$

$$F(p) = \frac{x(p)}{w(p)} = \frac{F_R(p) \cdot F_S(p)}{1 + F_R(p) \cdot F_S(p)} = \frac{Z_R(p) \cdot Z_S(p)}{N_R(p) \cdot N_S(p) + Z_R(p) \cdot Z_S(p)}$$

$$e(p) = w(p) - x(p) = [1 - F(p)] \cdot w(p)$$

$$= \frac{1}{1 + F_R(p) \cdot F_S(p)} \cdot w(p) = \frac{N_R(p) \cdot N_S(p)}{N_R(p) \cdot N_S(p) + Z_R(p) \cdot Z_S(p)} \cdot w(p)$$

Bei Sprungaufschaltung  $w(t) = w_0 \cdot E(t)$  gilt:

$$e(t \rightarrow \infty) = \lim_{p \rightarrow 0} [1 - F(p)] \cdot w_0 = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{N_R(p) \cdot N_S(p)}{N_R(p) \cdot N_S(p) + Z_R(p) \cdot Z_S(p)} \cdot w_0$$

<b>1</b>	<b>Einführung in die Regelungstechnik.....</b>	<b>23</b>	<b>⇒</b>
<b>2</b>	<b>Darstellung von regelungstechnischen Strukturen.....</b>	<b>29</b>	<b>⇒</b>
<b>3</b>	<b>Berechnungsmethoden für Regelkreise .....</b>	<b>45</b>	<b>⇒</b>
<b>4</b>	<b>Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken .....</b>	<b>117</b>	<b>⇒</b>
<b>5</b>	<b>Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen.....</b>	<b>219</b>	<b>⇒</b>
<b>6</b>	<b>Stabilität von Regelkreisen .....</b>	<b>235</b>	<b>⇒</b>
<b>7</b>	<b>BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen .....</b>	<b>291</b>	<b>⇒</b>
<b>8</b>	<b>Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern.....</b>	<b>323</b>	<b>⇒</b>
<b>9</b>	<b>Mathematische Modelle für die Regelungstechnik .....</b>	<b>357</b>	<b>⇒</b>
<b>10</b>	<b>Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise.....</b>	<b>457</b>	<b>⇒</b>
<b>11</b>	<b>Digitale Regelungssysteme .....</b>	<b>547</b>	<b>⇒</b>
<b>12</b>	<b>Zustandsregelungen.....</b>	<b>729</b>	<b>⇒</b>
<b>13</b>	<b>Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik .....</b>	<b>811</b>	<b>⇒</b>
<b>14</b>	<b>Nichtlineare Regelungen.....</b>	<b>873</b>	<b>⇒</b>
<b>15</b>	<b>Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik .....</b>	<b>1023</b>	<b>⇒</b>
<b>16</b>	<b>Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB.....</b>	<b>1137</b>	<b>⇒</b>
<b>17</b>	<b>Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink.....</b>	<b>1271</b>	<b>⇒</b>
<b>18</b>	<b>Numerische Verfahren für die Regelungstechnik .....</b>	<b>1473</b>	<b>⇒</b>
<b>19</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>	<b>1489</b>	<b>⇒</b>
<b>20</b>	<b>Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik .....</b>	<b>1503</b>	<b>⇒</b>
	<b>Regelungstechnische Begriffe – englisch und deutsch</b>		
	<b>Sachwortverzeichnis .....</b>	<b>1543</b>	<b>⇒</b>



# **Taschenbuch der Regelungstechnik**

**mit MATLAB und Simulink**





Edition  
Harri   
Deutsch 

# Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink

von

Prof. Dr.-Ing. Holger Lutz  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wendt

**11., 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 graduiertes 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

11., ergänzte Auflage 2019

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5869-0

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

© 2019 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Grünten  
<https://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Druck: Legatoria Editoriale Giovanni Olivetto S.p.A., 36100 Vicenza, Italia



# 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<sup>®</sup> durch das Programmpaket Simulink<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup> und Simulink<sup>®</sup> werden in Deutschland von The MathWorks GmbH, 85737 Ismaning, vertrieben.

<sup>2</sup> Die im Buch verwendeten m-, mdl- und slx-Files können aus dem Internet heruntergeladen werden:

<https://www.europa-lehrmittel.de/56788.html>

<https://www.thm.de/iem/fachbereich/team/ehemalige/content/979-holger-lutz-17280-downloadbereich-lutz.html>

Autoren und Verlag Europa-Lehrmittel

Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG

Düsselberger Str. 23

42781 Haan-Gruiten

lektorat@europa-lehrmittel.de

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

E-Mail: [holger.lutz@iem.thm.de](mailto:holger.lutz@iem.thm.de)

<https://www.thm.de/iem/fachbereich/team/ehemalige/profile/979-holger-lutz-17.html>

E-Mail: [wolfgang.wendt@hs-esslingen.de](mailto:wolfgang.wendt@hs-esslingen.de)

