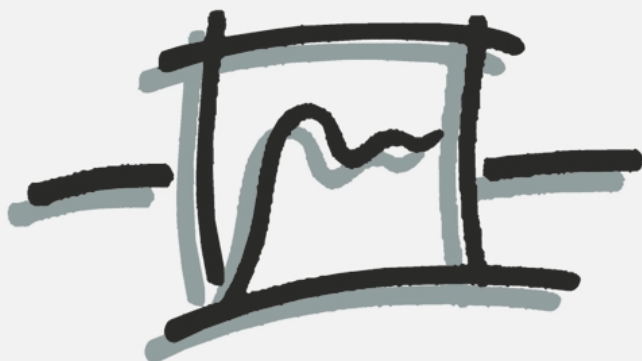


Lutz
Wendt



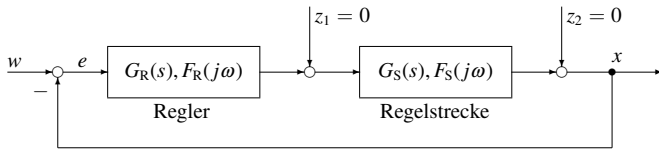
TASCHENBUCH DER REGELUNGSTECHNIK

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:

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

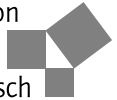
1	Einführung in die Regelungstechnik	23	⇒
2	Darstellung von regelungstechnischen Strukturen	29	⇒
3	Berechnungsmethoden für Regelkreise	45	⇒
4	Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken	117	⇒
5	Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen	219	⇒
6	Stabilität von Regelkreisen	235	⇒
7	BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen	291	⇒
8	Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern	323	⇒
9	Mathematische Modelle für die Regelungstechnik	357	⇒
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise	457	⇒
11	Digitale Regelungssysteme	547	⇒
12	Zustandsregelungen	729	⇒
13	Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik	835	⇒
14	Nichtlineare Regelungen	897	⇒
15	Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	1047	⇒
16	Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB	1161	⇒
17	Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink	1295	⇒
18	Numerische Verfahren für die Regelungstechnik	1501	⇒
19	Formelzeichen und Abkürzungen	1517	⇒
20	Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik	1533	⇒
	Regelungstechnische Begriffe – englisch und deutsch		
	Sachwortverzeichnis	1575	⇒

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

12., 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 graduerter 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.



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

12., ergänzte Auflage 2021

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5870-6

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

© 2021 by Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<https://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09212 Limbach-Oberfrohna
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[®] durch das Programmpaket Simulink[®], mit dem dynamische Systeme modelliert, simuliert und analysiert werden können. Zwei Abschnitte befassen sich daher mit der Anwendung des Programmsystems MATLAB, Simulink auf Problemstellungen der Regelungstechnik.¹ Die Beschreibungen der regelungstechnischen Verfahren und Methoden werden durch überschaubare Beispiele ergänzt. Zu vielen Beispielen sind m-Files und Simulink-Modelle für das Programmsystem MATLAB, Simulink angegeben², die mit den aktuellen Software-Versionen erstellt worden sind.

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

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

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

² Die 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-17/280-downloadbereich-lutz.html>

Autoren und Verlag Europa-Lehrmittel

Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG

Düsselderger Str. 23

42781 Haan-Gruiten

lektorat@europa-lehrmittel.de

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

E-Mail: 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

Inhaltsverzeichnis

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

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

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

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

	6.3.4.5	Beispiele zum vollständigen NYQUIST-Kriterium	250
	6.3.4.6	Stabilität von Regelungssystemen mit Totzeit	251
6.4		Wurzelortskurven	253
	6.4.1	Einleitung	253
	6.4.2	Kriterium für das Wurzelortskurven-Verfahren (WOK-Verfahren)	255
	6.4.3	Regeln für die Konstruktion von Wurzelortskurven	261
	6.4.3.1	Allgemeines	261
	6.4.3.2	Prinzipieller Verlauf der WOK (Regel 1)	262
	6.4.3.3	WOK auf der reellen Achse (Regel 2)	262
	6.4.3.4	Schnittpunkt der Asymptoten (Regel 3)	263
	6.4.3.5	Anstiegswinkel der Asymptoten (Regel 4)	263
	6.4.3.6	Verzweigungspunkte (Regel 5)	263
	6.4.3.7	Schnittwinkel der WOK-Zweige in Verzweigungspunkten (Regel 6)	266
	6.4.3.8	Schnittpunkte der WOK mit der imaginären Achse (Regel 7)	268
	6.4.3.9	Austrittswinkel der WOK aus Polstellen, Eintrittswinkel in Nullstellen (Regel 8)	269
	6.4.3.10	Skalierung der WOK mit dem Kurvenparameter (Regel 9)	271
	6.4.3.11	Tabelle der Schritte des WOK-Verfahrens	273
	6.4.3.12	Anwendung des WOK-Verfahrens	274
	6.4.3.13	Tabelle mit WOK für Regelungssysteme bis IV. Ordnung	279
	6.4.4	Erweiterung der Anwendung des WOK-Verfahrens	283
	6.4.4.1	WOK-Verfahren für andere Regelkreisparameter	283
	6.4.4.2	WOK für mehrere Kurvenparameter (WOK-Kontur)	285
	6.4.5	Zusammenfassung	289
7		BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen	291
7.1		Einleitung	291
7.2		BODE-Diagramme	291
	7.2.1	BODE-Diagramm des offenen Regelkreises	291
	7.2.2	BODE-Diagramme der wichtigsten Übertragungselemente	292
	7.2.2.1	Einleitung	292
	7.2.2.2	Proportional-Element (P-Element)	292
	7.2.2.3	Integral-Element (I-Element)	293
	7.2.2.4	Differenzial-Element (D-Element)	293
	7.2.2.5	Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung (PT_1 -Element)	294
	7.2.2.6	Proportional-Differenzial-Element (PD-Element)	295
	7.2.2.7	Totzeit-Element (PT_1 -Element)	296
	7.2.2.8	Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung (PT_2 -Element)	296
7.3		Stabilitätsgrenze im BODE-Diagramm	299
	7.3.1	Vergleich mit der Ortskurvendarstellung	299
	7.3.2	Amplitudenreserve und Phasenreserve	300
7.4		Anwendung des BODE-Verfahrens	302
	7.4.1	Einstellung der Stabilitätsgüte	302
	7.4.2	Einstellung des Verstärkungsfaktors	303
	7.4.3	Anhebung des Phasengangs	304
	7.4.4	Anwendung von 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
8	Regelrichtungen mit Operationsverstärkern	323
8.1	Prinzipieller Aufbau	323
8.1.1	Aufgaben von Regelrichtungen	323
8.1.2	Kenngrößen von Operationsverstärkern	323
8.1.2.1	Stationäre Kenngrößen	323
8.1.2.2	Dynamische Kenngrößen	324
8.1.2.3	Zusammenfassung	327
8.2	Grundsaltungen mit Operationsverstärkern	327
8.2.1	Allgemeines	327
8.2.2	Allgemeine Schaltung eines Operationsverstärkers	328
8.2.3	Invertierende Schaltung	329
8.2.4	Nichtinvertierende Schaltung	329
8.3	Schaltungen zur Bildung der Regeldifferenz	331
8.3.1	Schaltung mit Spannungsvergleichsstelle	331
8.3.2	Schaltung mit Stromvergleichsstelle	332
8.4	Schaltungen zur Bildung der Stellgröße	332
8.4.1	Allgemeines	332
8.4.2	Proportional-Regler (P-Regler)	333
8.4.2.1	Invertierender Proportional-Regler	333
8.4.2.2	Nichtinvertierender Proportional-Regler	333
8.4.3	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler), Proportional-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PDT ₁ -Regler)	334
8.4.3.1	Invertierender PD/PDT ₁ -Regler	334
8.4.3.2	Nichtinvertierender PD/PDT ₁ -Regler	334
8.4.3.3	PD/PDT ₁ -Regler mit getrennt einstellbaren Parametern	335
8.4.4	Integral-Regler (I-Regler)	337
8.4.4.1	Invertierender Integral-Regler	337
8.4.4.2	Nichtinvertierender Integral-Regler	338
8.4.5	Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	339
8.4.5.1	Invertierender PI-Regler	339
8.4.5.2	Nichtinvertierender PI-Regler	339
8.4.5.3	PI-Regler mit unabhängig einstellbaren Parametern	340
8.4.6	Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID-Regler), Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PIDT ₁ -Regler)	341
8.4.6.1	PID/PIDT ₁ -Regler in additiver (paralleler) Form mit unabhängig voneinander einstellbaren Parametern	341
8.4.6.2	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit einem Verstärker	342
8.4.6.3	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit zwei Verstärkern	343
8.4.6.4	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit Entkopplung	344
8.4.6.5	Nichtinvertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form	345

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

9.5	Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren	434
9.5.1	Stochastische Prozesse, Modellbegriffe	434
9.5.2	MA-Modell (moving-average model)	434
9.5.3	AR-Modell (auto-regressive model)	436
9.5.4	ARMA-Modell (auto-regressive moving-average model)	437
9.5.5	Modelle mit zusätzlicher deterministischer Eingangsgröße	438
9.5.5.1	Allgemeine Modellstruktur	438
9.5.5.2	Modellarten mit deterministischer und stochastischer Eingangsgröße	440
9.5.6	Parameterschätzung von ARX-Modellen	440
9.5.6.1	Prinzip der Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren (experimentelle Identifikation)	440
9.5.6.2	Fehlerarten für die Anwendung von Parameterschätzverfahren	441
9.5.6.3	Modellbestimmung bei Prozessen mit vernachlässigbaren Störgrößen	443
9.5.6.4	Modellbestimmung mit der Methode der kleinsten Quadrate	449
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise, erweiterte Regelkreisstrukturen	457
10.1	Einleitung	457
10.2	Parameteroptimierung im Zeitbereich	458
10.2.1	Begriff der Regelfläche	458
10.2.2	Integralkriterien im Zeitbereich, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	459
10.2.2.1	Integralkriterium der Linearen Regelfläche, IE-Kriterium (Integrated Error criterion)	459
10.2.2.2	Integralkriterien der Betragsregelfläche, 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 ₁ -Regelstrecken	516
10.5.2	Standardeinstellung des Symmetrischen Optimums	521

10.5.3	Anwendung des Verfahrens bei integralen Regelstrecken mit Verzögerung höherer Ordnung	524
10.5.4	Anwendung des Verfahrens bei proportionalen Regelstrecken mit Verzögerungen höherer Ordnung	525
10.5.4.1	PT_n -Regelstrecken mit einer großen Zeitkonstanten	525
10.5.4.2	PT_n -Regelstrecken mit zwei großen Zeitkonstanten	525
10.5.5	Einstellregeln für das Symmetrische Optimum	526
10.5.6	Zusammenfassung zur Optimierung im Frequenzbereich	528
10.6	Erweiterte Regelkreisstrukturen	529
10.6.1	Einleitung	529
10.6.2	Regelungen mit Störgrößenaufschaltung	529
10.6.2.1	Anwendungsbeispiele	529
10.6.2.2	Störgrößenaufschaltung auf den Regelstreckeneingang	530
10.6.2.3	Störgrößenaufschaltung auf den Reglereingang	535
10.6.3	Regelstrecken mit Totzeit (SMITH-Regler, SMITH-Prädiktor)	541
11	Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)	547
11.1	Prinzipielle Arbeitsweise von digitalen Regelkreisen	547
11.1.1	Einleitung	547
11.1.2	Kontinuierliche und diskrete Signale in digitalen Regelungssystemen	547
11.1.3	Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	548
11.2	Basialgorithmen 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	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	Einstellregeln für digitale Regelkreise	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	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Zeitbereich	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	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Frequenzbereich ..	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	Stabilität von digitalen Regelungssystemen	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	Kompensationsregler für digitale Regelkreise	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
12	Zustandsregelungen	729
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 von Vorfilter und Zustandsregler	770
12.3.2.3	Berechnung von Zustandsreglern mit der Formel von ACKERMANN	779
12.3.3	Zustandsregelung mit Beobachter	786
12.3.3.1	Prinzipielle Arbeitsweise von Beobachtern	786
12.3.3.2	Ermittlung von Zustandsbeobachtern durch Polvorgabe	789
12.3.4	Systematische Vorgehensweise bei der Berechnung von Zustandsreglern und Zustandsbeobachtern	795
12.3.5	Zusammenfassung	796

12.4	Regelungen durch Zustandsrückführung mit verbessertem Störungsverhalten	796
12.4.1	Allgemeines	796
12.4.2	Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	797
12.4.2.1	Berechnung des Zustandsreglers mit Vorfilter	797
12.4.2.2	Störungsverhalten der Zustandsregelung	799
12.4.2.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	801
12.4.2.4	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	806
12.4.3	Proportional-Integral-(PI)-Zustandsregelung	806
12.4.3.1	Zustandsgleichungen für die PI-Zustandsregelung	806
12.4.3.2	Berechnung der Zustandsregelung mit überlagertem PI-Regler	810
12.4.3.3	Störungsverhalten der PI-Zustandsregelung	814
12.4.4	Robuste Regelung – Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung	815
12.4.4.1	Begriff der robusten Regelung	815
12.4.4.2	Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung auf Robustheit	815
12.5	Optimale Zustandsregelungen (LQ-Regelung)	818
12.5.1	Standardisiertes Quadratisches Gütefunktional	818
12.5.2	Herleitung der Algebraischen Matrix-RICCATI-Gleichung	820
12.5.2.1	Ermittlung der LJAPUNOW-Gleichung	820
12.5.2.2	Berechnung der optimalen Rückführung	822
12.5.2.3	Ermittlung der Algebraischen Matrix-RICCATI-Gleichung	823
12.5.3	Anwendung der optimalen Zustandsregelung	823
12.5.4	Vorgehensweise beim Entwurf von optimalen Zustandsreglern	832
12.6	Zusammenfassung	832
13	Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik	835
13.1	Allgemeines	835
13.2	Regelstrecken für elektrische Antriebe	835
13.2.1	Mathematisches Modell der Regelstrecke	835
13.2.1.1	Elektrischer Teil der Regelstrecke	835
13.2.1.2	Mechanischer Teil der Regelstrecke	838
13.2.2	Vereinfachung der Regelstrecke	840
13.3	Zeitverläufe von Führungs- und Störgrößen bei Antriebsregelungen von Drehmaschinen	841
13.4	Einschleifige Lageregelung	843
13.4.1	Berechnung des Lagereglers	843
13.4.2	Führungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	844
13.4.3	Störungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	846
13.5	Lageregelung mit Kaskadenstruktur	847
13.5.1	Allgemeines	847
13.5.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	847
13.5.2.1	Berechnung des Momentenreglers	847
13.5.2.2	Drehzahlregelung mit unterlagerter Momentenregelung	848
13.5.2.2.1	Berechnung des Drehzahlreglers	848
13.5.2.2.2	Führungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagerter Momentenregelung	849
13.5.2.3	Lageregelung mit unterlagerter Drehzahl- und Momentenregelung	851
13.5.2.3.1	Berechnung des Lagereglers	851

13.5.2.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Drehzahl- und Momentenregelung	853
13.5.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	855
13.5.3.1	Störungsverhalten der Regelstrecke	855
13.5.3.2	Störungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagerter Momentenregelung	856
13.5.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Drehzahl- und Momentenregelung	858
13.6	Zusammenfassung	859
13.7	Digitale Lageregelung mit Kaskadenstruktur	860
13.7.1	Allgemeines	860
13.7.2	Digitale Winkelgeschwindigkeitsregelung (Drehzahlregelung) mit unterlagerter Momentenregelung	860
13.7.2.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	860
13.7.2.2	Führungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagerter Momentenregelung	861
13.7.2.3	Störungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagerter Momentenregelung	864
13.7.3	Digitale Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	865
13.7.3.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	865
13.7.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	865
13.7.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	866
13.7.4	Zusammenfassung	867
13.8	Lageregelung mit Zustandsregler	867
13.8.1	Allgemeines	867
13.8.2	Berechnung der Zustandsregelung	867
13.8.2.1	Ermittlung des Zustandsreglers durch Polvorgabe	867
13.8.2.2	Berechnung des Vorfilters für den Zustandsregler	871
13.8.2.3	Sprungverhalten der Lageregelung mit Zustandsregler	872
13.8.2.4	Stellgliedzeitkonstante und Stellgrößenaufwand	874
13.8.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	876
13.8.3.1	Struktur des Zustands- und Störgrößenbeobachters	876
13.8.3.2	Ermittlung des Beobachters durch Polvorgabe	878
13.8.3.3	Berechnung des Vorfilters für die Störgrößenaufschaltung	881
13.8.3.4	Dynamisches Verhalten des Beobachters	882
13.8.3.5	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter und Störgrößenaufschaltung	884
13.8.4	Zustandslageregelung mit Störgrößenaufschaltung	885
13.9	Digitale Drehzahl- und Lageregelungen mit Zustandsregler	887
13.9.1	Zustandsdarstellung für digitale Regelungen	887
13.9.2	Digitale Drehzahlregelung mit Zustandsregler	887
13.9.3	Digitale Integral-Zustandslageregelung	893
13.10	Zusammenfassung	896
14	Nichtlineare Regelungen	897
14.1	Einleitung	897
14.1.1	Verfahren zur Untersuchung nichtlinearer Systeme	897