# 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 Integrationsssatz	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	<b>Frequenzgang von Übertragungselementen</b>	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	<b>Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken</b>	117
4.1	Einteilung und Darstellung der Regelkreiselemente	117
4.2	<b>Proportional-Element ohne Verzögerung</b>	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	<b>Proportional-Elemente mit Verzögerung</b>	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	<b>Standardisierte Parameter von Übertragungsfunktionen</b>	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	<b>Gleichungen und Symbole für Regelkreiselemente</b>	212
4.7.1	Differenzialgleichungen von Regelkreiselementen	212
4.7.2	Frequenzgangfunktionen von Regelkreiselementen	214
4.7.3	Übertragungsfunktionen von Regelkreiselementen	216
5	<b>Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen für Führungs- und Störverhalten</b>	219
5.1	<b>Gleichungen für Regelkreise mit direkter Gegenkopplung</b>	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	221
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	<b>Ausregelbarkeit von Störungen</b>	228
5.3	<b>Gleichungen für Regelkreise mit indirekter Gegenkopplung</b>	229
5.4	<b>Stationäre Regelfehler höherer Ordnung</b>	232
6	<b>Stabilität von Regelkreisen</b>	235
6.1	<b>Entstehung des Stabilitätsproblems bei Regelkreisen</b>	235
6.2	<b>Definition der Stabilität</b>	236
6.3	<b>Verfahren zur Stabilitätsbestimmung</b>	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		<b>Wurzelortskurven</b>	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		<b>BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen</b>	<b>291</b>
7.1		Einleitung	291
7.2		<b>BODE-Diagramme</b>	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>1</sub> -Element)	296
	7.2.2.8	Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung (PT <sub>2</sub> -Element)	296
7.3		<b>Stabilitätsgrenze im BODE-Diagramm</b>	299
	7.3.1	Vergleich mit der Ortskurvendarstellung	299
	7.3.2	Amplitudenreserve und Phasenreserve	300
7.4		<b>Anwendung des BODE-Verfahrens</b>	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 phasenanhebenden 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 .....	320
<b>8</b>	<b>Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern</b> .....	<b>323</b>
8.1	Prinzipieller Aufbau .....	323
8.1.1	Aufgaben von Regeleinrichtungen .....	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 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 <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 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
<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, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	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 <sub>1</sub> -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 <sub>n</sub> -Regelstrecken mit einer großen Zeitkonstanten .....	525
10.5.4.2	PT <sub>n</sub> -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	<b>Erweiterte Regelkreisstrukturen</b> .....	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	<b>Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)</b> .....	547
11.1	<b>Prinzipielle Arbeitsweise von digitalen Regelkreisen</b> .....	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	<b>Basisalgorithmen für digitale Regelungen</b> .....	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 .....	555
11.2.3.3	Einfache Differenzialalgorithmen .....	556
11.2.3.4	Differenzialalgorithmen mit Verzögerung I. Ordnung (Filterung) .....	558
11.2.3.5	Differenzialalgorithmen mit Mittelwertbildung .....	559
11.2.4	Regelalgorithmen für Standardregler .....	560
11.2.4.1	PID-Stellungsalgorithmus .....	560
11.2.4.2	PID-Geschwindigkeitsalgorithmus, Regler mit Pulsweitenmodulation ...	561
11.2.4.3	Differenzengleichungen von Basis- und Standardregelalgorithmen ...	567
11.2.4.4	PID-Regelalgorithmus mit modifiziertem Differenzial-Anteil .....	580
11.3	<b>Einstellregeln für digitale Regelkreise</b> .....	581
11.3.1	Quasikontinuierliche digitale Regelkreise .....	581
11.3.2	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen der Regelstrecke .....	581
11.3.3	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen des Regelkreises .....	583
11.3.4	Einstellregeln mit Berücksichtigung der Abtastzeit .....	587
11.4	<b>Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Zeitbereich</b> .....	589
11.4.1	Allgemeines .....	589
11.4.2	Differenzengleichungen .....	589
11.4.3	Lösung von Differenzengleichungen .....	590
11.4.3.1	Ermittlung der Lösung durch Rekursion .....	590
11.4.3.2	Lösung mit homogenem und partikulärem Ansatz .....	592
11.4.4	Stabilität von Abtastsystemen im Zeitbereich .....	595
11.5	<b>Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Frequenzbereich</b> ..	596
11.5.1	Technische und mathematische Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen ...	596
11.5.1.1	Allgemeines .....	596

11.5.1.2	Abtastung von kontinuierlichen Signalen	597
11.5.1.3	Darstellung von zeitdiskreten Signalen durch Folgen	599
11.5.1.4	Ausführung des Regelalgorithmus (Berechnung der Stellgröße)	600
11.5.1.5	Speicherung der diskreten Stellgröße (Halteglied)	600
11.5.2	$z$ -Transformation	603
11.5.2.1	Einleitung	603
11.5.2.2	Definition der $z$ -Transformation	603
11.5.2.3	Rechenregeln der $z$ -Transformation	605
11.5.2.4	Tabellen zur $z$ -Transformation	612
11.5.2.5	Anwendung der Tabellen zur $z$ -Transformation	637
11.5.3	Inverse $z$ -Transformation ( $z$ -Rücktransformation)	638
11.5.3.1	Verfahren zur $z$ -Rücktransformation	638
11.5.3.2	Rücktransformation mit dem komplexen Umkehrintegral	639
11.5.3.3	Partialbruchzerlegung, Rücktransformation mit Tabelle	639
11.5.3.4	Rücktransformation mit der Potenzreihenentwicklung	641
11.5.3.5	Berechnung der Impulsfunktion mit Rekursion	642
11.5.4	$z$ -Übertragungsfunktionen (Impulsübertragungsfunktionen)	643
11.5.4.1	$z$ -Übertragungsfunktionen von zeitdiskreten Elementen	643
11.5.4.2	$z$ -Übertragungsfunktionen von Basis- und Standardregelalgorithmen	644
11.5.4.3	$z$ -Übertragungsfunktionen von zeitkontinuierlichen Elementen	665
11.5.4.4	Tabelle von $z$ -Übertragungsfunktionen für zeitkontinuierliche Elemente (Regelstrecken mit Halteglied)	667
11.5.4.5	Eigenschaften von $z$ -Übertragungsfunktionen	671
11.5.4.6	Normierte Testfolgen für $z$ -Übertragungsfunktionen	674
11.5.4.7	Umformungsregeln für $z$ -Übertragungsfunktionen	675
11.5.4.7.1	Voraussetzungen für die Anwendung der Umformungsregeln	675
11.5.4.7.2	Einfache Strukturen	676
11.5.4.7.3	Reihenschaltung von Übertragungselementen	677
11.5.4.7.4	Parallelschaltung von Übertragungselementen	678
11.5.4.7.5	Kreisstrukturen	678
11.5.4.8	$z$ -Übertragungsfunktionen von digitalen Regelkreisen	679
11.5.4.8.1	Voraussetzungen	679
11.5.4.8.2	Führungsübertragungsverhalten	680
11.5.4.8.3	Störungsübertragungsverhalten (Versorgungsstörgröße)	680
11.5.4.8.4	Störungsübertragungsverhalten (Laststörgröße)	682
11.5.4.8.5	Berechnung von $z$ -Übertragungsfunktionen	683
11.6	<b>Stabilität von digitalen Regelungssystemen</b>	686
11.6.1	Stabilitätsdefinition	686
11.6.2	Verfahren zur Stabilitätsbestimmung	688
11.6.2.1	Stabilitätskriterien	688
11.6.2.2	Anwendung der Bilineartransformation	689
11.6.2.3	Koeffizientenkriterien (Bilineartransformation)	692
11.6.2.4	Stabilitätskriterium von JURY	695
11.7	<b>Kompensationsregler für digitale Regelkreise</b>	697
11.7.1	Prinzip der Kompensation	697
11.7.2	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit (Dead-Beat-Regler)	698
11.7.3	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit mit Vorgabe des ersten Stellgrößenwerts	710