14.1.2	Definition der Nichtlinearität	897
14.1.3	Lineare und nichtlineare Operationen	899
14.1.4	Eigenschaften von nichtlinearen Regelkreiselementen und -systemen	902
14.2	Grundtypen von nichtlinearen Elementen, prinzipielle Eigenschaften von nichtlinearen Funktionen	909
14.3	Verfahren der Linearisierung	912
14.3.1	Allgemeines	912
14.3.2	Linearisierung mit inversen Kennlinien	912
14.3.3	Linearisierung durch Rückführung	914
14.3.4	Linearisierung im Arbeitspunkt (Tangentenlinearisierung), Vernachlässigung höherer Ableitungen der TAYLOR-Reihe	916
14.3.5	Harmonische Linearisierung mit der Beschreibungsfunktion, Vernachlässigung von höheren Harmonischen der FOURIER-Reihe	917
14.3.5.1	Grundlage des Verfahrens	917
14.3.5.2	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit eindeutigen Kennlinienfunktionen	920
14.3.5.3	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit mehrdeutigen Kennlinienfunktionen	929
14.3.5.4	Direkte Berechnung von Beschreibungsfunktionen aus Kennlinienfunktionen	933
14.3.5.5	Rechenregeln für Beschreibungsfunktionen	938
14.3.5.6	Beschreibungsfunktionen von Kennlinienelementen (Tabelle)	947
14.3.5.7	Berechnung der Gleichung der Harmonischen Balance	975
14.3.5.8	Stabilität von Grenzwahlungen	986
14.4	Untersuchung der Stabilität nichtlinearer Systeme	990
14.4.1	Methode der Phasenebene (Zustandsebene)	990
14.4.2	Eigenschaften von Zustandskurven in der Phasenebene	991
14.4.3	Berechnung von linearen Systemen II. Ordnung im Zeitbereich und in der Phasenebene	992
14.4.4	Ruhelagen von linearen und nichtlinearen Systemen	996
14.4.5	Stabilität von Ruhelagen	996
14.4.6	Berechnung der Stabilität von Ruhelagen	1000
14.4.7	Stabilitätsuntersuchung mit der direkten Methode von LJAPUNOW	1004
14.4.7.1	Grundgedanke der direkten Methode	1004
14.4.7.2	Stabilitätsuntersuchung mit der LJAPUNOW-Funktion	1006
14.4.8	Stabilitätskriterium von POPOW	1008
14.4.8.1	Absolute Stabilität	1008
14.4.8.2	Numerische Form des POPOW-Kriteriums	1009
14.4.8.3	Ortskurvenform des POPOW-Kriteriums	1012
14.5	Regelkreise mit schaltenden Reglern	1014
14.5.1	Anwendung von schaltenden Reglern	1014
14.5.2	Regelkreise mit Zweipunktreglern	1016
14.5.2.1	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und proportionalen Regelstrecken	1016
14.5.2.2	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken mit Totzeit	1020
14.5.2.3	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken ohne Totzeit	1028
14.5.2.4	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und Regelstrecken mit Integral-Anteil	1029
14.5.3	Berechnung von Regelkreisen mit Dreipunktreglern	1034

14.5.4	Schaltende Regler mit Rückführung	1037
14.5.4.1	Eigenschaften von quasistetigen Reglern	1037
14.5.4.2	Einfluss der Rückführung bei schaltenden Reglern	1038
14.5.4.3	Quasistetige Standardregler (Regler mit Rückführung)	1041
15	Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	1047
15.1	Grundbegriffe der Fuzzy-Logik	1047
15.1.1	Scharfe und unscharfe Mengen, Zugehörigkeitsfunktionen	1047
15.1.2	Beschreibung von scharfen und unscharfen Mengen	1048
15.1.2.1	Beschreibungsformen von scharfen Mengen	1048
15.1.2.2	Beschreibungsformen von unscharfen Mengen	1049
15.1.3	Darstellung von unscharfen Mengen mit Zugehörigkeitsfunktionen	1052
15.1.4	Linguistische Variablen und Werte	1056
15.1.4.1	Linguistische Variablen zur Beschreibung von unscharfen Aussagen	1056
15.1.4.2	Struktur von linguistischen Variablen, linguistische Operatoren	1058
15.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1064
15.2.1	Elementaroperationen mit scharfen Mengen	1064
15.2.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1065
15.2.2.1	Elementaroperationen mit unscharfen Mengen	1065
15.2.2.2	Allgemeine Anforderungen an Fuzzy-Operatoren	1068
15.2.2.3	t -Normen und t -Konormen (s -Normen)	1070
15.2.2.4	Parametrisierte t -Normen und t -Konormen	1075
15.2.2.5	Kompensatorische und mittelnde Operatoren	1076
15.3	Unschärfe Relationen	1079
15.3.1	Einstellige Relationen	1079
15.3.2	Scharfe Relationen mit scharfen Mengen	1080
15.3.3	Unschärfe Relationen mit scharfen Mengen	1081
15.3.4	Unschärfe Relationen mit unscharfen Mengen	1082
15.3.5	Verknüpfung von unscharfen Relationen	1084
15.3.6	Verkettung (Komposition) von unscharfen Relationen	1086
15.3.7	Unschärfes Schließen (Fuzzy-Inferenz)	1090
15.4	Fuzzy-Regelungen und -Steuerungen (Fuzzy-Control)	1094
15.4.1	Anwendungsgebiete von Fuzzy-Reglern	1094
15.4.2	Arten von Fuzzy-Reglern	1095
15.4.3	Struktur und Komponenten von relationalen Fuzzy-Reglern	1095
15.4.3.1	Prinzipieller Aufbau	1095
15.4.3.2	Fuzzifizierung	1096
15.4.4	Inferenzkomponenten von Fuzzy-Reglern	1099
15.4.4.1	Regelbasis	1099
15.4.4.2	Teilschritte des Inferenzverfahrens	1102
15.4.4.3	Auswertung der Regelprämissen	1102
15.4.4.4	Regelaktivierung und Aggregation	1105
15.4.5	Defuzzifizierung	1111
15.4.5.1	Defuzzifizierungsverfahren	1111
15.4.5.2	Defuzzifizierung mit der maximalen Höhe der Zugehörigkeitsfunktion	1111
15.4.5.3	Defuzzifizierung mit Schwerpunktverfahren	1113
15.4.5.4	Allgemeines Schwerpunktverfahren	1113
15.4.5.5	Schwerpunktsummen-Verfahren für die Inferenz mit der SUM-MIN-, SUM-PROD-Methode	1116

15.4.5.6	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Rechteckfunktionen)	1121
15.4.5.7	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Singletons)	1124
15.4.5.8	Schwerpunktverfahren für erweiterte Zugehörigkeitsfunktionen	1126
15.4.6	Struktur und Komponenten von funktionalen Fuzzy-Reglern	1127
15.4.6.1	Unterschiede von relationalen und funktionalen Fuzzy-Reglern	1127
15.4.6.2	Prinzipieller Aufbau von funktionalen Fuzzy-Reglern	1129
15.5	Übertragungsverhalten von Fuzzy-Reglern	1131
15.5.1	Allgemeine Eigenschaften von Fuzzy-Reglern	1131
15.5.2	Kennlinien von Fuzzy-Reglern	1132
15.5.2.1	Einfluss der Defuzzifizierung	1132
15.5.2.2	Einstellung von linearen Übertragungsfunktionen	1134
15.5.2.3	Einstellung von nichtlinearen Übertragungsfunktionen	1137
15.5.3	Fuzzy-PID-Regler	1141
15.5.3.1	PID-ähnliche Fuzzy-Regler	1141
15.5.3.2	Fuzzy-P-Regler	1142
15.5.3.3	Fuzzy-PD-Regler	1146
15.5.3.4	Fuzzy-PI-Regler (Stellungsalgorithmus)	1151
15.5.3.5	Fuzzy-PI-Regler (Geschwindigkeitsalgorithmus)	1154
15.5.3.6	Fuzzy-PID-Regler	1155
15.5.4	Strukturen von Fuzzy-Regelkreisen	1157
15.5.4.1	Einsatz von Fuzzy-Komponenten	1157
15.5.4.2	Fuzzy-Regler als Ersatz für konventionelle Regler	1157
15.5.4.3	Erweiterung von konventionellen Regelkreisstrukturen mit Fuzzy-Komponenten (Fuzzy-Hybrid-Strukturen)	1158
16	Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB	1161
16.1	Allgemeines	1161
16.2	Einführung in MATLAB	1162
16.2.1	Einfache Berechnungen mit MATLAB	1162
16.2.2	Vektoren, Matrizen und Polynome – Eingabe und Grundoperationen	1165
16.2.2.1	Vektoren	1165
16.2.2.2	Matrizen	1167
16.2.2.3	Polynome	1169
16.2.2.4	Elementweise Multiplikation und Division von Vektoren und Matrizen ..	1171
16.2.3	m-Files	1171
16.2.3.1	Script-Files und Function-Files	1171
16.2.3.2	Script-Files	1172
16.2.3.3	Function-Files	1172
16.2.4	Kontrollstrukturen	1173
16.2.4.1	Arten von Kontrollstrukturen	1173
16.2.4.2	for-Schleife	1173
16.2.4.3	while-Schleife	1174
16.2.4.4	if-elseif-else-Struktur	1174
16.2.4.5	switch-case-otherwise-Struktur	1176
16.2.4.6	Verkürzung der Rechenzeit	1176
16.2.5	Nützliche Anweisungen: echo, keyboard, pause, type, what	1177

16.2.6	Grafische Darstellungen	1177
16.2.6.1	Zweidimensionale Grafiken	1177
16.2.6.2	Dreidimensionale Grafiken	1182
16.2.7	Tabellen wichtiger Standardfunktionen für MATLAB	1188
16.3	Objektorientierte Programmierung	1195
16.3.1	LTI-Objekte für lineare zeitinvariante Systeme	1195
16.3.2	Daten und Methoden für LTI-Objekte	1196
16.3.3	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Erzeugung und Konversion von LTI-Modellen	1203
16.4	Umformung von Signalflussplänen	1203
16.4.1	Allgemeines	1203
16.4.2	Kettenstruktur	1204
16.4.3	Parallelstruktur	1204
16.4.4	Kreisstrukturen	1205
16.4.4.1	Struktur mit indirekter Gegenkopplung	1205
16.4.4.2	Struktur mit direkter Gegenkopplung	1206
16.4.5	Ermittlung von Führungs- und Störungsübertragungsfunktionen für Signalfusspläne	1206
16.4.6	Umformung vermaschter Signalfusspläne	1207
16.4.7	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Umformung von Signalfussplänen	1209
16.5	Berechnung von Regelungen im Zeitbereich	1209
16.5.1	Allgemeines	1209
16.5.2	Impulsantwort	1210
16.5.3	Sprungantwort	1211
16.5.4	Anstiegsantwort	1212
16.5.5	Sinusantwort	1214
16.5.6	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Regelungen im Zeitbereich	1215
16.6	Berechnung von Regelungen im Frequenzbereich	1216
16.6.1	Eigenschaften von Übertragungsfunktionen	1216
16.6.1.1	Übertragungsfunktion und Pol-Nullstellenplan	1216
16.6.1.2	Partialbruchzerlegung	1219
16.6.1.3	Übertragungsfunktion und Wurzelortskurve	1221
16.6.2	Frequenzgang und Ortskurve	1224
16.6.2.1	Ortskurve für ein PT_1 - und ein PT_2 -Element	1224
16.6.2.2	Ortskurve eines offenen Regelkreises	1225
16.6.3	Frequenzgang und BODE-Diagramm	1227
16.6.3.1	BODE-Diagramm eines $PIDT_1$ -Reglers	1227
16.6.3.2	Amplituden- und Phasenreserve eines Regelkreises	1228
16.6.3.3	BODE-Diagramm für ein PT_2 -Element bei verschiedenen Dämpfungen	1231
16.6.4	Berechnung von LAPLACE-Transformationen und -Rücktransformationen mit der <i>Symbolic Math Toolbox</i> von MATLAB	1233
16.6.5	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Regelungen im Frequenzbereich	1237
16.7	Berechnung von digitalen Regelungssystemen mit MATLAB	1238
16.7.1	Allgemeines	1238
16.7.2	Bestimmung der z -Übertragungsfunktion für verschiedene Diskretisierungsverfahren	1239

16.7.3	Wahl der Abtastzeit für ein Übertragungssystem	1241
16.7.4	Untersuchung des Zeitverhaltens von digitalen Regelungen	1243
16.7.4.1	Wahl der Abtastzeit	1243
16.7.4.2	Ermittlung der z -Übertragungsfunktion	1243
16.7.4.3	Impulsantwortfolge	1245
16.7.4.4	Sprungantwortfolge	1246
16.7.4.5	Anstiegsantwortfolge	1248
16.7.5	Reglerauslegung bei Nichterfüllung des Abtastzeitkriteriums	1249
16.7.6	Dead-Beat-Regelung für sprungförmige Führungsgrößen	1251
16.7.7	z -Übertragungsfunktion und Pol-Nullstellenplan	1253
16.7.7.1	Dämpfung und Kennkreisfrequenz von Übertragungsfunktionen mit konjugiert komplexen Nullstellen	1253
16.7.7.2	Pol-Nullstellenplan für z -Übertragungsfunktionen	1254
16.7.7.3	z -Übertragungsfunktion und Wurzelortskurve	1255
16.7.8	Berechnung von z -Transformationen und -Rücktransformationen mit der <i>Symbolic Math Toolbox</i> von MATLAB	1258
16.7.9	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von digitalen Regelungssystemen	1266
16.8	Berechnung von Zustandsregelungen mit MATLAB	1267
16.8.1	Allgemeines	1267
16.8.2	Signalfussstrukturen mit Zustandsmodellen	1267
16.8.3	Lösung der Zustandsgleichung	1269
16.8.3.1	Lösung der homogenen Zustandsgleichung	1269
16.8.3.2	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	1270
16.8.4	Modellkonversion: Übertragungsfunktion und Zustandsdarstellung	1272
16.8.5	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	1274
16.8.5.1	Untersuchung eines Regelungssystems auf Steuerbarkeit	1274
16.8.5.2	Untersuchung eines Regelungssystems auf Beobachtbarkeit	1275
16.8.6	Ähnlichkeitstransformationen	1277
16.8.6.1	Transformation auf Regelungsnormalform	1277
16.8.6.2	Transformation auf Beobachtungsnormalform	1278
16.8.7	Zustandsregelungen	1279
16.8.7.1	Zustandsregelung einer PT_2 -Regelstrecke	1279
16.8.7.2	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter	1281
16.8.8	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Zustandsregelungen	1286
16.9	Grafisches User Interface Linear System Analyzer	1287
16.10	Grafisches User Interface Control System Designer	1291
17	Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink	1295
17.1	Allgemeines	1295
17.2	Einführung in Simulink	1295
17.2.1	Modellbildung und Simulation einer Drehzahlregelung	1295
17.2.1.1	Start von Simulink	1295
17.2.1.2	Kopieren der Blöcke in das Simulink-Arbeitsfenster	1297
17.2.1.3	Modifizieren der Blöcke	1297
17.2.1.4	Einfügen von Wirkungslinien und Text	1298
17.2.1.5	Aufzeichnen der Sprungantwort	1299
17.2.2	Erstellung von Signalfussplänen mit Simulink	1300
17.2.2.1	Allgemeines	1300

17.2.2.2	Editieren von Blöcken	1300
17.2.2.3	Wirkungslinien editieren	1301
17.2.2.4	Kommentar einfügen	1304
17.3	Simulation zeitkontinuierlicher Regelungen	1305
17.3.1	Allgemeines	1305
17.3.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Continuous Block Library	1305
17.3.2.1	Sprungantwort mit Step-, Integrator-, Mux- und Scope-Block	1305
17.3.2.2	Anstiegsantwort mit Ramp-, Derivative- und Scope-Block	1307
17.3.2.3	Impulsantwort mit Step-, Sum-, Transfer Fcn-, Mux- und Scope-Block	1309
17.3.2.4	Anstiegsantwort mit Ramp-, Transport Delay-, Zero-Pole-, Mux- und Scope-Block	1310
17.3.2.5	Regelkreis mit Gain-, State-Space- und Floating Scope-Block	1310
17.3.3	Geschwindigkeitsregelung mit trapezförmigem Führungsgrößenprofil	1312
17.3.4	Ermittlung eines Zustandsmodells mit der Funktion linmod	1314
17.3.5	Streckensteuerung für eine Linearachse	1315
17.3.6	Streckensteuerung für eine Linearachse mit Führungsgrößenvorsteuerung	1318
17.3.7	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben	1319
17.3.8	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben und Führungsgrößenvorsteuerung	1324
17.4	Simulation und Programmierung mit Simulink	1325
17.4.1	Ablauf einer Simulation	1325
17.4.2	Algebraische Schleifen	1326
17.4.3	Numerische Lösungsverfahren und Simulations-Parameter für Simulink-Modelle	1328
17.4.3.1	Numerische Lösungsverfahren	1328
17.4.3.2	Simulations-Parameter	1329
17.4.3.3	Simulation einer Lageregelung mit Zerspanungsprozess (steifes System)	1331
17.4.4	Start der Simulation von der MATLAB-Umgebung	1336
17.4.4.1	Allgemeines	1336
17.4.4.2	Simulation eines Gleichstrommotors mit Getriebe	1336
17.4.4.3	Setzen und Abfragen der Simulationsparameter mit simset und simget	1339
17.4.5	Simulink-Subsysteme (Untersysteme, hierarchische Modelle)	1340
17.4.5.1	Allgemeines	1340
17.4.5.2	Strukturierung von Simulink-Modellen durch Untersysteme	1340
17.4.5.3	Strukturierung von Simulink-Modellen mit Subsystem-Blöcken	1342
17.5	Simulation digitaler Regelungen	1344
17.5.1	Allgemeines	1344
17.5.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Discrete Block Library	1344
17.5.2.1	Sprungantwortfolge einer zeitdiskreten PT_1 -Regelstrecke mit Unit Delay-Block	1344
17.5.2.2	Sprungantwortfolge mit Discrete-Time Integrator-Block	1346
17.5.2.3	Sprungverhalten einer I_2 -Regelstrecke mit Halteglied	1348
17.5.2.4	Einschleifiger digitaler Regelkreis mit Zero-Order Hold-Block	1350
17.5.3	Digitale Kaskadenregelung mit unterschiedlichen Abtastzeiten	1351
17.5.4	Digitale Zustandsregelungen	1354
17.5.4.1	Diskretisierung einer Zustandsregelung	1354
17.5.4.2	Zustands-Drehzahlregelung mit zeitdiskretem Streckenmodell	1358
17.5.4.3	Zustands-Drehzahlregelung mit Zustandsbeobachter	1359
17.5.5	Lösungsverfahren für digitale Regelungen	1360
17.6	Simulation nichtlinearer und zeitvarianter Systeme	1360
17.6.1	Allgemeines	1360

17.6.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Discontinuities Block Library	1361
17.6.2.1	Sinusantwort mit Sine Wave-, Dead Zone- und XY Graph-Block	1361
17.6.2.2	Sinusantwort mit Sine Wave- und Saturation-Block	1361
17.6.2.3	Sinusantwort mit Sine Wave- und Backlash-Block	1362
17.6.2.4	Sinusantwort mit Sine Wave- und Relay-Block	1363
17.6.3	Linearisierung des nichtlinearen Modells eines Gleichstrommotors mit linmod ...	1363
17.6.4	Kraftregelung an Arbeitsmaschinen	1365
17.6.5	Nichtlineare Lageregelung	1369
17.6.6	Simulation von zeitvarianten Systemen	1372
17.7	Simulink-Bibliotheken	1375
17.7.1	Simulink Library, Standardbibliotheken von Simulink	1375
17.7.2	Commonly Used Blocks Library, häufig verwendete Blöcke	1376
17.7.3	Continuous Block Library, Modellblöcke für kontinuierliche Systeme	1377
17.7.4	Discontinuities Block Library, Modellblöcke für diskontinuierlich arbeitende Systeme	1394
17.7.5	Discrete Block Library, Modellblöcke für zeitdiskrete Systeme	1399
17.7.6	Logic and Bit Operations Block Library, Funktionsbibliothek für Logik- und Bitoperationen	1420
17.7.7	Lookup Tables Block Library, Index-Tabellen	1425
17.7.8	Math Operations Block Library, mathematische Funktionsbibliothek	1428
17.7.9	Model Verification Block Library, Modellüberprüfung	1442
17.7.10	Model-Wide Utilities Block Library, Hilfsblöcke	1445
17.7.11	Ports & Subsystems Block Library, Ein- und Ausgänge (Ports) und Modellblöcke für Subsysteme	1446
17.7.12	Signal Attributes Block Library, Modellblöcke für die Modifikation und Anzeige von Signaleigenschaften	1465
17.7.13	Signal Routing Block Library, Modellblöcke für die Signalverbindung zwischen Systemmodellen und Blöcken	1469
17.7.14	Sinks Block Library, Datensinken, Blöcke für die Anzeige und Ausgabe von Daten und Signalen	1480
17.7.15	Sources Block Library, Datenquellen, Blöcke für die Eingabe von Daten und Signalen	1482
17.7.16	User-Defined Functions Block Library, anwenderdefinierte Funktionsblöcke	1488
17.7.17	String Block Library, Funktionsblöcke für die Eingabe, Ausgabe und Verarbeitung von Zeichenketten (Strings)	1496
18	Numerische Verfahren für die Regelungstechnik	1501
18.1	Einleitung	1501
18.2	Ermittlung der Nullstellen der charakteristischen Gleichung	1501
18.2.1	Lösung von algebraischen Gleichungen	1501
18.2.2	NEWTON-Verfahren	1502
18.2.3	BAIRSTOW-Verfahren	1503
18.2.4	C-Programm zur Berechnung von reellen und komplexen Nullstellen von Polynomen	1504
18.2.4.1	Einleitung	1504
18.2.4.2	Programmbeschreibung und Programm	1504
18.2.4.3	Anwendungsbeispiel	1507
18.3	Numerische Verfahren zur Lösung von Differenzialgleichungen	1507
18.3.1	Einleitung	1507

18.3.2	Grundlagen des RUNGE-KUTTA-Verfahrens	1508
18.3.3	Umformung von Differenzialgleichungen höherer Ordnung in Systeme von Differenzialgleichungen I. Ordnung	1510
18.3.4	Programm zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens von linearen Regelungssystemen ohne Totzeit	1513
18.3.5	Anwendungsbeispiel	1515
19	Formelzeichen und Abkürzungen	1517
19.1	Allgemeines	1517
19.2	Formelzeichen und Abkürzungen der klassischen Regelungstechnik	1517
19.3	Formelzeichen für Zustandsregelungen und -darstellungen	1527
19.4	Formelzeichen und Abkürzungen für Anwendungen der Fuzzy-Logik	1529
20	Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik, regelungstechnische Begriffe	1533
20.1	Deutschsprachige Fachliteratur	1533
20.2	Fremdsprachige Fachliteratur	1534
20.3	Regelungstechnische Begriffe: deutsch-englisch	1536
20.4	Regelungstechnische Begriffe: englisch-deutsch	1549
20.5	Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: deutsch-englisch	1564
20.6	Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: englisch-deutsch	1569
	Sachwortverzeichnis	1575

1 Einführung in die Regelungstechnik

1.1 Steuerungen und Regelungen

Technische Systeme sollen häufig so beeinflusst werden, dass bestimmte zeitveränderliche Systemgrößen ein **vorgeschriebenes Verhalten** aufweisen. In einfachen Fällen sollen technische Größen konstant gehalten werden, obwohl auf das System **Störungen** einwirken. Diese Aufgaben sind im Allgemeinen mit Regelungen oder Steuerungen lösbar. Beide Methoden werden im Weiteren erklärt und miteinander verglichen.

Unter einer Regelung versteht man einen Vorgang, bei dem eine Größe, die **Regelgröße**, fortlaufend gemessen wird und mit einer anderen Größe, der **Führungsgröße**, verglichen wird. Mit dem Vergleichsergebnis wird die Regelgröße so beeinflusst, dass sich die Regelgröße der Führungsgröße angleicht. Der sich ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem **Regelkreis**, statt.

Bei dieser Definition ist wichtig, dass bei Regelungen die Regelgröße fortlaufend gemessen und verglichen wird. Mit dem Vergleichsergebnis wird die Regelgröße beeinflusst. Häufig lässt sich ein vorgeschriebenes Verhalten einer Größe auch mithilfe von anderen Größen einstellen. Solche Einrichtungen werden als Steuerungen bezeichnet.

Beispiel 1.1-1: **Steuerung** der Innentemperatur T_i eines Raumes in Abhängigkeit von der Außentemperatur T_a . Ein Steuerelement steuert die Energiezufuhr für den zu heizenden Raum in Abhängigkeit von der jeweiligen Außentemperatur T_a .

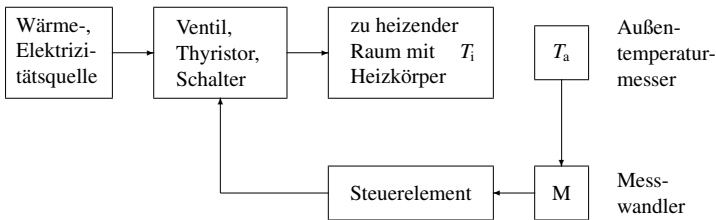


Bild 1.1-1: Technologieschema einer Temperatursteuerung

Das technische System ist eine Steuerung, da die einzustellende Größe, die Innentemperatur T_i , nicht gemessen wird. Die Raumtemperatur T_i wird in Abhängigkeit von der Außentemperatur T_a , der wichtigsten Einfluss- oder Störgröße in einem Heizungssystem, gesteuert. Das Kennzeichen einer Steuerung ist der **offene Wirkungsweg**, die Innentemperatur hat auf die Außentemperatur und damit auf die Verstellung der Energiezufuhr keinen Einfluss. Der offene Wirkungsweg wird auch als **offene Steuerkette** bezeichnet.

Beispiel 1.1-2: **Regelung** der Innentemperatur mit Vorgabe einer Solltemperatur. Wird die Energiezufuhr in Abhängigkeit von der Differenz der Solltemperatur T_s und der Innentemperatur T_i eingestellt, so ergibt sich eine Regelung. Bei Regelungen ist der Wirkungsweg geschlossen, die Anordnung wird als **geschlossener Regelkreis** bezeichnet.

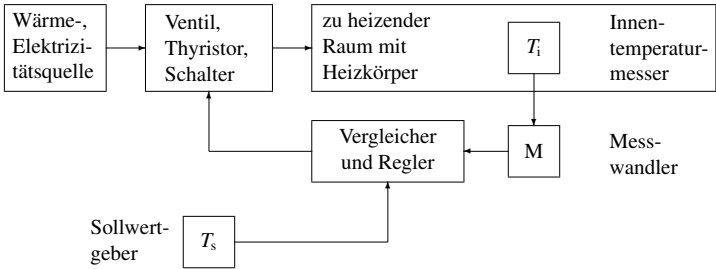


Bild 1.1-2: Technologieschema einer Temperaturregelung

Merkmale und Eigenschaften von Steuerungen und Regelungen sind in Tabelle 1.1-1 zusammengefasst:

Tabelle 1.1-1: Merkmale von Regelungen und Steuerungen

Kennzeichen	Regelung	Steuerung
Wirkungsweg:	geschlossen (Regelkreis)	offen (Steuerkette)
Messung und Vergleich der einzustellenden Größe:	Zu regelnde Größe wird gemessen und verglichen.	Zu steuernde Größe wird nicht gemessen und verglichen.
Reaktion auf Störungen (allgemein):	Wirkt allen Störungen entgegen, die an dem zu regelnden System angreifen.	Reagiert nur auf Störungen, die gemessen und in der Steuerung verarbeitet werden.
Reaktion auf Störungen (zeitlich):	Reagiert erst dann, wenn die Differenz von Soll- und Istwert sich ändert.	Reagiert schnell, da die Störung direkt gemessen wird.
Technischer Aufwand:	Geringer Aufwand: Messung der zu regelnden Größe, Soll-Istwert-Vergleich, Leistungsverstärkung.	Hoher Aufwand, wenn viele Störungen berücksichtigt werden müssen, geringer Aufwand, wenn keine Störungen auftreten.
Verhalten bei instabilen Systemen:	Bei instabilen Systemen müssen Regelungen eingesetzt werden.	Steuerungen sind bei instabilen Systemen unbrauchbar.

Steuerungen berücksichtigen nicht alle störenden Einflüsse (Störgrößen). Im einführenden Beispiel werden nur Änderungen der Außentemperatur berücksichtigt, nicht jedoch Störungen der Energiezufuhr. Steuerungen können meist schneller auf Störungen reagieren. Sinkt die Außentemperatur, so greift die Steuerung bereits ein, bevor die Störung die Innentemperatur verringert.

1.2 Begriffe der Regelungstechnik

Ziel von technischen Regelungen ist die Verbesserung des zeitlichen Verhaltens von physikalischen Größen, zum Beispiel Spannung, Leistung, Drehzahl, Druck, Temperatur.

Die **Regelstrecke** ist der Teil eines technischen Systems, der beeinflusst werden soll. Im Beispiel von Abschnitt 1.1 besteht die Regelstrecke aus Heizkörper und dem zu heizenden Raum. Eingangsgröße der Regelstrecke ist die **Stellgröße** y (zugeführte Wärmeleistung), die zu regelnde Größe heißt **Regelgröße** x und entspricht hier der Temperatur.

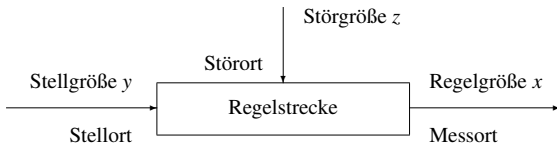


Bild 1.2-1: Regelstrecke mit Ein- und Ausgangsgrößen

Die Regelgröße x (Istwert) wird am **Messort** erfasst und mit der **Führungsgröße** w (Sollwert) durch Differenzbildung verglichen. Die Führungsgröße wird der Regelung von außen vorgegeben, die Regelgröße soll der Vorgabe der Führungsgröße folgen. Die Differenz

$$e = w - x$$

wird als **Regeldifferenz** bezeichnet. **Störungen** werden mit z bezeichnet, sie greifen an **Störorten** an und beeinflussen die Regelgröße x . Eine wichtige Aufgabe der Regelung ist, den Einfluss der Störgrößen auf die Regelgröße zu unterdrücken. Tritt aufgrund einer Störung eine Verringerung der Regelgröße x auf, so bewirkt die Vorzeichenumkehr der Regelgröße x in der Gleichung $e = w - x$ eine Erhöhung der Regeldifferenz e . Die Regeldifferenz wird verstärkt und erzeugt über eine Leistungserhöhung eine **Gegenwirkung** (Gegenkopplung) gegen auftretende Störungen.

Die **Regeldifferenz** e ist die Eingangsgröße des **Reglers**. Der Regler verstärkt die Regeldifferenz. Seine Ausgangsgröße wird mit **Reglerausgangsgröße** y_R bezeichnet. Im Allgemeinen wird die Reglerausgangsgröße y_R auf einen Leistungsverstärker, die **Stelleinrichtung** gegeben. Die Ausgangsgröße der Stelleinrichtung, die **Stellgröße** y wirkt am **Stellort** auf die Regelstrecke. Zwischen Stellort und Messort liegt die **Regelstrecke**.

Zwischen Messort und Stellort liegt die **Regeleinrichtung**. Die Regeleinrichtung besteht aus Messeinrichtung, Vergleichler, Regler (Regelverstärker) und Stelleinrichtung. Alle Geräte, mit Ausnahme der Regelstrecke, bilden die Regeleinrichtung.

Die Regelstrecke wird durch Festlegung von Stellort und Messort abgegrenzt. Für die Untersuchung des regelungstechnischen Verhaltens empfiehlt sich folgende Vereinbarung.

Alle durch Konstruktion und Anlagenkonzept vorgegebenen, nicht veränderbaren Teile des Regelungs-systems sollten zur Regelstrecke gerechnet werden. Die regelungstechnischen Untersuchungen beziehen sich dann auf die Eigenschaften von Reglern, die wählbar oder einstellbar (Struktur und Parameter) sind und bei der Reglersynthese bestimmt werden müssen.

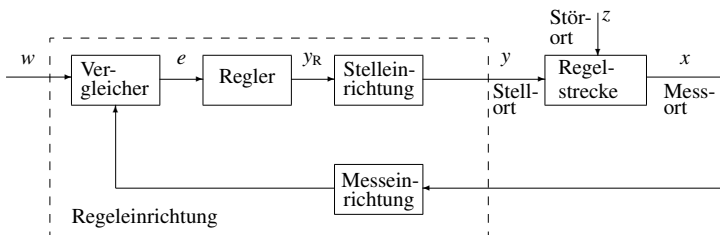


Bild 1.2-2: Regelungstechnische Elemente und Begriffe

Im Einführungsbeispiel wird die Regelstrecke aus Heizkörper und zu heizendem Raum gebildet, die Regelgröße ist die Innentemperatur. Die Ausgangsgröße des Reglers wirkt auf die Stelleinrichtung. Das ist

im Allgemeinen ein Leistungsverstärker: thyristorgesteuerter Leistungssteller, Schalter zur Beeinflussung der elektrischen Leistung oder Ventil zur Einstellung des Wärmestroms.