11.8	Diskretisierung von kontinuierlichen Übertragungsfunktionen	715
11.8.1	Anwendung von Diskretisierungsverfahren	715
11.8.2	Substitutionsverfahren	716
11.8.3	Stabilität der Verfahren	723
11.8.4	Systemantwortinvariante Transformationen	726
11.8.4.1	Invariante Systemreaktionen im Zeitbereich	726
11.8.4.2	Impulsinvariante Transformation	727
11.8.4.3	Sprunginvariante Transformation	727
<b>12</b>	<b>Zustandsregelungen</b>	<b>729</b>
12.1	Allgemeines	729
12.2	Mathematische Methoden zur Berechnung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	730
12.2.1	Beschreibung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	730
12.2.1.1	Allgemeine Form des Gleichungssystems	730
12.2.1.2	Beschreibung linearer Mehrgrößensysteme mit Zustandsvariablen	731
12.2.1.3	Beschreibung linearer Eingrößensysteme mit Zustandsvariablen	735
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich	737
12.2.2.1	Berechnung der Matrix-e-Funktion	737
12.2.2.2	Differenziation der Matrix-e-Funktion	738
12.2.2.3	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	738
12.2.2.4	Transitionsmatrix	739
12.2.3	Lösung der Zustandsgleichung im Frequenzbereich	743
12.2.4	Normalformen von Übertragungssystemen	745
12.2.4.1	Allgemeines	745
12.2.4.2	Regelungsnormalform	745
12.2.4.3	Beobachtungsnormalform	750
12.2.4.4	Zusammenfassung	755
12.2.5	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit von Übertragungssystemen	755
12.2.5.1	Steuerbarkeit	755
12.2.5.2	Beobachtbarkeit	757
12.2.5.3	Untersuchung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit eines Regelungssystems	759
12.2.6	Transformation auf Regelungs- und Beobachtungsnormalform	761
12.2.6.1	Allgemeine Form der Transformationsgleichungen	761
12.2.6.2	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Regelungsnormalform	762
12.2.6.3	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Beobachtungsnormalform	764
12.3	Regelung durch Zustandsrückführung	766
12.3.1	Allgemeines	766
12.3.2	Berechnung von Zustandsregelungen	767
12.3.2.1	Ermittlung von Zustandsreglern durch Polvorgabe	767
12.3.2.2	Berechnung des Vorfilters	769
12.3.3	Zustandsregelung mit Beobachter	776
12.3.3.1	Prinzipielle Arbeitsweise von Beobachtern	776
12.3.3.2	Ermittlung von Zustandsbeobachtern durch Polvorgabe	780
12.3.4	Systematische Vorgehensweise bei der Berechnung von Zustandsreglern und Zustandsbeobachtern	786
12.3.5	Zusammenfassung	786