Über eine Messeinrichtung, zum Beispiel eine Temperaturmessbrücke, wird die Regelgröße gemessen und dem Vergleich zugeführt. Die Führungsgröße (Solltemperatur) kann mit einem Spannungsteiler eingestellt werden.

Beispiel 1.2-1: Wirkungsweise einer Drehzahlregelung

Für die Drehzahlregelung eines Gleichstrommotors ist ein Technologieschema angegeben. Ein Technologieschema enthält die wichtigsten gerätetechnischen Elemente einer Steuerung oder Regelung und gibt einen Überblick über die Funktionsweise.

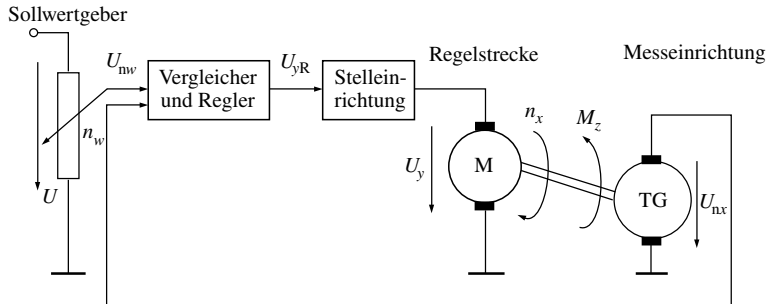


Bild 1.2-3: Technologieschema einer Drehzahlregelung

Die Wirkungsweise der Drehzahlregelung wird für den Fall einer Laststörung M_z untersucht. Die Regelgröße Drehzahl n_x eines Elektromotors M soll konstant gehalten werden. Die Drehzahl wird mit einem Tachogenerator TG gemessen, der eine drehzahlproportionale Spannung U_{nx} erzeugt:

$$U_{nx} = K_T \cdot n_x.$$

K_T ist die Tachogeneratorkonstante mit der Einheit $\text{mV}/\text{min}^{-1}$. Die Führungsgröße U_{nw} wird mit einem Spannungsteiler als Sollwertgeber eingestellt. Dabei entspricht einem Drehwinkel des Spannungsteilers ein bestimmter Wert der Führungsgröße (Soll Drehzahl) n_w . Der Vergleich bildet die Differenz der Spannungen, dabei entsteht eine der Regeldifferenz proportionale Spannung

$$U_e = U_{nw} - U_{nx},$$

die mit der Reglerverstärkung K_R verstärkt wird:

$$U_{yR} = K_R \cdot U_e = K_R \cdot (U_{nw} - U_{nx}).$$

Die Reglerausgangsgröße U_{yR} kann im Allgemeinen die vom Motor benötigte Leistung nicht liefern. Die Stelleinrichtung verstärkt die Leistung, der Spannungsverstärkungsfaktor soll hier Eins betragen:

$$U_y = U_{yR}.$$

Die Stellgröße U_y ist die Ankerspannung des Motors und erzeugt einen Ankerstrom I_A , der ein Antriebsmoment M_A bildet. Die Drehzahl ist von Ankerspannung U_y und Lastmoment M_z abhängig:

$$n_x = f(U_y, M_z).$$

Wesentliche Störgröße ist hier das Lastmoment M_z , dessen Vergrößerung ein Absinken der Drehzahl n_x bewirkt. Die Wirkungsweise der Regelung wird für eine Laststörung M_z angegeben, wobei die Erhöhung einer Größe durch +, die Verringerung durch – gekennzeichnet wird:

Störgröße $M_z \rightarrow +$, Regelgröße $n_x = f(U_y, M_z) \rightarrow -$,
 zurückgeführte Größe $U_{nx} = K_T \cdot n_x \rightarrow -$, Führungsgröße $U_{nw} \rightarrow \text{konstant}$,
 zur Regeldifferenz proportionale Größe $U_e = U_{nw} - U_{nx} \rightarrow +$,
 Reglerausgangsgröße $U_{yR} = K_R \cdot U_e \rightarrow +$, Stellgröße $U_y = U_{yR} \rightarrow +$,
 Ankerstrom $I_A = f(U_y) \rightarrow +$, Antriebsmoment $M_A = f(I_A) \rightarrow +$,
 Regelgröße $n_x = f(U_y, M_z) \rightarrow +$.

Diese Regelungsstruktur wird allgemein bei Drehzahlregelungen eingesetzt. Für viele Antriebsprobleme bildet sie die Grundlage der Realisierung: Antriebe für Fördereinrichtungen, Hauptantriebe bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, Achsantriebe für Industrieroboter.

$x_a(z)$ und $x_e(z)$ lassen sich ausklammern. Der Quotient $\frac{x_a(z)}{x_e(z)}$ ist die Impulsübertragungsfunktion oder **z-Übertragungsfunktion** $G(z)$ des zeitdiskreten Systems:

$$G(z) = \frac{x_a(z)}{x_e(z)} = \frac{b_m \cdot z^m + b_{m-1} \cdot z^{m-1} + \dots + b_1 \cdot z + b_0}{a_n \cdot z^n + a_{n-1} \cdot z^{n-1} + \dots + a_1 \cdot z + a_0} = \frac{Z(z)}{N(z)}.$$

Für die Berechnung von Differenzengleichungen mit dem Rechner ist die um n Schritte nach rechts verschobene Gleichung besser geeignet:

$$\begin{aligned} a_n \cdot x_{a,k} + a_{n-1} \cdot x_{a,k-1} + \dots + a_1 \cdot x_{a,k-n+1} + a_0 \cdot x_{a,k-n} \\ = b_m \cdot x_{e,k-n+m} + b_{m-1} \cdot x_{e,k-n+m-1} + \dots + b_1 \cdot x_{e,k-n+1} + b_0 \cdot x_{e,k-n}. \end{aligned}$$

Die z -Übertragungsfunktion ist:

$$G(z) = \frac{x_a(z)}{x_e(z)} = \frac{b_m \cdot z^{m-n} + b_{m-1} \cdot z^{m-1-n} + \dots + b_1 \cdot z^{-n+1} + b_0 \cdot z^{-n}}{a_n + a_{n-1} \cdot z^{-1} + \dots + a_1 \cdot z^{-n+1} + a_0 \cdot z^{-n}}.$$

Beispiel 11.5-19: Für die Differenzengleichung 3. Ordnung

$$a_3 \cdot x_{a,k+3} + a_2 \cdot x_{a,k+2} + a_1 \cdot x_{a,k+1} + a_0 \cdot x_{a,k} = b_2 \cdot x_{e,k+2} + b_1 \cdot x_{e,k+1} + b_0 \cdot x_{e,k}$$

mit $n = 3$, $m = 2$ ist die z -Übertragungsfunktion zu berechnen:

$$x_a(z) \cdot [a_3 \cdot z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0] = x_e(z) \cdot [b_2 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_0],$$

$$G(z) = \frac{x_a(z)}{x_e(z)} = \frac{Z(z)}{N(z)} = \frac{b_2 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_0}{a_3 \cdot z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0}.$$

Für die um $n = 3$ Schritte verschobene Differenzengleichung

$$a_3 \cdot x_{a,k} + a_2 \cdot x_{a,k-1} + a_1 \cdot x_{a,k-2} + a_0 \cdot x_{a,k-3} = b_2 \cdot x_{e,k-1} + b_1 \cdot x_{e,k-2} + b_0 \cdot x_{e,k-3}$$

erhält man durch Multiplikation von Zähler und Nenner der z -Übertragungsfunktion mit $z^{-n} = z^{-3}$:

$$G(z) = \frac{x_a(z)}{x_e(z)} = \frac{Z(z)}{N(z)} = \frac{b_2 \cdot z^{-1} + b_1 \cdot z^{-2} + b_0 \cdot z^{-3}}{a_3 + a_2 \cdot z^{-1} + a_1 \cdot z^{-2} + a_0 \cdot z^{-3}}.$$

11.5.4.2 z -Übertragungsfunktionen von Basis- und Standardregelalgorithmen

Die z -Übertragungsfunktionen von regelungstechnischen Basiselementen und Standardregelalgorithmen sind in Tabelle 11.5-10 zusammengestellt. Die zugehörigen zeitdiskreten Algorithmen (Differenzengleichungen) befinden sich in Tabelle 11.2-3, dort sind zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Gleichungen sowie die LAPLACE-Übertragungsfunktionen angegeben.

Tabelle 11.5-10 enthält die kontinuierliche Darstellung des Basiselements oder des Reglers als Zeitgleichung und LAPLACE-Übertragungsfunktion und die zugehörige diskrete z -Übertragungsfunktion. Für alle Elemente mit unverzögerten Differenzial-Elementen (D-, PD-, PID-Elemente) wurde die Diskretisierung Differenzenbildung rückwärts (Backward Euler) angewendet. Die Diskretisierung mit der Differenzenbildung vorwärts (Forward Euler) führt bei diesen Elementen zu nichtkausalen Algorithmen, mit der Trapeznäherung (Umkehrung Trapezoidal) ergeben sich instabile Algorithmen.

Für zusammengesetzte Elemente (PD-, PDT₁-, PI-, PID-, PIDT₁-Elemente) werden die z -Übertragungsfunktionen mit parallelen Komponenten und in der geschlossenen Darstellung angegeben. Elemente mit Integral-Anteil werden für die Diskretisierungen Rechtecknäherung linke Intervallgrenze (Integration Forward Euler), Rechtecknäherung rechte Intervallgrenze (Integration Backward Euler) und Trapeznäherung

(Integration Trapezoidal) berechnet (Abschnitte 11.2.3.1, 11.2.3.2). Für solche Elemente wird neben dem Regelalgorithmus (Stellungs-, Positionsalgorithmus) auch der zugehörige Geschwindigkeitsalgorithmus (inkrementeller Algorithmus) abgeleitet. T ist das Abtastzeitintervall bei zeitdiskreten Systemen.

Für die Berechnung der Differenzengleichungen (Tabelle 11.2-3) und z -Übertragungsfunktionen (Tabelle 11.5-10) werden Rechenregeln der z -Transformation angewendet:

Bei Differenzialoperationen wird die kontinuierliche LAPLACE-Variable s durch folgende Diskretisierungen z -transformiert (Tabelle 11.8-1):

Differenzenbildung vorwärts (Differenziation Forward Euler)	$s \rightarrow \frac{z-1}{T}$,	$G(z) = G(s) _{s \rightarrow \frac{z-1}{T}}$,
Differenzenbildung rückwärts (Differenziation Backward Euler)	$s \rightarrow \frac{1-z^{-1}}{T} = \frac{z-1}{T \cdot z}$,	$G(z) = G(s) _{s \rightarrow \frac{z-1}{T \cdot z}}$,
Trapeznäherung (Differenziation Umkehrung Trapezoidal)	$s \rightarrow \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}$,	$G(z) = G(s) _{s \rightarrow \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}}$.

Bei Integraloperationen wird $1/s$ durch folgende z -Übertragungsfunktionen ersetzt:

Rechtecknäherung mit der linken Intervallgrenze (Integration Forward Euler)	$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T}{z-1}$,
Rechtecknäherung mit der rechten Intervallgrenze (Integration Backward Euler)	$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T \cdot z}{z-1}$,
Trapeznäherung (Integration Trapezoidal)	$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1}$.

Die diskreten Variablen der Differenzengleichungen werden mit folgenden Rechenregeln z -transformiert (Abschnitte 11.2.3.1, 11.2.3.2, 11.5.2.3):

$$\begin{aligned} y_k &\longleftrightarrow y(z), & y_{k-1} &\longleftrightarrow z^{-1} \cdot y(z), & y_{k-2} &\longleftrightarrow z^{-2} \cdot y(z), & \dots \\ e_k &\longleftrightarrow e(z), & e_{k-1} &\longleftrightarrow z^{-1} \cdot e(z), & e_{k-2} &\longleftrightarrow z^{-2} \cdot e(z), & \dots \end{aligned}$$

Für Elemente mit Integral-Anteil lässt sich ein Geschwindigkeitsalgorithmus angeben. Die Stellgrößendifferenz $\Delta y_k = y_k - y_{k-1} = y(kT) - y((k-1)T)$ von zwei aufeinander folgenden Abtastzeitpunkten $t_k = kT$, $t_{k-1} = (k-1)T$ wird z -transformiert:

$$\Delta y_k = y_k - y_{k-1} \rightarrow \Delta y(z) = y(z) - z^{-1} \cdot y(z) = (1 - z^{-1}) \cdot y(z) = \frac{z-1}{z} \cdot y(z),$$

mit $y(z) = G_R(z) \cdot e(z)$ ist der inkrementelle Zuwachs der Stellgröße:

$$\Delta y(z) = (1 - z^{-1}) \cdot y(z) = \underbrace{(1 - z^{-1}) \cdot G_R(z)}_{G_{\Delta R}(z)} \cdot e(z) = G_{\Delta R}(z) \cdot e(z).$$

Die z -Übertragungsfunktion $G_{\Delta R}(z)$ des Geschwindigkeitsalgorithmus berechnet sich aus der z -Übertragungsfunktion $G_R(z)$ des Stellungsalgorithmus mit

$$G_{\Delta R}(z) = (1 - z^{-1}) \cdot G_R(z) = \frac{z-1}{z} \cdot G_R(z).$$

Beispiel 11.5-20: Für einen Regelkreis mit einer Regelstrecke $G_S(s)$ mit zwei Verzögerungszeitkonstanten T_{S1} , T_{S2} soll ein zeitkontinuierlicher PIDT₁-Regler $G_R(s)$ in multiplikativer Form eingesetzt werden. Mit der Nachstellzeitkonstanten T_{Nm} und der Vorhaltzeitkonstanten T_{Vm} des PIDT₁-Reglers werden die Verzögerungszeitkonstanten T_{S1} , T_{S2} der Regelstrecke $G_S(s)$ kompensiert. Die Überschwingweite $\ddot{u}$ bei Sprungaufschaltung soll $\ddot{u} \leq 5\%$ betragen. Die zeitkontinuierliche Regelung wird berechnet und durch eine zeitdiskrete Regelung mit quasikontinuierlichem Regelverhalten ersetzt.

Berechnung des Regelkreises mit einem zeitkontinuierlichen PIDT₁-Regler $G_R(s)$:

Die Zeitkonstanten T_{S1} , T_{S2} der Regelstrecke $G_S(s)$ mit $K_S = 5$, $T_{S1} = 20$ s, $T_{S2} = 4$ s,

$$G_S(s) = \frac{K_S}{(1 + T_{S1} \cdot s) \cdot (1 + T_{S2} \cdot s)}$$

werden mit den Zeitkonstanten $T_{Nm} = T_{S1} = 20$ s, $T_{Vm} = T_{S2} = 4$ s des PIDT₁-Reglers

$$G_R(s) = \frac{K_{Rm} \cdot (1 + T_{Nm} \cdot s) \cdot (1 + T_{Vm} \cdot s)}{T_{Nm} \cdot s \cdot (1 + T_1 \cdot s)}$$

kompensiert:

$$\begin{aligned} G_{RS}(s) &= G_R(s) \cdot G_S(s) \\ &= \frac{K_{Rm} \cdot (1 + T_{Nm} \cdot s) \cdot (1 + T_{Vm} \cdot s)}{T_{Nm} \cdot s \cdot (1 + T_1 \cdot s)} \cdot \frac{K_S}{(1 + T_{S1} \cdot s) \cdot (1 + T_{S2} \cdot s)} = \frac{K_{Rm} \cdot K_S}{T_{Nm} \cdot s \cdot (1 + T_1 \cdot s)}. \end{aligned}$$

Die Verzögerungszeitkonstante T_1 wird zu $T_1 = 0.25 \cdot T_{Vm} = 1$ s gewählt. Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises hat das Verhalten eines PT₂-Elements:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{G_{RS}(s)}{1 + G_{RS}(s)} \\ &= \frac{\frac{K_{Rm} \cdot K_S}{T_{Nm} \cdot T_1 \cdot s^2 + T_{Nm} \cdot s + K_{Rm} \cdot K_S}}{1 + \frac{K_{Rm} \cdot K_S}{T_{Nm} \cdot T_1 \cdot s^2 + T_{Nm} \cdot s + K_{Rm} \cdot K_S}} = \frac{\frac{K_{Rm} \cdot K_S}{T_{Nm} \cdot T_1}}{s^2 + \frac{1}{T_1} \cdot s + \frac{K_{Rm} \cdot K_S}{T_{Nm} \cdot T_1}} \stackrel{!}{=} \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2 \cdot D \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2}. \end{aligned}$$

Mit dem Koeffizientenvergleich $\left[\frac{1}{T_1} \stackrel{!}{=} 2 \cdot D \cdot \omega_0, \frac{K_{Rm} \cdot K_S}{T_{Nm} \cdot T_1} \stackrel{!}{=} \omega_0^2 \right]$ und der Gleichung für die Dämpfung des PT₂-Elements $D = 1 / \sqrt{1 + (\pi / \ln \ddot{u})^2}$ wird die Reglerverstärkung ermittelt:

$$K_{Rm} = \frac{1}{4 \cdot D^2 \cdot K_S} \cdot \frac{T_{Nm}}{T_1} = \frac{1 + (\pi / \ln \ddot{u})^2}{4 \cdot K_S} \cdot \frac{T_{Nm}}{T_1} = 2.0997.$$

Berechnung des Regelkreises mit einem zeitdiskreten PIDT₁-Regler $G_R(z)$:

Für die zeitdiskrete Regelung wird das Abtastzeitintervall T kleiner als die kleinste Zeitkonstante T_1 des Regelungssystems gewählt: $T = 0.01$ s, $T_1 = 0.01$ s. Mit den Werten $K_{Rm} = 2.0997$, $T_{Nm} = 20$ s, $T_{Vm} = 4$ s, $T_1 = 1$ s, $T = 0.01$ s ergeben sich für den Regelalgorithmus des zeitdiskreten PIDT₁-Reglers, multiplikative Form (Rechtecknäherung linke Intervallgrenze (I-Element), Differenzenbildung vorwärts (DT₁-Element)), folgende Realisierungsmöglichkeiten (Bild 11.5-16).