12.4	Regelungen durch Zustandsrückführung mit verbessertem Störungsverhalten	787
12.4.1	Allgemeines	787
12.4.2	Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	788
12.4.2.1	Berechnung des Zustandsreglers mit Vorfilter	788
12.4.2.2	Störungsverhalten der Zustandsregelung	790
12.4.2.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	792
12.4.2.4	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	797
12.4.3	Proportional-Integral-(PI)-Zustandsregelung	797
12.4.3.1	Zustandsgleichungen für die PI-Zustandsregelung	797
12.4.3.2	Berechnung der Zustandsregelung mit überlagertem PI-Regler	801
12.4.3.3	Störungsverhalten der PI-Zustandsregelung	805
12.4.4	Robuste Regelung – Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung	806
12.4.4.1	Begriff der robusten Regelung	806
12.4.4.2	Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung auf Robustheit	806
12.4.5	Zusammenfassung	809
<b>13</b>	<b>Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik</b>	<b>811</b>
13.1	Allgemeines	811
13.2	Regelstrecken für elektrische Antriebe	811
13.2.1	Mathematisches Modell der Regelstrecke	811
13.2.1.1	Elektrischer Teil der Regelstrecke	811
13.2.1.2	Mechanischer Teil der Regelstrecke	814
13.2.2	Vereinfachung der Regelstrecke	816
13.3	Zeitverläufe von Führungs- und Störgrößen bei Antriebsregelungen von Drehmaschinen	817
13.4	Einschleifige Lageregelung	819
13.4.1	Berechnung des Lagereglers	819
13.4.2	Führungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	820
13.4.3	Störungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	822
13.5	Lageregelung mit Kaskadenstruktur	823
13.5.1	Allgemeines	823
13.5.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	823
13.5.2.1	Berechnung des Momentenreglers	823
13.5.2.2	Drehzahlregelung mit unterlagertem Momentenregelung	824
13.5.2.2.1	Berechnung des Drehzahlreglers	824
13.5.2.2.2	Führungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagertem Momentenregelung	825
13.5.2.3	Lageregelung mit unterlagertem Drehzahl- und Momentenregelung	827
13.5.2.3.1	Berechnung des Lagereglers	827
13.5.2.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagertem Drehzahl- und Momentenregelung	829
13.5.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	831
13.5.3.1	Störungsverhalten der Regelstrecke	831
13.5.3.2	Störungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagertem Momentenregelung	832
13.5.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagertem Drehzahl- und Momentenregelung	834

13.6	Zusammenfassung	835
13.7	Digitale Lageregelung mit Kaskadenstruktur	836
13.7.1	Allgemeines	836
13.7.2	Digitale Winkelgeschwindigkeitsregelung (Drehzahlregelung) mit unterlagerter Momentenregelung	836
13.7.2.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	836
13.7.2.2	Führungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagerter Momentenregelung	837
13.7.2.3	Störungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagerter Momentenregelung	840
13.7.3	Digitale Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	841
13.7.3.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	841
13.7.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	841
13.7.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	842
13.7.4	Zusammenfassung	843
13.8	Lageregelung mit Zustandsregler	843
13.8.1	Allgemeines	843
13.8.2	Berechnung der Zustandsregelung	843
13.8.2.1	Ermittlung des Zustandsreglers durch Polvorgabe	843
13.8.2.2	Berechnung des Vorfilters für den Zustandsregler	847
13.8.2.3	Sprungverhalten der Lageregelung mit Zustandsregler	848
13.8.2.4	Stellgliedzeitkonstante und Stellgrößenaufwand	850
13.8.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	852
13.8.3.1	Struktur des Zustands- und Störgrößenbeobachters	852
13.8.3.2	Ermittlung des Beobachters durch Polvorgabe	854
13.8.3.3	Berechnung des Vorfilters für die Störgrößenaufschaltung	857
13.8.3.4	Dynamisches Verhalten des Beobachters	858
13.8.3.5	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter und Störgrößenaufschaltung	860
13.8.4	Zustandslageregelung mit Störgrößenaufschaltung	861
13.9	Digitale Drehzahl- und Lageregelungen mit Zustandsregler	863
13.9.1	Zustandsdarstellung für digitale Regelungen	863
13.9.2	Digitale Drehzahlregelung mit Zustandsregler	863
13.9.3	Digitale Integral-Zustandslageregelung	869
13.10	Zusammenfassung	872
14	<b>Nichtlineare Regelungen</b>	<b>873</b>
14.1	Einleitung	873
14.1.1	Verfahren zur Untersuchung nichtlinearer Systeme	873
14.1.2	Definition der Nichtlinearität	873
14.1.3	Lineare und nichtlineare Operationen	875
14.1.4	Eigenschaften von nichtlinearen Regelkreiselementen und -systemen	878
14.2	Grundtypen von nichtlinearen Elementen, prinzipielle Eigenschaften von nichtlinearen Funktionen	885
14.3	Verfahren der Linearisierung	888
14.3.1	Allgemeines	888

14.3.2	Linearisierung mit inversen Kennlinien	888
14.3.3	Linearisierung durch Rückführung	890
14.3.4	Linearisierung im Arbeitspunkt (Tangentenlinearisierung), Vernachlässigung höherer Ableitungen der TAYLOR-Reihe	892
14.3.5	Harmonische Linearisierung mit der Beschreibungsfunktion, Vernachlässigung von höheren Harmonischen der FOURIER-Reihe	893
14.3.5.1	Grundlage des Verfahrens	893
14.3.5.2	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit eindeutigen Kennlinienfunktionen	896
14.3.5.3	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit mehrdeutigen Kennlinienfunktionen	905
14.3.5.4	Direkte Berechnung von Beschreibungsfunktionen aus Kennlinienfunktionen	909
14.3.5.5	Rechenregeln für Beschreibungsfunktionen	914
14.3.5.6	Beschreibungsfunktionen von Kennlinienelementen (Tabelle)	923
14.3.5.7	Berechnung der Gleichung der Harmonischen Balance	951
14.3.5.8	Stabilität von Grenzschwingungen	962
14.4	Untersuchung der Stabilität nichtlinearer Systeme	966
14.4.1	Methode der Phasenebene (Zustandsebene)	966
14.4.2	Eigenschaften von Zustandskurven in der Phasenebene	967
14.4.3	Berechnung von linearen Systemen II. Ordnung im Zeitbereich und in der Phasenebene	968
14.4.4	Ruhelagen von linearen und nichtlinearen Systemen	972
14.4.5	Stabilität von Ruhelagen	972
14.4.6	Berechnung der Stabilität von Ruhelagen	976
14.4.7	Stabilitätsuntersuchung mit der direkten Methode von LJAPUNOW	980
14.4.7.1	Grundgedanke der direkten Methode	980
14.4.7.2	Stabilitätsuntersuchung mit der LJAPUNOW-Funktion	982
14.4.8	Stabilitätskriterium von POPOW	984
14.4.8.1	Absolute Stabilität	984
14.4.8.2	Numerische Form des POPOW-Kriteriums	985
14.4.8.3	Ortskurvenform des POPOW-Kriteriums	988
14.5	Regelkreise mit schaltenden Reglern	990
14.5.1	Anwendung von schaltenden Reglern	990
14.5.2	Regelkreise mit Zweipunktreglern	992
14.5.2.1	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und proportionalen Regelstrecken	992
14.5.2.2	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken mit Totzeit	996
14.5.2.3	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken ohne Totzeit	1004
14.5.2.4	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und Regelstrecken mit Integral-Anteil	1005
14.5.3	Berechnung von Regelkreisen mit Dreipunktreglern	1010
14.5.4	Schaltende Regler mit Rückführung	1013
14.5.4.1	Eigenschaften von quasistetigen Reglern	1013
14.5.4.2	Einfluss der Rückführung bei schaltenden Reglern	1014
14.5.4.3	Quasistetige Standardregler (Regler mit Rückführung)	1017
15	Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelstechnik	1023
15.1	Grundbegriffe der Fuzzy-Logik	1023
15.1.1	Scharfe und unscharfe Mengen, Zugehörigkeitsfunktionen	1023



15.1.2	Beschreibung von scharfen und unscharfen Mengen	1024
15.1.2.1	Beschreibungsformen von scharfen Mengen	1024
15.1.2.2	Beschreibungsformen von unscharfen Mengen	1025
15.1.3	Darstellung von unscharfen Mengen mit Zugehörigkeitsfunktionen	1028
15.1.4	Linguistische Variablen und Werte	1032
15.1.4.1	Linguistische Variablen zur Beschreibung von unscharfen Aussagen	1032
15.1.4.2	Struktur von linguistischen Variablen, linguistische Operatoren	1034
15.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1040
15.2.1	Elementaroperationen mit scharfen Mengen	1040
15.2.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1041
15.2.2.1	Elementaroperationen mit unscharfen Mengen	1041
15.2.2.2	Allgemeine Anforderungen an Fuzzy-Operatoren	1044
15.2.2.3	$t$ -Normen und $t$ -Konormen ( $s$ -Normen)	1046
15.2.2.4	Parametrisierte $t$ -Normen und $t$ -Konormen	1051
15.2.2.5	Kompensatorische und mittelnde Operatoren	1052
15.3	Unschärfe Relationen	1055
15.3.1	Einstellige Relationen	1055
15.3.2	Scharfe Relationen mit scharfen Mengen	1056
15.3.3	Unschärfe Relationen mit scharfen Mengen	1057
15.3.4	Unschärfe Relationen mit unscharfen Mengen	1058
15.3.5	Verknüpfung von unscharfen Relationen	1060
15.3.6	Verkettung (Komposition) von unscharfen Relationen	1062
15.3.7	Unschärfes Schließen (Fuzzy-Inferenz)	1066
15.4	Fuzzy-Regelungen und -Steuerungen (Fuzzy-Control)	1070
15.4.1	Anwendungsgebiete von Fuzzy-Reglern	1070
15.4.2	Arten von Fuzzy-Reglern	1071
15.4.3	Struktur und Komponenten von relationalen Fuzzy-Reglern	1071
15.4.3.1	Prinzipieller Aufbau	1071
15.4.3.2	Fuzzifizierung	1072
15.4.4	Inferenzkomponenten von Fuzzy-Reglern	1075
15.4.4.1	Regelbasis	1075
15.4.4.2	Teilschritte des Inferenzverfahrens	1078
15.4.4.3	Auswertung der Regelprämissen	1078
15.4.4.4	Regelaktivierung und Aggregation	1081
15.4.5	Defuzzifizierung	1087
15.4.5.1	Defuzzifizierungsverfahren	1087
15.4.5.2	Defuzzifizierung mit der maximalen Höhe der Zugehörigkeitsfunktion	1087
15.4.5.3	Defuzzifizierung mit Schwerpunktverfahren	1089
15.4.5.4	Allgemeines Schwerpunktverfahren	1089
15.4.5.5	Schwerpunktsummen-Verfahren für die Inferenz mit der SUM-MIN-, SUM-PROD-Methode	1092
15.4.5.6	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Rechteckfunktionen)	1097
15.4.5.7	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Singletons)	1100
15.4.5.8	Schwerpunktverfahren für erweiterte Zugehörigkeitsfunktionen	1102
15.4.6	Struktur und Komponenten von funktionalen Fuzzy-Reglern	1103
15.4.6.1	Unterschiede von relationalen und funktionalen Fuzzy-Reglern	1103
15.4.6.2	Prinzipieller Aufbau von funktionalen Fuzzy-Reglern	1105