(1) Differenzengleichung nach Tabelle 11.2-3:

$$\begin{aligned} y_k &= \underbrace{\frac{2 \cdot T_1 - T}{T_1}}_{a_1} \cdot y_{k-1} - \underbrace{\frac{T_1 - T}{T_1}}_{a_2} \cdot y_{k-2} \\ &\quad + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{T_{Vm}}{T_1}}_{b_0} \cdot e_k - \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{2 \cdot T_{Nm} \cdot T_{Vm} - T \cdot (T_{Nm} + T_{Vm})}{T_{Nm} \cdot T_1}}_{b_1} \cdot e_{k-1} \\ &\quad + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T) \cdot (T_{Vm} - T)}{T_{Nm} \cdot T_1}}_{b_2} \cdot e_{k-2} \\ &= a_1 \cdot y_{k-1} + a_2 \cdot y_{k-2} + b_0 \cdot e_k + b_1 \cdot e_{k-1} + b_2 \cdot e_{k-2}. \end{aligned}$$

(2) Geschlossene Darstellung nach Tabelle 11.5-10:

$$\begin{aligned}
 y(z) &= \frac{\underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{T_{Vm}}{T_1} \cdot z^2}_{b_0} - \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{2 \cdot T_{Nm} \cdot T_{Vm} - T \cdot (T_{Nm} + T_{Vm})}{T_{Nm} \cdot T_1}}_{b_1} \cdot z + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T) \cdot (T_{Vm} - T)}{T_{Nm} \cdot T_1}}_{b_2}}{\underbrace{z^2 - \frac{2 \cdot T_1 - T}{T_1} \cdot z + \frac{T_1 - T}{T_1}}_{\substack{-a_1 \quad -a_2}}} \cdot e(z) \\
 &= G_R(z) \cdot e(z) = \frac{b_0 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_2}{z^2 - a_1 \cdot z - a_2} \cdot e(z).
 \end{aligned}$$

Die Realisierung der Differenzengleichung und der geschlossenen Darstellung von $G_R(z)$ für die Ermittlung der Stellgröße y_k , $y(z)$ ist aufwendig (Bild 11.5-16, (1), (2)), empfindlich gegen Parameterschwankungen und erfordert zur Realisierung eine hohe Genauigkeit der Berechnung der Koeffizienten und ist daher nicht zu empfehlen.

(3) Die Darstellung mit parallelen P-, I- und DT₁-Komponenten ist einfacher zu implementieren (Bild 11.5-16, (3)). Für den zeitdiskreten PIDT₁-Regler (Rechtecknäherung linke Intervallgrenze (I-Element), Differenzenbildung vorwärts (DT₁-Element)), multiplikative Form, in paralleler (additiver) Darstellung ist: $K_{Ra} = 2.415$, $T_{Na} = 23$ s, $T_{Va} = 2.478$ s, $T_1 = 1$ s, $T = 0.01$ s.

$$\begin{aligned}
 G_R(z) &= \frac{y(z)}{e(z)} \\
 &= \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{T_{Nm} + T_{Vm} - T_1}{T_{Nm}}}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Rm}}{T_{Nm}} \cdot \frac{T}{z-1}}_{\text{I-Anteil}} \\
 &\quad + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T_1) \cdot (T_{Vm} - T_1)}{T_{Nm}} \cdot \frac{z-1}{T_1 \cdot z - (T_1 - T)}}_{\text{DT1-Anteil}} \\
 &= \underbrace{\frac{K_{Ra}}{T_{Na}}}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Ra}}{T_{Na}} \cdot \frac{T}{z-1}}_{\text{I-Anteil}} + \underbrace{K_{Ra} \cdot T_{Va} \cdot \frac{z-1}{T_1 \cdot z - (T_1 - T)}}_{\text{DT1-Anteil}} \\
 &= \underbrace{\frac{2.415}{P=K_P=K_{Ra}}}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{\frac{0.105}{I=K_I=K_{Ra}/T_{Na}} \cdot \frac{T}{z-1}}_{\text{I-Anteil}} + \underbrace{\frac{5.984}{D=K_D=K_{Ra} \cdot T_{Va}} \cdot \frac{z-1}{T_1 \cdot z - (T_1 - T)}}_{\text{DT1-Anteil}}.
 \end{aligned}$$

(4) Der Simulink-Block Discrete PID-Controller realisiert den PIDT₁-Regler in folgender Form (Bild 11.5-16, (4)):

$$\begin{aligned}
 G_R(z) &= P + I \cdot T \cdot \frac{1}{z-1} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot T \cdot \frac{1}{z-1}} \\
 &= P + I \cdot \frac{T}{z-1} + D \cdot \frac{z-1}{(1/N) \cdot z - (1/N - T)} \\
 &= \underbrace{\frac{K_{Ra}}{P}}_P + \underbrace{\frac{K_{Ra}}{T_{Na}} \cdot \frac{T}{z-1}}_I + \underbrace{\frac{K_{Ra} \cdot T_{Va}}{D}}_D \cdot \frac{z-1}{\underbrace{\frac{T_1}{1/N} \cdot z - \left(\frac{T_1}{1/N} - T\right)}_{1/N}}, \\
 P &= K_P = K_{Ra} = 2.415, \quad I = K_I = \frac{K_{Ra}}{T_{Na}} = \frac{K_{Rm}}{T_{Nm}} = 0.105 \text{ s}^{-1}, \quad D = K_D = K_{Ra} \cdot T_{Va} = 5.984 \text{ s}, \\
 N &= 1/T_1 = 1 \text{ s}^{-1}, \quad T = 0.01 \text{ s}.
 \end{aligned}$$

(5) Der PIDT_1 -Regelalgorithmus lässt sich in Simulink auch als MATLAB Function realisieren. Die zeitdiskrete Gleichung in Komponentenform aus Tabelle 11.2-3 ist:

$$y_k = \underbrace{K_{\text{Rm}} \cdot \frac{T_{\text{Nm}} + T_{\text{Vm}} - T_1}{T_{\text{Nm}}}}_{K_{\text{Ra}}} \cdot e_k + \underbrace{\frac{K_{\text{Rm}}}{T_{\text{Nm}}}}_{K_{\text{Ra}}/T_{\text{Na}}} \cdot T \cdot e_{k-1} + \frac{T_1 - T}{T_1} \cdot y_{\text{DT1},k-1} + \underbrace{K_{\text{Rm}} \cdot \frac{(T_{\text{Nm}} - T_1) \cdot (T_{\text{Vm}} - T_1)}{T_{\text{Nm}} \cdot T_1}}_{K_{\text{Ra}} \cdot T_{\text{Va}}/T_1} \cdot (e_k - e_{k-1}).$$

Der in Bild 11.5-16, (5), dargestellte MATLAB Function-Block hat folgenden Inhalt:

```
function yk = PIDT1_Regler(ek, KRa, TNa, TVa, T1, T)
persistent ek_1 yIlk yDTlk
%PIDT1-Regelalgorithmus (Positions-Regler, Stellungs-Regler)
%Initialisierung: yIlk, yDTlk, ek_1 für den ersten Aufruf
if isempty(ek_1) ek_1 = 0.0; end
if isempty(yIlk) yIlk = 0.0; end
if isempty(yDTlk) yDTlk = 0.0; end
yPk = KRa*ek; %P-Anteil
%I-Anteil: yIlk = yIlk_1 + KRa*...
yIlk = yIlk + KRa*(T/TNa)*ek_1;
%DT1-Anteil: yDTlk = ((T1-T)/T1)*yDTlk_1 + KRa* ...
yDTlk = ((T1-T)/T1)*yDTlk + KRa*(TVa/T1)*(ek-ek_1);
yk = yPk + yIlk + yDTlk; %Stellgröße yk;
ek_1 = ek; %rekursiven Wert übernehmen
```

Durch die Deklaration persistent werden ek_1, yIlk, yDTlk zu statischen Variablen, die gespeicherten Werte stehen bei erneutem Aufruf des MATLAB Function-Blocks wieder zur Verfügung.

(6) Der zeitkontinuierliche PIDT_1 -Regler, multiplikative Form, wird in der ausmultiplizierten Form simuliert (Bild 11.5-16, (6)):

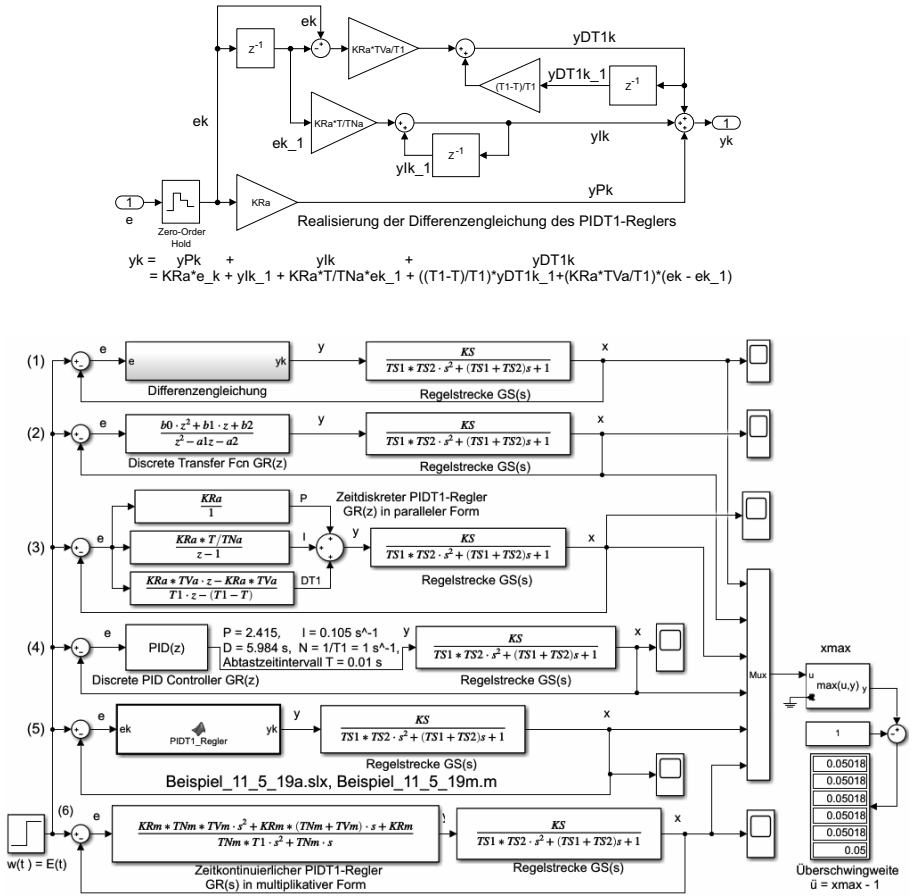
$$G_{\text{R}}(s) = \frac{K_{\text{Rm}} \cdot (1 + T_{\text{Nm}} \cdot s) \cdot (1 + T_{\text{Vm}} \cdot s)}{T_{\text{Nm}} \cdot s \cdot (1 + T_1 \cdot s)} = \frac{K_{\text{Rm}} \cdot T_{\text{Nm}} \cdot T_{\text{Vm}} \cdot s^2 + K_{\text{Rm}} \cdot (T_{\text{Vm}} + T_{\text{Nm}}) \cdot s + K_{\text{Rm}}}{T_{\text{Nm}} \cdot T_1 \cdot s^2 + T_{\text{Nm}} \cdot s}.$$

In Bild 11.5-16 sind die digitalen Regler mit dem Abtastzeitintervall $T = 0.01$ s simuliert, die vorgegebene Überschwingweite $\ddot{u} \leq 5\%$ wird mit ausreichender Näherung eingestellt. Mit den Abtastzeitintervallen $T = 0.1$ s, 0.01 s, 0.001 s, ergeben sich für die Regelkreise mit digitalen Reglern $\ddot{u} = 5.178\%$, 5.018% , 5.002% .

Bei der Anwendung des PIDT_1 -Geschwindigkeitsalgorithmus wird das Integral-Element (inkrementaler Stellmotor, z. B. Schrittmotor) der Regelstrecke zugeordnet. Der PIDT_1 -Geschwindigkeitsalgorithmus kann mit folgenden Realisierungsmöglichkeiten (Bild 11.5-17) implementiert werden:

(1) Differenzengleichung nach Tabelle 11.2-3:

$$\begin{aligned} \Delta y_k &= \underbrace{\frac{T_1 - T}{T_1}}_{a_1} \cdot \Delta y_{k-1} + \underbrace{K_{\text{Rm}} \cdot \frac{T_{\text{Vm}}}{T_1}}_{b_0} \cdot e_k \\ &\quad - \underbrace{K_{\text{Rm}} \cdot \frac{2 \cdot T_{\text{Nm}} \cdot T_{\text{Vm}} - T \cdot (T_{\text{Nm}} + T_{\text{Vm}})}{T_{\text{Nm}} \cdot T_1}}_{b_1} \cdot e_{k-1} + \underbrace{K_{\text{Rm}} \cdot \frac{(T_{\text{Nm}} - T) \cdot (T_{\text{Vm}} - T)}{T_{\text{Nm}} \cdot T_1}}_{b_2} \cdot e_{k-2} \\ &= a_1 \cdot \Delta y_{k-1} + b_0 \cdot e_k + b_1 \cdot e_{k-1} + b_2 \cdot e_{k-2}. \end{aligned}$$

Bild 11.5-16: Realisierung von zeitdiskreten $PIDT_1$ -Reglern (Abtastzeitintervall $T = 0.01$ s)

(2) Geschlossene Darstellung nach Tabelle 11.5-10:

$$\Delta y(z) = \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{T_{Vm}}{T_1} \cdot z^2}_{b_0} - \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{2 \cdot T_{Nm} \cdot T_{Vm} - T \cdot (T_{Nm} + T_{Vm})}{T_{Nm} \cdot T_1}}_{b_1} \cdot z + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T) \cdot (T_{Vm} - T)}{T_{Nm} \cdot T_1}}_{b_2} \cdot e(z)$$

$$= G_{\Delta R}(z) \cdot e(z) = \frac{b_0 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_2}{z^2 - a_1 \cdot z} \cdot e(z)$$

Die Realisierung der Differenzengleichung und der geschlossenen Darstellung von $G_R(z)$ für die Ermittlung der Stellgröße ist aufwendig (Bild 11.5-17, (1), (2)), empfindlich gegen Parameterschwankungen und erfordert zur Realisierung eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung der Koeffizienten.

(3) Die Darstellung mit parallelen P-, I- und DT₁-Komponenten ist einfacher zu implementieren (Bild 11.5-17, (3)). Für den zeitdiskreten PIDT₁-Regler, multiplikative Form, in paralleler (additiver) Darstellung ist: $K_{Ra} = 2.415$, $T_{Na} = 23$ s, $T_{Va} = 2.478$ s, $T_1 = 1$ s, $T = 0.01$ s.

$$\begin{aligned}
 G_{\Delta R}(z) &= \frac{\Delta y(z)}{e(z)} \\
 &= \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{T_{Nm} + T_{Vm} - T_1}{T_{Nm}} \cdot \frac{z-1}{z}}_{\Delta P\text{-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Rm}}{T_{Nm}} \cdot \frac{T}{z}}_{\Delta I\text{-Anteil}} \\
 &\quad + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T_1) \cdot (T_{Vm} - T_1)}{T_{Nm}} \cdot \frac{(z-1)^2}{T_1 \cdot z^2 - (T_1 - T) \cdot z}}_{\Delta DT1\text{-Anteil}} \\
 &= \underbrace{K_{Ra} \cdot \frac{z-1}{z}}_{\Delta P\text{-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Ra}}{T_{Na}} \cdot \frac{T}{z}}_{\Delta I\text{-Anteil}} + \underbrace{K_{Ra} \cdot T_{Va} \cdot \frac{(z-1)^2}{T_1 \cdot z^2 - (T_1 - T) \cdot z}}_{\Delta DT1\text{-Anteil}} \\
 &= \underbrace{2.415}_{K_P=K_{Ra}} \cdot \frac{z-1}{z} + \underbrace{0.105}_{K_I=K_{Ra}/T_{Na}} \cdot \frac{T}{z} + \underbrace{5.984}_{K_D=K_{Ra} \cdot T_{Va}} \cdot \frac{(z-1)^2}{T_1 \cdot z^2 - (T_1 - T) \cdot z}.
 \end{aligned}$$

(4) Der PIDT₁-Geschwindigkeitsalgorithmus lässt sich in Simulink auch als MATLAB Function realisieren. Die zeitdiskrete Gleichung in Komponentenform ist in Tabelle 11.2-3 angegeben:

$$\begin{aligned}
 \Delta y_{DT1,k} &= \frac{T_1 - T}{T_1} \cdot \Delta y_{DT1,k-1} + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T_1) \cdot (T_{Vm} - T_1)}{T_{Nm} \cdot T_1}}_{\frac{K_{Ra} \cdot T_{Va}}{T_1}} \cdot (e_k - 2 \cdot e_{k-1} + e_{k-2}), \\
 \Delta y_k &= \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{T_{Nm} + T_{Vm} - T_1}{T_{Nm}}}_{K_{Ra}} \cdot (e_k - e_{k-1}) + \underbrace{\frac{K_{Rm}}{T_{Nm}} \cdot T}_{K_{Ra}/T_{Na}} \cdot e_{k-1} + \Delta y_{DT1,k}.
 \end{aligned}$$

Der in Bild 11.5-17, (4), dargestellte MATLAB Function-Block hat folgenden Inhalt:

```

function delta_yk = PIDT1_Regler_inkr(ek, KRa, TNa, TVa, T1, T)
persistent ek_1 ek_2 I_yDT1k
%Inkrementeller Regler, Geschwindigkeitsalgorithmus
%Initialisierung: I_yDT1k, ek_1, ek_2 für den ersten Aufruf
if isempty(ek_1)    ek_1    = 0.0; end
if isempty(ek_2)    ek_2    = 0.0; end
if isempty(I_yDT1k) I_yDT1k = 0.0; end
I_yPk    = KRa*(ek-ek_1);           %inkrementeller P-Anteil
I_yI1k   = KRa*(T/TNa)*ek_1;       %inkrementeller I-Anteil
%inkrementeller DT1-Anteil
I_yDT1k = (T1-T)/T1*I_yDT1k + KRa*(TVa/T1)*(ek-2.0*ek_1+ek_2);
delta_yk = I_yPk + I_yI1k + I_yDT1k; %inkrementelle Stellgröße
ek_2 = ek_1; ek_1 = ek;           %rekursive Werte übernehmen

```


Tabelle 17.7-2: Continuous Block Library,
Modellblöcke für zeitkontinuierliche lineare Systeme (Fortsetzung)

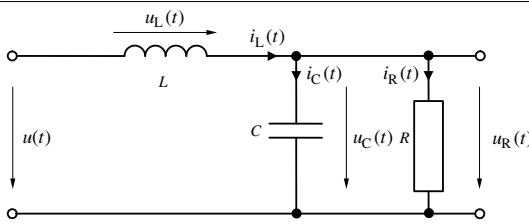
Blocksymbole	Beschreibung
	 Für das RLC-Netzwerk mit der Eingangsgröße $u(t)$ sollen die Signalverläufe der physikalischen Systemgrößen $i_L(t)$, $i_C(t)$, $i_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$, $u_R(t)$ bestimmt werden. Bauelementgleichungen: Induktivität: $L \cdot \frac{di_L}{dt} = u_L$, Kapazität: $C \cdot \frac{du_C}{dt} = i_C$, Widerstand: $u_R = R \cdot i_R$, $0 = u_R - R \cdot i_R$. Kirchhoffsche Gesetze: $i_L = i_C + i_R$, $u = u_L + u_C$, $u_C = u_R$, $0 = i_L - i_C - i_R$, $0 = u - u_L - u_C$, $0 = u_C - u_R$. Das Deskriptor-System wird aus zwei Differenzialgleichungen und vier algebraischen Gleichungen gebildet: $\underbrace{\begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_E \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} di_L/dt \\ di_C/dt \\ di_R/dt \\ du_L/dt \\ du_C/dt \\ du_R/dt \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} i_L \\ i_C \\ i_R \\ u_L \\ u_C \\ u_R \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_b \cdot u(t).$ Werden alle Systemgrößen in den Ausgangsvariablenvektor $y(t)$ übernommen, dann erhält die Ausgangsgleichung folgende Form: $\underbrace{\begin{bmatrix} i_L \\ i_C \\ i_R \\ u_L \\ u_C \\ u_R \end{bmatrix}}_{y(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} i_L \\ i_C \\ i_R \\ u_L \\ u_C \\ u_R \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_d \cdot u(t).$

Tabelle 17.7-2: Continuous Block Library,
Modellblöcke für zeitkontinuierliche lineare Systeme (Fortsetzung)

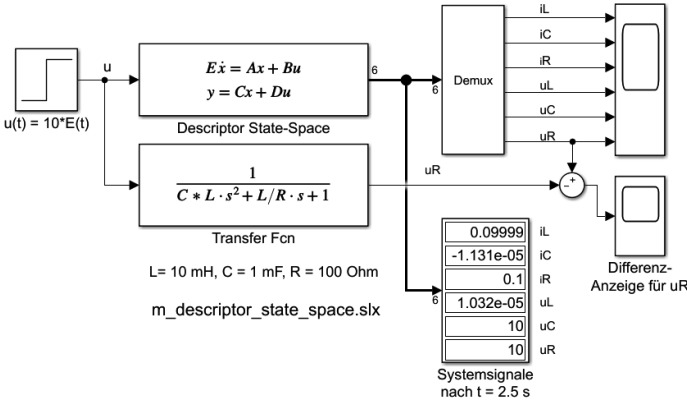
Blocksymbole	Beschreibung
	Die Deskriptor-Matrix E hat Zeilen und Spalten mit Null-Elementen und ist daher singular (nicht invertierbar). Für die Simulation wird ein Descriptor State-Space-Block mit den Matrizen bzw. Vektoren E, A, b, C, d eingesetzt. Für die Werte $L = 10 \text{ mH}$, $C = 1 \text{ mF}$, $R = 100 \Omega$ werden im folgenden Simulink-Modell die Berechnungen durchgeführt. Zum Vergleich wird u_R mit der Übertragungsfunktion $G(s) = \frac{u_R(s)}{u(s)}$ bestimmt. Für die Bauelemente ergeben sich die komplexen Widerstandswerte ($j\omega \rightarrow s$) zu: $Z_L(s) = s \cdot L, \quad Z_C(s) = \frac{1}{s \cdot C}, \quad Z_R(s) = R.$ Mit der Spannungsteilerregel ist die Spannung $u_R(s)$ am Parallel-Widerstand $Z_{\text{par}}(s) = Z_C(s) \parallel Z_R(s)$: $u_R(s) = \frac{Z_{\text{par}}(s)}{Z_{\text{ges}}(s)} \cdot u(s) = \frac{\frac{Z_C(s) \cdot Z_R(s)}{Z_C(s) + Z_R(s)}}{Z_L + \frac{Z_C(s) \cdot Z_R(s)}{Z_C(s) + Z_R(s)}} \cdot u(s)$ $= \frac{1}{L \cdot C \cdot s^2 + \frac{L}{R} \cdot s + 1} \cdot u(s) = G_R(s) \cdot u(s).$  Nach $t = 2.5 \text{ s}$ sind die Einschwingvorgänge abgeklungen, die Systemgrößen haben die Werte $i_L = i_R \approx 0.1 \text{ A} = \frac{10 \text{ V}}{100 \Omega}, \quad i_C \approx 0 \text{ A}, \quad u_L \approx 0 \text{ V}, \quad u_C = u_R = 10 \text{ V}.$ Die Deskriptor-Darstellung erlaubt die computergestützte Modellierung komplexer technischer Systeme, da die Systemgrößen über die Ausgangsgleichung zugänglich sind.

Tabelle 17.7-2: Continuous Block Library,
Modellblöcke für zeitkontinuierliche lineare Systeme (Fortsetzung)

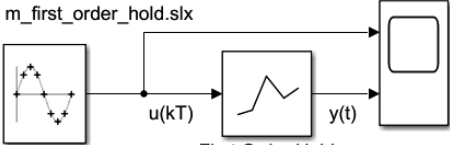
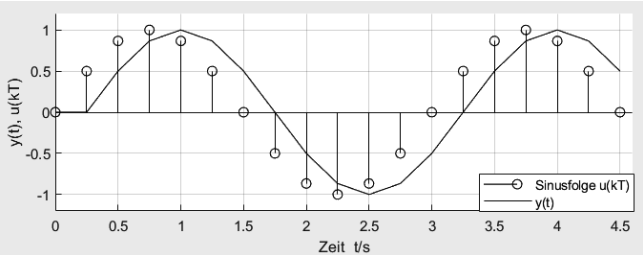
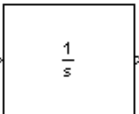
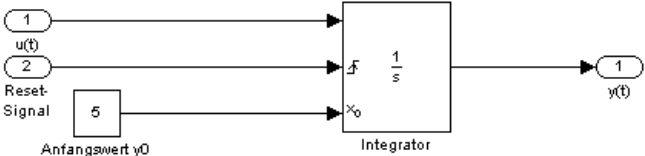
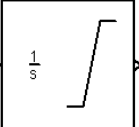
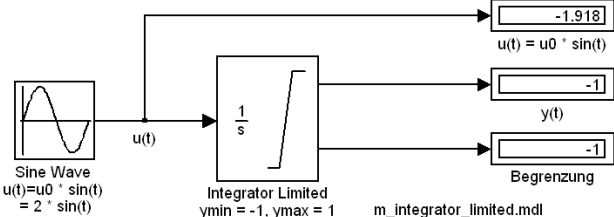
Blocksymbole	Beschreibung
 First Order Hold	First Order Hold liefert eine stückweise lineare Extrapolation $y(t)$ der Eingangsfolge $u(kT)$. Die zeitdiskrete Eingangsfolge $u(kT)$ wird durch ein kontinuierliches Signal $y(t)$ angenähert. Blockparameter: Anfangswert der Ausgangsgröße $y(t = 0)$, Art der Extrapolation, Angabe über den zulässigen Fehler. Beispiel: Die Eingangs-Sinusfolge $u(kT) = \sin\left(\frac{2\pi}{3} \cdot kT\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad \text{Abtastzeitintervall } T = 0.25 \text{ s},$ wird mit der Extrapolationsmethode Slow (Avoid Overshoot) $y(t) = y(kT) + \frac{u(kT) - u((k-1)T)}{T} \cdot (t - kT), \quad \text{für } kT \leq t < (k+1)T,$ linear approximiert, Ausgangsgröße ist $y(t)$. m_first_order_hold.slx  Sinusfolge First Order Hold y(t)  Zeit t/s Legend:  Sinusfolge $u(kT)$  $y(t)$

Tabelle 17.7-2: Continuous Block Library,
Modellblöcke für zeitkontinuierliche lineare Systeme (Fortsetzung)

Blocksymbole	Beschreibung
 Integrator	Integrator mit internem oder externem Anfangswert und Rücksetzmöglichkeit, das Eingangssignal wird integriert. Blockparameter: Anfangswert y_0, Eingangsgröße: $u(t)$, Ausgangsgröße: $y(t) = \int u(t) dt + y_0$.  Beispiel: Integration mit Anfangswert und Rücksetzsignal mit 0-1-Flanke, (weiteres Beispiel 14.3-13).
 Integrator Limited	Integrator Limited, Integrator mit internem oder externem Anfangswert, Rücksetzmöglichkeit und Begrenzung (Sättigung), das Eingangssignal wird integriert. Blockparameter: Anfangswert y_0, unterer Grenzwert $y_{\min}$, oberer Grenzwert $y_{\max}$, Eingangsgröße: $u(t)$, Ausgangsgröße: $y(t) = \int u(t) dt + y_0, y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}$.  Beispiel: Integration mit Begrenzung.

20 Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik, regelungstechnische Begriffe

20.1 Deutschsprachige Fachliteratur

- ADAMY, J.: Nichtlineare Systeme und Regelungen.
3. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, 2018.
- ANGERMANN, A.; BEUSCHEL, M.; RAU, M.; WOHLFARTH, U.: MATLAB – Simulink – Stateflow: Grundlagen, Toolboxes, Beispiele.
10. Auflage, Berlin, De Gruyter Oldenbourg Verlag, 2020.
- AUTORENKOLLEKTIV: Regelungs- und Steuerungstechnik in der Versorgungstechnik.
8. Auflage, Berlin, VDE Verlag, 2017.
- BEUCHER, O.: MATLAB und Simulink. Eine kursorientierte Einführung.
München, mitp Verlag, 2013.
- BODE, H.: Systeme der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink: Analyse und Simulation.
2. Auflage, München, Wien, Oldenbourg Verlag, 2013.
- BOHN, C.; UNBEHAUEN, H.: Identifikation dynamischer Systeme.
Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016.
- BUSCH, P.: Elementare Regelungstechnik.
8. Auflage, Würzburg, Vogel Communications Group, 2012.
- DIN IEC 60050-351: 2014-09: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch
– Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351: 2013).
- FÖLLINGER, O.: Regelungstechnik.
12. Auflage, Berlin, VDE Verlag, 2016.
- FÖLLINGER, O.; KLUWE, M.: LAPLACE-, FOURIER- und z-Transformation.
10. Auflage, Berlin, VDE Verlag, 2011.
- GEERING, H. P.: Regelungstechnik.
6. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2013.
- GLÖCKNER, M.: Simulation mechatronischer Systeme: Grundlagen und Beispiele für MATLAB und Simulink.
2. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2018.
- JUNGLAS, P.: Praxis der Simulationstechnik.
Haan-Gruiten, Verlag Europa-Lehrmittel, 2014.
- KAHLERT, J.: Crash-Kurs Regelungstechnik.
3. Auflage, Berlin, VDE-VERLAG, 2019.
- LITZ, L.: Grundlagen der Automatisierungstechnik.
2. Auflage, De Gruyter Oldenbourg, München, 2012.
- LUNZE, J.: Regelungstechnik, Band I, II.
12., 10. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2020, 2020.
- MANN, H.; SCHIFFELGEN, H.; FRORIEP, R.; WEBERS, K.: Einführung in die Regelungstechnik.
12. Auflage, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2018.
- MAYR, O.: Zur Frühgeschichte der technischen Regelungen.
München, Wien, R. Oldenbourg Verlag, 1969.
- ORLOWSKI, P.: Praktische Regelungstechnik.
10. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013.

PIETRUSZKA, W. D.; GLÖCKLER, M.: MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis.

5. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2020.

PHILIPPSEN, H.-W.: Einstieg in die Regelungstechnik mit Python.

3. Auflage, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2019.

REINSCHKE, K.: Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie.

2. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014.

SCHMID, D.; u. a.: Steuern und Regeln für Maschinenbau und Mechatronik.

16. Auflage, Haan, Verlag Europa-Lehrmittel, 2019.

SCHNEIDER, W.; HEINRICH, B.: Praktische Regelungstechnik.

5. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2019.

SCHRÖDER, D.: Elektrische Antriebe – Regelung von Antriebssystemen.

4. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2015.

SCHULZ, G.; GRAF, K.: Regelungstechnik 1.

5. Auflage, München, De Gruyter Oldenbourg Verlag, 2015.

Regelungstechnik 2. 3. Auflage, München, Oldenbourg Verlag, 2013.

SCHWEIZER, W.: MATLAB kompakt.

6. Auflage, Berlin, De Gruyter, 2016.

STEFFENHAGEN, B.: Kleine Formelsammlung Regelungstechnik.

München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2010.

STEIN, U.: Programmieren mit MATLAB.

6. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2017.

TRÖSTER, F.: Steuerungs- und Regelungstechnik für Ingenieure.

Band 1: Regelungstechnik. Band 2: Steuerungstechnik.

4. Auflage, Berlin, Walter de Gruyter Verlag, 2015.

UNBEHAUEN, H.: Regelungstechnik. Band I, II, III.

15., 9., 7. Auflage, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 2008, 2009, 2011.

WALTER, H.: Grundkurs Regelungstechnik.

3. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013.

ZACHER, S.: Übungsbuch Regelungstechnik.

6. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016.

ZACHER, S.; REUTER, M.: Regelungstechnik für Ingenieure.

15. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017.

20.2 Fremdsprachige Fachliteratur

CHAPMAN, ST. J.: Essentials of MATLAB Programming.

3. Auflage, Stamford, CT, Cengage Learning, 2018.

DINGYU XUE; YANG QUAN CHEN: System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink.

Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2013.

DINGYU XUE; YANG QUAN CHEN: Modeling, Analysis and Design of Control Systems with MATLAB and Simulink.

Singapore, World Scientific Publishing, 2015.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H.: Modern Control Systems.

13. Auflage, Pearson Education, Harlow, UK, 2017.

ESFANDIARI; R. S.; BEI, L.: Modeling and Analysis of Dynamic Systems.