15.5	<b>Übertragungsverhalten von Fuzzy-Reglern</b>	1107
15.5.1	Allgemeine Eigenschaften von Fuzzy-Reglern	1107
15.5.2	Kennlinien von Fuzzy-Reglern	1108
15.5.2.1	Einfluss der Defuzzifizierung	1108
15.5.2.2	Einstellung von linearen Übertragungsfunktionen	1110
15.5.2.3	Einstellung von nichtlinearen Übertragungsfunktionen	1113
15.5.3	Fuzzy-PID-Regler	1117
15.5.3.1	PID-ähnliche Fuzzy-Regler	1117
15.5.3.2	Fuzzy-P-Regler	1118
15.5.3.3	Fuzzy-PD-Regler	1122
15.5.3.4	Fuzzy-PI-Regler (Stellungsalgorithmus)	1127
15.5.3.5	Fuzzy-PI-Regler (Geschwindigkeitsalgorithmus)	1130
15.5.3.6	Fuzzy-PID-Regler	1131
15.5.4	Strukturen von Fuzzy-Regelkreisen	1133
15.5.4.1	Einsatz von Fuzzy-Komponenten	1133
15.5.4.2	Fuzzy-Regler als Ersatz für konventionelle Regler	1133
15.5.4.3	Erweiterung von konventionellen Regelkreisstrukturen mit Fuzzy-Komponenten (Fuzzy-Hybrid-Strukturen)	1134
<b>16</b>	<b>Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB</b>	<b>1137</b>
16.1	Allgemeines	1137
16.2	<b>Einführung in MATLAB</b>	1138
16.2.1	Einfache Berechnungen mit MATLAB	1138
16.2.2	Vektoren, Matrizen und Polynome – Eingabe und Grundoperationen	1141
16.2.2.1	Vektoren	1141
16.2.2.2	Matrizen	1143
16.2.2.3	Polynome	1145
16.2.2.4	Elementweise Multiplikation und Division von Vektoren und Matrizen	1147
16.2.3	m-Files	1147
16.2.3.1	Script-Files und Function-Files	1147
16.2.3.2	Script-Files	1148
16.2.3.3	Function-Files	1148
16.2.4	Kontrollstrukturen	1149
16.2.4.1	Arten von Kontrollstrukturen	1149
16.2.4.2	for-Schleife	1149
16.2.4.3	while-Schleife	1150
16.2.4.4	if-elseif-else-Struktur	1150
16.2.4.5	switch-case-otherwise-Struktur	1152
16.2.4.6	Verkürzung der Rechenzeit	1152
16.2.5	Nützliche Anweisungen: echo, keyboard, pause, type, what	1153
16.2.6	Grafische Darstellungen	1153
16.2.6.1	Zweidimensionale Grafiken	1153
16.2.6.2	Dreidimensionale Grafiken	1158
16.2.7	Tabellen wichtiger Standardfunktionen für MATLAB	1164
<b>16.3</b>	<b>Objektorientierte Programmierung</b>	<b>1171</b>
16.3.1	LTI-Objekte für lineare zeitinvariante Systeme	1171
16.3.2	Daten und Methoden für LTI-Objekte	1172
16.3.3	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Erzeugung und Konversion von LTI-Modellen	1179

16.4	Umformung von Signalflussplänen	1179
16.4.1	Allgemeines	1179
16.4.2	Kettenstruktur	1180
16.4.3	Parallelstruktur	1180
16.4.4	Kreisstrukturen	1181
16.4.4.1	Struktur mit indirekter Gegenkopplung	1181
16.4.4.2	Struktur mit direkter Gegenkopplung	1182
16.4.5	Ermittlung von Führungs- und Störungsübertragungsfunktionen für Signalflusspläne	1182
16.4.6	Umformung vermaschter Signalflusspläne	1183
16.4.7	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Umformung von Signalflussplänen	1185
16.5	Berechnung von Regelungen im Zeitbereich	1185
16.5.1	Allgemeines	1185
16.5.2	Impulsantwort	1186
16.5.3	Sprungantwort	1187
16.5.4	Anstiegsantwort	1188
16.5.5	Sinusantwort	1190
16.5.6	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Regelungen im Zeitbereich	1191
16.6	Berechnung von Regelungen im Frequenzbereich	1192
16.6.1	Eigenschaften von Übertragungsfunktionen	1192
16.6.1.1	Übertragungsfunktion und Pol-Nullstellenplan	1192
16.6.1.2	Partialbruchzerlegung	1195
16.6.1.3	Übertragungsfunktion und Wurzelortskurve	1197
16.6.2	Frequenzgang und Ortskurve	1200
16.6.2.1	Ortskurve für ein $PT_1$ - und ein $PT_2$ -Element	1200
16.6.2.2	Ortskurve eines offenen Regelkreises	1201
16.6.3	Frequenzgang und BODE-Diagramm	1203
16.6.3.1	BODE-Diagramm eines $PIDT_1$ -Reglers	1203
16.6.3.2	Amplituden- und Phasenreserve eines Regelkreises	1204
16.6.3.3	BODE-Diagramm für ein $PT_2$ -Element bei verschiedenen Dämpfungen	1207
16.6.4	Berechnung von LAPLACE-Transformationen und -Rücktransformationen mit der <i>Symbolic Math Toolbox</i> von MATLAB	1209
16.6.5	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Regelungen im Frequenzbereich	1213
16.7	Berechnung von digitalen Regelungssystemen mit MATLAB	1214
16.7.1	Allgemeines	1214
16.7.2	Bestimmung der $z$ -Übertragungsfunktion für verschiedene Diskretisierungsverfahren	1215
16.7.3	Wahl der Abtastzeit für ein Übertragungssystem	1217
16.7.4	Untersuchung des Zeitverhaltens von digitalen Regelungen	1219
16.7.4.1	Wahl der Abtastzeit	1219
16.7.4.2	Ermittlung der $z$ -Übertragungsfunktion	1219
16.7.4.3	Impulsantwortfolge	1221
16.7.4.4	Sprungantwortfolge	1222
16.7.4.5	Anstiegsantwortfolge	1224
16.7.5	Reglerauslegung bei Nichterfüllung des Abtastzeitkriteriums	1225
16.7.6	Dead-Beat-Regelung für sprungförmige Führungsgrößen	1227