3. Auflage, Boca Raton, FL, CRC Press, 2018.

- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A.: Feedback Control of Dynamic Systems.
8. Auflage, Pearson Education, Harlow, UK, 2019.
- GRIMBLE, M. J.; MAJECKI, P.: Nonlinear Industrial Control Systems: Optimal Polynomial Systems and State-Space Approach.
London, Springer-Verlag, 2020.
- KLEE, H.; ALLEN, R.: Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink.
3. Auflage, London, CRC Press, 2017.
- LUENBERGER, D. G.: Introduction to Dynamic Systems.
New York, John Wiley & Sons, 1979.
- LURIE, B. J.; ENRIGHT, P. J.: Classical Feedback Control with Nonlinear Multi-Loop Systems: With MATLAB and Simulink.
3. Auflage, Boca Raton, Taylor & Francis, CRC Press, 2020.
- MAHMOUD, M. S.: Fuzzy Control, Estimation and Diagnosis: Single and Interconnected Systems.
London, Springer-Verlag, 2018.
- MOHAN, N.: Advanced Electric Drives: Analysis, Control and Modeling Using MATLAB / Simulink.
Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2014.
- NAGOOR KANI, A.: Control Systems Engineering.
2. Auflage, New Delhi, Oxford & IBH Publishing Co., 2020.
- NISE, M. S.: Control Systems Engineering.
8. Auflage, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2019.
- ZIMMERMANN, H.-J.: Fuzzy Set Theory and its Applications.
4. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2012.

20.3 Regelungstechnische Begriffe: deutsch-englisch

A bschwächung	attenuation
Abtast	
– halteglied	sample-and-hold element
– element	sampling element, sampler
– frequenz	sampling rate
– intervall	sampling interval, sampling period
– periode	sampling period
– rate	sampling rate
– regelung	sampled-data control system, sampling control
– signal	sampled signal
– zeit, – zeitintervall	sampling period
– zeitpunkt	sampling time instance
Abtaster	sampling element, sampler
Abweichung	offset, deviation
adaptive Regelung	adaptive control system
adaptives Regelungssystem	adaptive control system
Additionsstelle	summing point
Ähnlichkeitstransformation	similarity transformation
Algorithmus	algorithm
Allpass	all-pass
Amplitude	magnitude
Amplituden	
– gang	amplitude response, magnitude plot
– reserve	gain margin
analog	analog, analogue
Analog-Digital-Wandler	analog-to-digital converter
analoge Größe	analog variable, quantity
analoger Regler	analog controller
analoges Signal	analog signal
Anfangs	initial
– wert	– value
– wertsatz	– -value theorem
– zustand	– state
Anregelzeit	control rise time
Anstiegs	ramp
– antwort	– response
– funktion	– function
– zeit	rise time
Antwortfunktion	
– der homogenen Zustandsgleichung	zero-input response
– der inhomogenen Zustandsgleichung	zero-state response
aperiodisch	aperiodic, overdamped, $D > 1$
aperiodische Dämpfung	aperiodic damping
aperiodischer Grenzfall	critically damped, $D = 1$
AR-Modell	AR model, auto-regressive model
Arbeitspunkt	operating point
ARMA-Modell	ARMA model, auto-regressive moving-average model

ARMAX-Modell	ARMAX model, auto-regressive moving-average model with extra (exogenous) variable
ARX-Modell	ARX model, auto-regressive model with extra (exogenous) variable
asymptotisches Verhalten	asymptotic behavior
Ausgangs	output
– gleichung	– equation
– gröÙe	– variable, – quantity
– matrix	– matrix
– rückführung	– feedback
– vektor	– vector
Ausregelzeit	settling time
B andbreite	bandwidth
Begrenzung	limiting
Beharrungszustand	steady-state
–, Verhalten im	– response
beobachtbares System	observable system
Beobachtbarkeit	observability
Beobachtbarkeitsmatrix	observability matrix
Beobachtungs	observer
– fehler	– -error
– fehlergleichung	– -error state equation
– matrix	– matrix
– modell	– model
– normalform	observable canonical form
– vektor	observer vector
Bereich	range
Beruhigungszeit	settling time
Beschreibungsfunktion	describing function
–, Methode der	– analysis
Betrags	amplitude optimum
– optimum	integral of absolute value of error (IAE)
– regelfläche	bilinear transformation
Bilineartransformation	
bleibende	steady-state error
– Regelabweichung	steady-state error
– Regeldifferenz	functional block
Block	block diagram
Blockdiagramm	block diagram
BODE-Diagramm	BODE plot, BODE diagram
BOX-JENKINS-Modell	BOX-JENKINS model, BJ model
C harakteristische Gleichung	characteristic equation
charakteristisches Polynom	characteristic polynomial
D -Element	D (derivative)-element
D-Regler	derivative controller
D-Verhalten	rate action, derivative action

Dämpfung	damping, attenuation
–, aperiodische	–, aperiodic
Dämpfungs	damping
– faktor	– factor
– koeffizient	– coefficient
– konstante	– constant
– verhältnis	– ratio
Dead-Beat-Regelung	deadbeat control
Dead-Beat-Sprungantwort	deadbeat step response
Dezibel (dB)	decibel
Differenzialgleichung	differential equation
–, homogene	–, homogeneous
–, I. Ordnung	–, first order
–, II. Ordnung	–, second order
Differenzengleichung	difference equation
Differenzier	derivative
– beiwert	– constant
– zeitkonstante	– time constant
Differenzierelement I. Ordnung	first-order lead element
differenzierendes Verhalten	rate action
Digital-Analog-Wandler	digital-to-analog-converter
digitale Regelung	digital control
digitaler Regler	digital controller
digitales Signal	digital signal
Dreipunkt-Element	three-step action element, three-position element
	relay with dead zone
Dreipunkt-Regelung	three-step control
Dreipunkt-Regler	three-step controller, three-position controller
DT ₁ -Element	derivative element with first order lag
Durchgangs	feedthrough
– matrix	– matrix
– vektor	– vector
– faktor	– factor
Durchtrittsfrequenz	crossover frequency
Durchtrittskreisfrequenz	crossover angular frequency
dynamische Kompensation	dynamic compensation
dynamisches	
– Verhalten	dynamic behaviour
– System	dynamic system
Eck	corner
– frequenz	– frequency, break point
– kreisfrequenz	– angular frequency
Eigen	
– kreisfrequenz	damped natural angular frequency
– wert	eigenvalue
Eingangs	input
– gröÙe	– variable
– matrix	– matrix

– signal	– signal
– vektor	– vector
eingeschwungener Zustand	steady state
Eingrößensystem	single-input single output (SISO) system
Einheitsanstieg	unit ramp
– antwort	– response
– funktion	– function
Einheitsimpuls	unit-impulse
– antwort	– response
– funktion	– function
Einheits	unit
– kreis	– circle
– matrix	– matrix
– vektor	– vector
– sprungantwort	– -step response
– sprungfunktion	– -step function
einschleifige Regelung	single-loop feedback system
Einschwingzeit	settling time
Einstellregeln	tuning rules
Element, nichtlineares	nonlinear element
Element mit	nonlinearity
– Begrenzung	–, limiting
– eindeutiger Kennlinienfunktion	–, single-valued
– Hysterese	– with hysteresis
– Lose	–, backlash
– mehrdeutiger Kennlinienfunktion	–, multivalued
– Sättigung	–, saturating
– Totzone	–, dead zone
– zweideutiger Kennlinienfunktion	–, two-valued
– Zweipunktverhalten	–, on-off
Empfindlichkeit	sensitivity
Endwertsatz	final-value theorem
F altungen	convolution
– integral	– integral
– satz	– theorem
Feder-Masse-Dämpfer-System	spring-mass-dashpot system
Festwertregelung	setpoint control, regulator system, constant value control
Filter-Element	filter element
Flussdiagramm	flow diagram
Folgeregelung	follow-up control, servo control
Freiheitsgrad	degree of freedom
Frequenz	frequency
– bereich	– domain
– gang	– response
– gang des geschlossenen Regelkreises	closed-loop frequency response
– gang des offenen Regelkreises	open-loop frequency response
–, ungedämpfte	–, natural
Führungsgröße	reference variable, reference input

Führungsübertragungsfunktion
Führungsverhalten

control transfer function
command input response, command response

gedämpfte Schwingung

damped oscillation

Gegenkopplung

negative feedback

Gesamtübertragungsfunktion

overall transfer function

Geschwindigkeits

velocity

– fehler

– (ramp) error

– regelung

– control system

geschlossener

closed action

– Wirkungsablauf

closed action path

– Wirkungsweg

Gewichtsfunktion

impulse response

gewöhnliche Differenzialgleichung

ordinary differential equation

Gleichungsfehler

equation error

gleitende Mittelwertbildung

moving-average

Grenzfall, aperiodischer

critically damped, $D = 1$

Grenzzyklus

limit cycle

Gütefunktional

cost function

–, Quadratisches

quadratic performance index

Gütekriterium

performance criterion, performance index

Halteglied nullter Ordnung

zero-order hold element (ZOH)

Handregelung

manual control

homogene Differenzialgleichung

homogeneous differential equation

– I. Ordnung

–, first order

– II. Ordnung

–, second order

HURWITZ-Kriterium

HURWITZ's stability criterion

Hysterese

hysteresis

I-Element

I (integral)-element

I-Regler

integral controller

I-Verhalten

integral action

I-Zustandsregelung

I (integral)-control with state feedback

Identifikation eines Systems

system identification

imaginäre Polstellen

imaginary poles

Imaginärteil

imaginary part

Impuls

impulse

– antwort

– response

– folgefunktion

– -function sequence, pulse-function sequence

– funktion

– function

instabiles System

unstable system

Integrier

integration constant

– beiwert

reset windup, integral windup

– sättigung

integral time constant, constant of integrator

– zeitkonstante

integrierendes Verhalten

integral action

Inverse einer Matrix

inverse matrix

inverse LAPLACE-Transformation
Istwert
IT₁-Element

inverse LAPLACE transform
actual value
I (integral)-element with first order lag

Kanonische Form

canonical form

Kaskaden

cascade

- regelung
- struktur

- control
- structure

Kennkreisfrequenz

undamped natural angular frequency

Kennlinie

characteristic curve

Kettenstruktur

series structure

Knotenpunkt

node

Kompensation, dynamische

dynamic compensation

Kreiskriterium

circle criterion

Kreis

loop

- struktur
- verstärkung

- structure
- gain, closed loop gain

kritische Dämpfung (PT₂-Element mit $D = 1$)

critical damping

kritisch gedämpftes System (PT₂-Element mit $D = 1$)

critically damped system

Lageregelung

position control system

LAPLACE

LAPLACE

- -Transformierte
- -Transformationspaar
- -Übertragungsfunktion
- -Variable

- transform
- transform pair

continuous-time transfer function

- variable

Leistungsverstärker

power amplifier

linear-quadratischer Regler

linear-quadratic regulator

lineares

linear

- Regelungssystem
- zeitinvariantes Regelungssystem

- control system
- time-invariant (LTI) control system

Linearisierung

linearization

Linearität

linearity

linke s -Halbebene

left half s -plane (LHP)

LJAPUNOW

LYAPUNOV

- , erste Methode von
- -Funktion
- , zweite Methode von
- , (direkte Methode von)

- , first method of
- function
- second method of
- (direct method of)

Lose

backlash nonlinearity,
system with play

LUENBERGER-Beobachter

LUENBERGER observer

MA-Modell

MA model, moving-average model

mathematische Modellbildung

mathematical modeling

mathematisches Modell

- model

Matrix-e-Funktion

matrix exponential

Mehrgrößensystem	multivariable system, multiple-input multiple-output (MIMO) system
Mehrpunktglied	multi-position element
Mess	
– einrichtung	– measuring device
– wandler	– transducer
Methode der Beschreibungsfunktion	describing function method
Methode der kleinsten Quadrate	least squares method, LS
Minimalphasensystem	minimum-phase system
Mitkopplung	positive feedback
Mittelwertbildung, gleitende	moving-average
Modell	
–, autoregressives	AR model, auto-regressive model
–, autoregressives, mit gleitender Mittelwertbildung mit externer Variablen	ARMAX model, auto-regressive moving-average model with extra (exogenous) variable
–, autoregressives, mit externer Variablen	ARX model, auto-regressive model with extra (exogenous) variable
– mit gleitender Mittelwertbildung	MA model, moving-average model
–, parametrisches	parametric model
–, selbstbezügliches	AR model, auto-regressive model
MOORE-PENROSE-Inverse	MOORE-PENROSE pseudoinverse
N achstellzeit	reset time
Nachstellzeitkonstante	reset time constant
Nennerpolynom	denominator polynomial
nichtlineare Differenzialgleichung	nonlinear differential equation
nichtlineares	nonlinear
– Element	– element
– Regelungssystem	– feedback control system
– System	– system
Nichtlinearität	nonlinearity
– als prinzipielle Eigenschaft	–, inherent
– absichtlich eingeführte	–, intentional
nichtsteuerbares System	uncontrollable system
Normalform (kanonische Form)	normal form
normierte Dämpfung	damping ratio
Nullstelle	zero
NYQUIST-Kriterium	NYQUIST stability criterion
O perationsverstärker	operational amplifier
Optimale Regelung	optimal control
Optimierung	optimization
Ortskurve der Frequenzgangfunktion	NYQUIST plot, NYQUIST diagram, polar plot
OUTPUT-ERROR-Modell	OUTPUT-ERROR model, OE model
P -	P (proportional)
– Element	– element
– -Regelung	– control

– -Regler	– controller
– -Verhalten	– action
Parallel	parallel
– schaltung	– connection
– struktur	– structure
Parameter	parameter
– empfindlichkeit	– sensitivity
– optimierung	– optimization
– variation	variation of parameters
Parameter	parametric
– identifikation	– identification, – estimation
– schätzverfahren	– estimation method
Partialbruchzerlegung	partial-fraction expansion
PDT ₁ (Lead)-Element (-Regler)	phase-lead compensator
PD-Regler	PD (proportional-plus-derivative) controller
periodisch	periodic, underdamped, $0 \leq D < 1$
Phasen	phase
– ebene	– plane
– gang	– plot, response
–, Methode der -ebene	– plane analysis
– nacheilung	– lag
– portrait	– portrait
– rand	– margin
– reserve	– margin
– schnittkreisfrequenz	– crossover angular frequency
– verschiebung	– shift
– voreilung	– lead
– winkel	– angle
PI-Regler	PI (proportional-plus-integral) controller, two-term controller
PI-Zustandsregelung	PI (proportional-plus-integral) control with state feedback
PID-Regler	PID (proportional-plus-integral-plus-derivative) controller, three-term controller
pneumatischer Regler	pneumatic controller
Pol-Nullstellenplan	pole-zero plot, pole-zero diagram, pole-zero map
Polstelle	pole
Polvorgabe	pole placement
POPOV, Stabilitätskriterium von	POPOV stability criterion
POPOV-Gerade	POPOV line
PPT ₁ (Lag)-Element (-Regler)	phase-lag compensator
PPT ₁ -PDT ₁ -Element (-Regler)	lag-lead compensator
Proportional	proportional
– beiwert	– constant, – gain
– -Regelung	– control
– -Verhalten	– action
Prozess, stochastischer	stochastic process
Pseudoinverse	MOORE-PENROSE pseudoinverse
PT ₁ -Element	first order lag element
PT ₂ -Element	second order lag element
PT ₂ -Element (mit $D > 1$, Kriechfall)	overdamped system

PT₂-Element (mit $D < 1$, Schwingfall)
Pulsweitenmodulation

underdamped system
pulse-width modulation

Quadrate, Methode der kleinsten
Quadratische Regelfläche
Quadratisches Gütefunktional

least squares method, LS
integral of squared error (ISE)
quadratic performance index

Rang einer Matrix
Realteil
rechte s -Halbebene
Regel

rank of matrix
real part
right half s -plane (RHP)
control

- abweichung
 - –, bleibende
- algorithmus
- bereich
- differenz
 - –, bleibende
- faktor
- fläche
- einrichtung
- geschwindigkeit
- gröÙe
- kreis
- strecke

- error
- error, steady state
- algorithm
- range, operating range
- error
- steady-state control error
- factor
- area
- equipment
- rate
- controlled variable, plant output
- loop system, control system

Regelgenauigkeit im Beharrungszustand
Regelung

plant
steady-state control accuracy
closed-loop control, feedback control
feedforward control

- mit Störgrößenaufschaltung

Regelungs

- genauigkeit
- normalform
- system
- system, adaptives
- system mit direkter Gegenkopplung
- technik
- verhalten
- wirkung

control accuracy
controllable canonical form
automatic feedback control system, control system
adaptive control system
unity-feedback control system
control system technology, control engineering
control action, controller action
control action, controller action
compensator, controller, automatic controller, governor
series connection
chain structure
resonant

Regler

Reihenschaltung

Reihenstruktur

Resonanz

- kreisfrequenz
- wert des Amplitudengangs
(PT₂-Element)