16.7.7	$z$ -Übertragungsfunktion und Pol-Nullstellenplan	1229
16.7.7.1	Dämpfung und Kennkreisfrequenz von Übertragungsfunktionen mit konjugiert komplexen Nullstellen	1229
16.7.7.2	Pol-Nullstellenplan für $z$ -Übertragungsfunktionen	1230
16.7.7.3	$z$ -Übertragungsfunktion und Wurzelortskurve	1231
16.7.8	Berechnung von $z$ -Transformationen und -Rücktransformationen mit der <i>Symbolic Math Toolbox</i> von MATLAB	1234
16.7.9	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von digitalen Regelungssystemen	1242
<b>16.8</b>	<b>Berechnung von Zustandsregelungen mit MATLAB</b>	<b>1243</b>
16.8.1	Allgemeines	1243
16.8.2	Signalflussstrukturen mit Zustandsmodellen	1243
16.8.3	Lösung der Zustandsgleichung	1245
16.8.3.1	Lösung der homogenen Zustandsgleichung	1245
16.8.3.2	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	1246
16.8.4	Modellkonversion: Übertragungsfunktion und Zustandsdarstellung	1248
16.8.5	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	1250
16.8.5.1	Untersuchung eines Regelungssystems auf Steuerbarkeit	1250
16.8.5.2	Untersuchung eines Regelungssystems auf Beobachtbarkeit	1251
16.8.6	Ähnlichkeitstransformationen	1253
16.8.6.1	Transformation auf Regelungsnormalform	1253
16.8.6.2	Transformation auf Beobachtungsnormalform	1254
16.8.7	Zustandsregelungen	1255
16.8.7.1	Zustandsregelung einer $PT_2$ -Regelstrecke	1255
16.8.7.2	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter	1257
16.8.8	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Zustandsregelungen	1262
<b>16.9</b>	<b>Grafisches User Interface Linear System Analyzer</b>	<b>1263</b>
<b>16.10</b>	<b>Grafisches User Interface Control System Designer</b>	<b>1267</b>
<b>17</b>	<b>Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink</b>	<b>1271</b>
<b>17.1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>1271</b>
<b>17.2</b>	<b>Einführung in Simulink</b>	<b>1271</b>
17.2.1	Modellbildung und Simulation einer Drehzahlregelung	1271
17.2.1.1	Start von Simulink	1271
17.2.1.2	Kopieren der Blöcke in das Simulink-Arbeitsfenster	1273
17.2.1.3	Modifizieren der Blöcke	1273
17.2.1.4	Einfügen von Wirkungslinien und Text	1274
17.2.1.5	Aufzeichnen der Sprungantwort	1275
17.2.2	Erstellung von Signalflussplänen mit Simulink	1276
17.2.2.1	Allgemeines	1276
17.2.2.2	Editieren von Blöcken	1276
17.2.2.3	Wirkungslinien editieren	1277
17.2.2.4	Kommentar einfügen	1280
<b>17.3</b>	<b>Simulation zeitkontinuierlicher Regelungen</b>	<b>1281</b>
17.3.1	Allgemeines	1281
17.3.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Continuous Block Library	1281
17.3.2.1	Sprungantwort mit Step-, Integrator-, Mux- und Scope-Block	1281
17.3.2.2	Anstiegsantwort mit Ramp-, Derivative- und Scope-Block	1283

17.3.2.3	Impulsantwort mit Step-, Sum-, Transfer Fcn-, Mux- und Scope-Block	1285
17.3.2.4	Anstiegsantwort mit Ramp-, Transport Delay-, Zero-Pole-, Mux- und Scope-Block	1286
17.3.2.5	Regelkreis mit Gain-, State-Space- und Floating Scope-Block	1286
17.3.3	Geschwindigkeitsregelung mit trapezförmigem Führungsgrößenprofil	1288
17.3.4	Ermittlung eines Zustandsmodells mit der Funktion linmod	1290
17.3.5	Streckensteuerung für eine Linearachse	1291
17.3.6	Streckensteuerung für eine Linearachse mit Führungsgrößenvorsteuerung	1294
17.3.7	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben	1295
17.3.8	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben und Führungsgrößenvorsteuerung	1300
17.4	<b>Simulation und Programmierung mit Simulink</b>	1301
17.4.1	Ablauf einer Simulation	1301
17.4.2	Algebraische Schleifen	1302
17.4.3	Numerische Lösungsverfahren und Simulations-Parameter für Simulink-Modelle	1304
17.4.3.1	Numerische Lösungsverfahren	1304
17.4.3.2	Simulations-Parameter	1305
17.4.3.3	Simulation einer Lageregelung mit Zerspanungsprozess (steifes System)	1307
17.4.4	Start der Simulation von der MATLAB-Umgebung	1312
17.4.4.1	Allgemeines	1312
17.4.4.2	Simulation eines Gleichstrommotors mit Getriebe	1312
17.4.4.3	Setzen und Abfragen der Simulationsparameter mit simset und simget	1315
17.4.5	Simulink-Subsysteme (Untersysteme, hierarchische Modelle)	1316
17.4.5.1	Allgemeines	1316
17.4.5.2	Strukturierung von Simulink-Modellen durch Untersysteme	1316
17.4.5.3	Strukturierung von Simulink-Modellen mit Subsystem-Blöcken	1318
17.5	<b>Simulation digitaler Regelungen</b>	1320
17.5.1	Allgemeines	1320
17.5.2	Wichtige Übertragungsböcke der Discrete Block Library	1320
17.5.2.1	Sprungantwortfolge einer zeitdiskreten PT <sub>1</sub> -Regelstrecke mit Unit Delay-Block	1320
17.5.2.2	Sprungantwortfolge mit Discrete-Time Integrator-Block	1322
17.5.2.3	Sprungverhalten einer I <sub>2</sub> -Regelstrecke mit Halteglied	1324
17.5.2.4	Einschleifiger digitaler Regelkreis mit Zero-Order Hold-Block	1326
17.5.3	Digitale Kaskadenregelung mit unterschiedlichen Abtastzeiten	1327
17.5.4	Digitale Zustandsregelungen	1330
17.5.4.1	Diskretisierung einer Zustandsregelung	1330
17.5.4.2	Zustands-Drehzahlregelung mit zeitdiskretem Streckenmodell	1334
17.5.4.3	Zustands-Drehzahlregelung mit Zustandsbeobachter	1335
17.5.5	Lösungsverfahren für digitale Regelungen	1336
17.6	<b>Simulation nichtlinearer und zeitvarianter Systeme</b>	1336
17.6.1	Allgemeines	1336
17.6.2	Wichtige Übertragungsböcke der Discontinuities Block Library	1337
17.6.2.1	Sinusantwort mit Sine Wave-, Dead Zone- und XY Graph-Block	1337
17.6.2.2	Sinusantwort mit Sine Wave- und Saturation-Block	1337
17.6.2.3	Sinusantwort mit Sine Wave- und Backlash-Block	1338
17.6.2.4	Sinusantwort mit Sine Wave- und Relay-Block	1339
17.6.3	Linearisierung des nichtlinearen Modells eines Gleichstrommotors mit linmod	1339
17.6.4	Kraftregelung an Arbeitsmaschinen	1341

17.6.5	Nichtlineare Lageregelung	1345
17.6.6	Simulation von zeitvarianten Systemen	1348
17.7	<b>Simulink-Bibliotheken</b>	1351
17.7.1	Simulink Library, Standardbibliotheken von Simulink	1351
17.7.2	Commonly Used Blocks Library, häufig verwendete Blöcke	1352
17.7.3	Continuous Block Library, Modellblöcke für kontinuierliche Systeme	1353
17.7.4	Discontinuities Block Library, Modellblöcke für diskontinuierlich arbeitende Systeme	1369
17.7.5	Discrete Block Library, Modellblöcke für zeitdiskrete Systeme	1373
17.7.6	Logic and Bit Operations Block Library, Funktionsbibliothek für Logik- und Bitoperationen	1394
17.7.7	Lookup Tables Block Library, Index-Tabellen	1399
17.7.8	Math Operations Block Library, mathematische Funktionsbibliothek	1402
17.7.9	Model Verification Block Library, Modellüberprüfung	1416
17.7.10	Model-Wide Utilities Block Library, Hilfsblöcke	1419
17.7.11	Ports & Subsystems Block Library, Ein- und Ausgänge (Ports) und Modellblöcke für Subsysteme	1420
17.7.12	Signal Attributes Block Library, Modellblöcke für die Modifikation und Anzeige von Signaleigenschaften	1439
17.7.13	Signal Routing Block Library, Modellblöcke für die Signalverbindung zwischen Systemmodellen und Blöcken	1443
17.7.14	Sinks Block Library, Datensinken, Blöcke für die Anzeige und Ausgabe von Daten und Signalen	1454
17.7.15	Sources Block Library, Datenquellen, Blöcke für die Eingabe von Daten und Signalen	1456
17.7.16	User-Defined Functions Block Library, anwenderdefinierte Funktionsblöcke	1462
17.7.17	String Block Library, Funktionsblöcke für die Eingabe, Ausgabe und Verarbeitung von Zeichenketten (Strings)	1469
<b>18</b>	<b>Numerische Verfahren für die Regelungstechnik</b>	<b>1473</b>
18.1	Einleitung	1473
18.2	Ermittlung der Nullstellen der charakteristischen Gleichung	1473
18.2.1	Lösung von algebraischen Gleichungen	1473
18.2.2	NEWTON-Verfahren	1474
18.2.3	BAIRSTOW-Verfahren	1475
18.2.4	C-Programm zur Berechnung von reellen und komplexen Nullstellen von Polynomen	1476
18.2.4.1	Einleitung	1476
18.2.4.2	Programmbeschreibung und Programm	1476
18.2.4.3	Anwendungsbeispiel	1479
18.3	Numerische Verfahren zur Lösung von Differenzialgleichungen	1479
18.3.1	Einleitung	1479
18.3.2	Grundlagen des RUNGE-KUTTA-Verfahrens	1480
18.3.3	Umformung von Differenzialgleichungen höherer Ordnung in Systeme von Differenzialgleichungen I. Ordnung	1482
18.3.4	Programm zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens von linearen Regelungssystemen ohne Totzeit	1485
18.3.5	Anwendungsbeispiel	1487

---

<b>19</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>1489</b>
19.1	Allgemeines . . . . .	1489
19.2	Formelzeichen und Abkürzungen der klassischen Regelungstechnik . . . . .	1489
19.3	Formelzeichen für Zustandsregelungen . . . . .	1498
19.4	Formelzeichen und Abkürzungen für Anwendungen der Fuzzy-Logik . . . . .	1500
<b>20</b>	<b>Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik, regelungstechnische Begriffe</b>	<b>1503</b>
20.1	Deutschsprachige Fachliteratur . . . . .	1503
20.2	Fremdsprachige Fachliteratur . . . . .	1504
20.3	Regelungstechnische Begriffe: deutsch-englisch . . . . .	1506
20.4	Regelungstechnische Begriffe: englisch-deutsch . . . . .	1519
20.5	Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: deutsch-englisch . . . . .	1533
20.6	Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: englisch-deutsch . . . . .	1538
	<b>Sachwortverzeichnis</b>	<b>1543</b>