- angular frequency
- peak magnitude

reziproke Übertragungsfunktion

inverse transfer function

RICCATI-Gleichung

RICCATI equation

Robuste Regelung

robust control system

ROUTH-Kriterium

ROUTH's stability criterion

ROUTH-Tafel

ROUTH array

Rückführung	feedback
Rückführgröße	– variable
Rückführungsschleife	control loop, feedback loop
rückgeführtes Signal	feedback signal
Rückkopplung	feedback
Rückwärtsdifferenz	backward difference
Ruhelage	equilibrium point, equilibrium state
RUNGE-KUTTA-Verfahren	RUNGE-KUTTA method
S -Ebene	s-plane
Sattelpunkt	saddle point
Sättigung	saturation
Sättigung, Element mit	saturating nonlinearity
Schleife, System mit geschlossener	closed loop system
Schnittfrequenz	crossover frequency
Schwingung	oscillation
–, gedämpfte	damped oscillation
selbsttätige Regelung	automatic control
Signal, rückgeführtes	feedback signal
Signalflussbild	block diagram
Signalflussblock	functional block
Signalflussplan	functional diagram
Signum-Funktion	signum function
Sinus	sine
– antwort	– response
– funktion	– function
Skalarprodukt	scalar product
Sollwert	desired value, set value, reference input, command input, setpoint
Spaltenvektor	column vector
Spiel	backlash
Sprung	step
– antwort	– response
– funktion	– function
Stabilität	stability
–, absolute	–, absolute
–, asymptotische	–, asymptotic
– des offenen Regelkreises	–, open-loop
Stabilitätsuntersuchung	stability analysis
Standardregelkreis	standard control loop
statisches Verhalten	static behaviour
stationäre	steady-state
– Lösung	– solution
– Regeldifferenz	– control error
Stell	actuator
– einrichtung	actuator
– glied	manipulated variable, actuating variable,
– grÖÖße	control signal, actuating signal, plant input
steuerbares System	controllable system

Steuerbarkeit	controllability
Steuerbarkeitsmatrix	controllability matrix
Steuergröße	controlling quantity
Steuerung, Regelung	control
Steuerung, Steuern (offene Wirkungskette)	open-loop control
Steuerung	
– mit geschlossenem Wirkungskreis	feedback control
– mit offenem Wirkungskreis	feedforward control
– mit offener Wirkungskette	feedforward control
Steuerungs	control
– technik	– engineering
– verhalten	– action
– wirkung	– action
stochastische Variable	stochastic variable
stochastischer Prozess	stochastic process
Stör	
– gröÙe	disturbance input
– gröÙenaufschaltung	feedforward control
– signal	disturbance signal
– übertragungsfunktion	disturbance transfer function
– unterdrückung	disturbance rejection
– verhalten	disturbance response
Strecke	controlled system
– mit Ausgleich	– with self-regulation
– ohne Ausgleich	– without self-regulation
Strudelpunkt	focus
Summationselement	summation point
Superpositions (Überlagerungs)-prinzip	principle of superposition
Symmetrisches Optimum	symmetrical optimum
System	
–, dynamisches	dynamical system
– identifikation	system identification
– mit geschlossener Schleife	closed loop system
Systemmatrix	system matrix
T astgrad	duty cycle
TAYLOR-Reihe	TAYLOR-series
Teilzustandsrückführung,	output feedback
Ausgangsrückführung	
Testeingangssignal	test input signal
$t_{\max}$ -Zeit	peak time
Totzeit	dead time, time delay, transport lag
Totzeitelement	dead-time element, transport-lag element
Totzone (Lose, Dreipunktregler, Verstärker)	dead zone (relay, on-off-controller, amplifier), dead band (backlash nonlinearity)
Trajektorie	trajectory
Transitionsmatrix, Zustandsübergangsmatrix	transition matrix
Transponierte einer Matrix	transpose of a matrix
Trapeznäherung	trapezoidal approximation of integral
T_i -Element	dead-time element, transport-lag element
TUSTIN-Formel	TUSTIN's method

Ü beranpassung	overfitting
Übergangsfunktion	unit-step response
Übergangsverhalten	transient behavior, transient response
Überlagerungsprinzip, Superpositionsprinzip	principle of superposition
Überschwingweite	maximum overshoot, overshoot, peak overshoot
Übertragungs	
– block	block, functional block
– element	transfer element
– funktion	transfer function
– funktion des geschlossenen Regelkreises	closed-loop transfer function
– funktion des offenen Regelkreises	open-loop transfer function
– funktion, reziproke	inverse transfer function
– matrix	transfer matrix
– verzögerung	transfer lag
ungedämpfte Frequenz	natural frequency
Unterschwingen	undershoot
V ariable	variable
variable Größe	variable, quantity
Vergleicher	comparator
Verhalten	action, behaviour, performance
–, differenzierendes	rate action
– im Beharrungszustand	steady-state response
–, integrierendes	integral action
Verschiebungsprinzip	principle of shifting
Verstärker	amplifier
Verstärkung	gain, gain factor
Verzögerung	lag, delay
Verzögerungselement I. Ordnung	lag element
Verzögerungszeit	time constant
Verzugszeit	delay time, equivalent dead-time
Verzweigung	branching
Verzweigungselement	branch point
viskose Reibung	viscous friction
viskoser Reibungskoeffizient	viscous friction coefficient
Vorhaltverstärkung	derivative action gain
Voreilung	lead
Vorfilter	prefilter
Vorhalt	derivative action
– -Element	lead element
– zeit	rate time
– zeitkonstante	rate time constant
Vorwärtsdifferenz	forward difference
W asserstandsregelung	water-level control
Wirbelpunkt	center
Wirkung	action
Wirkungsablauf	action
Wirkungskette	
–, Steuerung mit offener	feedforward control

Wirkungskreis

- , Steuerung mit geschlossenem
- , Steuerung mit offenem
- mit offener Wirkungskette

Wirkungslinie

Wirkungs

- plan
- planblock

Wurzelort

- , Amplitudenbedingung
- , Asymptoten
- , Austrittswinkel
- , Eintrittswinkel
- , Konstruktionsregeln
- , Phasenbedingung
- , Verzweigungspunkt
- , Zweige

Wurzelorts

- kurve
- verfahren

z-Ebene

z-Transformation

z-Transformationspaar

z-Übertragungsfunktion

Zählerpolynom

Zeit

- bereich
- konstante
- verhalten
- verzögerung

Zeitgewichtete Betragsregelgröße

zeitinvariantes System

Zeitkonstante

Zeitlinear gewichtete

Quadratische Regelgröße

Zeitquadratgewichtete

Quadratische Regelgröße

zeitvariantes System

Zeitverhalten

Zufallsgröße

Zufallsprozess

Zustand, eingeschwungener

Zustands

- beobachter
- beobachtung
- differenzialgleichung
- gleichungen
- größe
- raum

feedback control

feedforward control

feedforward control

action line

functional

- diagram
- block

root locus

- amplitude (magnitude) condition
- asymptotes
- angle of departure
- angle of arrival
- construction rules
- phase condition
- breakaway point, break-in point
- branches

root locus

- plot
- method

z-plane

z-transform

z-transform pair

z-transfer function

numerator polynomial

time

- domain
- constant
- behaviour, response
- delay, – lag

integral of time multiplied by
absolute value of error (ITAE)

time-invariant system

time constant

integral of time multiplied by
squared error (ITSE)integral of squared time multiplied
by squared error (ISTSE)

time-varying system

time response

random variable, random quantity

stochastic process

steady state

state

- observer
- observation
- differential equation
- equations
- variable
- space

– regelung	– control
– rückführung	– feedback
– übergangsmatrix	– transition matrix
– variable	– variable
– vektor	– vector
Zweipunkt-Element	two-step action element, two-position element
– mit Totzone (Dreipunkt-Element)	relay with dead zone
– mit Hysterese	relay with hysteresis
Zweipunkt-Regelung	bang-bang control, on-off control, two-step control, two-position control, relay feedback control system
Zweipunkt-Regler	two-step controller, two-position controller

20.4 Regelungstechnische Begriffe: englisch-deutsch

a ction	Verhalten, Wirkung, Wirkungsablauf
action line	Wirkungslinie
actual value	Istwert
actuating	
– signal	Stellgröße
– variable	Stellgröße
actuator	Stelleinrichtung, Stellglied
adaptive control system	adaptive Regelung, adaptives Regelungssystem
algorithm	Algorithmus
all-pass	Allpass
amplifier	Verstärker
amplitude	
– optimum	Betragsoptimum
– response	Amplitudengang
analog, analogue	analog
analog	
– controller	analoger Regler
– quantity	analoge Größe
– signal	analoges Signal
– variable	analoge Größe
analog-to-digital converter	Analog-Digital-Wandler
aperiodic	aperiodisch, aperiodisch gedämpft, $D > 1$
aperiodic damping	aperiodische Dämpfung
AR model	AR-Modell, autoregressives Modell, selbstbezügliches Modell
ARMA model	ARMA-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung
ARMAX model	ARMAX-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung mit externer Variablen
ARX model	ARX-Modell, autoregressives Modell mit externer Variablen
asymptotic behavior	asymptotisches Verhalten
attenuation	Abschwächung, Dämpfung
auto-regressive model	AR-Modell, autoregressives Modell, selbstbezügliches Modell

auto-regressive model with extra (exogenous) variable	ARX-Modell, autoregressives Modell mit externer Variablen
auto-regressive moving-average model	ARMA-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung
auto-regressive moving-average model with extra (exogenous) variable	ARMAX-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung mit externer Variablen
automatic	
– control	selbsttätige Regelung
– controller, governor	Regler
– feedback control system	Regelungssystem
b acklash nonlinearity	Lose, Element mit Spiel
backward difference	Rückwärtsdifferenz
bandwidth	Bandbreite
bang-bang control	Zweipunktregelung
behaviour	Verhalten
bilinear transformation	Bilineartransformation
BJ model	BOX-JENKINS-Modell
block	Block, Übertragungsblock
– diagram	Blockdiagramm, Signalflussbild
BODE diagram, BODE plot	BODE-Diagramm
BOX-JENKINS model	BOX-JENKINS-Modell
branch point	Verzweigungselement
branching	Verzweigung
break point	Eckfrequenz
C anonical form	kanonische Form (Normalform)
cascade	Kaskaden
– control	– regelung
– structure	– struktur
center	Wirbelpunkt
chain structure	Reihenstruktur
characteristic	
– equation	charakteristische Gleichung
– curve	Kennlinie
– polynomial	charakteristisches Polynom
circle criterion	Kreiskriterium
closed action	geschlossener Wirkungsablauf
closed action path	geschlossener Wirkungsablauf
closed-loop	
– control	Regelung
– frequency response	Frequenzgang des geschlossenen Regelkreises
– gain	Kreisverstärkung
– system	Regelkreis, System mit geschlossener Schleife
– transfer function	Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises
column vector	Spaltenvektor
command	Sollwert
command input response	Führungsverhalten
command response	Führungsverhalten
comparator	Vergleicher

compensation, dynamic	dynamische Kompensation
compensator	Regler
constant value control	Festwertregelung
continuous	
– control system	zeitkontinuierliche Regelung
– -time transfer function	LAPLACE-Übertragungsfunktion
control	Steuerung, Regelung
– accuracy	Regelungsgenauigkeit
– action	Regelungsverhalten, -wirkung, Steuerungsverhalten, -wirkung
– algorithm	Regelalgorithmus
– area	Regelfläche
– engineering	Regelungs-, Steuerungstechnik
– equipment	Regel Einrichtung
– error	Regelabweichung, Regeldifferenz
– factor	Regelfaktor
– loop	Regelkreis, Rückführungsschleife
– range	Regelbereich
– rate	Regelgeschwindigkeit
– rise time	Anregelzeit
– signal	Stellgröße
– system	Regelkreis, Regelungssystem
– transfer function	Führungsübertragungsfunktion
controllability matrix	Steuerbarkeitsmatrix
controllable	
– canonical form	Regelungsnormalform
– system	steuerbares System
controlled variable	Regelgröße
controlled system	Strecke
– with self-regulation	– mit Ausgleich
– without self-regulation	– ohne Ausgleich
controller	
– (for closed loop control)	Regler
– action	Regelverhalten, -wirkung
controlling quantity	Steuergröße
convolution	
– integral	Faltungsintegral
– theorem	Faltungssatz
corner	Eck
– frequency	– frequenz
– angular frequency	– kreisfrequenz
cost function	Gütefunktional
critical	kritische
– gain	– Verstärkung
– damping	– Dämpfung ($D = 1$ eines PT_2 -Elements, aperiodischer Grenzfall)
critically damped	aperiodischer Grenzfall, $D = 1$
critically damped system	kritisch gedämpftes System (PT_2 -Element mit $D = 1$)
crossover	
– angular frequency	Durchtrittskreisfrequenz

– frequency	Durchtrittsfrequenz, Schnittfrequenz
D (derivative)-element	D-Element
D (derivative)-element with first order lag	DT ₁ -Element
damped natural angular frequency	Eigenkreisfrequenz
damped oscillation	gedämpfte Schwingung
damping	Dämpfung
– coefficient	Dämpfungskoeffizient
– constant	Dämpfungskonstante
– factor	Dämpfungsfaktor
– ratio	normierte Dämpfung, Dämpfungsverhältnis
dc gain	Proportionalbeiwert
dead band (backlash nonlinearity)	Totzone bei einer Lose
deadbeat	Dead-Beat
– control	– -Regelung
– step response	– -Sprungantwort
dead time	Totzeit
dead-time element, transport-lag element	T _T -Element
dead zone (relay, on-off-controller, amplifier)	Totzone bei Dreipunktreger, Verstärker
dead zone nonlinearity	Element mit Totzone
decibel	Dezibel (dB)
degree of freedom	Freiheitsgrad
delay	Verzögerung
delay time	Verzugszeit
denominator polynomial	Nennerpolynom
derivative	
– action	D-Verhalten, Vorhalt
– action gain	Vorhaltverstärkung
– constant	Differenzierbeiwert
– controller	D-Regler
– time constant	Differenzierzeitkonstante
describing function	Beschreibungsfunktion
– method	–, Methode der
– analysis	–, Methode der Beschreibungsfunktion
desired value	Sollwert
deviation	Abweichung
difference equation	Differenzgleichung
differential equation	Differenzialgleichung
–, homogeneous	–, homogene
–, first order	– I. Ordnung
–, second order	– II. Ordnung
digital	
– control	digitale Regelung
– controller	digitaler Regler
– signal	digitales Signal
– -to-analog-converter	Digital-Analog-Wandler
disturbance	Störung
– signal	Störsignal
– rejection	Störunterdrückung
– observation	Störgrößenbeobachtung
– response	Störverhalten

– input	Störgröße
duty cycle	Tastgrad
dynamic	
– behaviour	dynamisches Verhalten
– compensation	dynamische Kompensation
dynamical system	dynamisches System
E igenvalue	Eigenwert
equation error	Gleichungsfehler
equilibrium	
– point	Ruhelage
– state	Ruhelage
equivalent dead-time	Verzugszeit
f eedback	Rückführung, Rückkopplung
– control	Steuerung mit geschlossenem Wirkungskreis, Regelung
– control system	Regelungssystem
– loop	Rückführungsschleife, Gegenkopplung
–, negative	Gegenkopplung
–, positive	Mitkopplung
– signal	rückgeführtes Signal
– variable	Rückführgröße
feedforward control	Regelung mit Störgrößenaufschaltung, Steuerung mit offenem Wirkungskreis, mit offener Wirkungskette
feedthrough	Durchgangs
– matrix	– matrix
– vector	– vektor
– factor	– faktor
filter element	Filter-Element
final-value theorem	Endwertsatz
first-order	
– lag element	PT ₁ -Element, Verzögerungselement 1. Ordnung,
– lead element	Differenziererelement 1. Ordnung
flow diagram	Flussdiagramm
focus	Strudelpunkt
follow-up control	Folgeregelung
forward difference	Vorwärtsdifferenz
frequency	Frequenz
– domain	– bereich
– response	– gang
– response graph	BODE-Diagramm
functional	
– block	Übertragungsblock, Block, Signalflussblock, Wirkungsplanblock
– block diagram	Signalflussbild
– diagram	Signalflussplan, Wirkungsplan
g ain, gain factor	Verstärkung
gain margin	Amplitudenreserve

HURWITZ's stability criterion
hysteresis

I (integral)-control with state feedback
I (integral)-element with first order lag
imaginary

- part
- poles

impulse

- function
- function sequence
- response

initial

- state
- value

initial-value theorem

input

- matrix
- signal
- variable
- vector

integration constant

integral

- action
- controller
- element
- of absolute value of error (IAE)
- of squared error (ISE)
- of squared time multiplied by squared error (ISTSE)
- of time multiplied by absolute value of error (ITAE)
- of time multiplied by squared error (ITSE)
- time constant
- windup

inverse

- LAPLACE transform
- matrix
- transfer function

lag

lag element

- , first order
- , second order

lag-lead compensator

LAPLACE

- transform
- transform pair
- variable

lead

HURWITZ-Kriterium
Hysterese

I-Zustandsregelung
IT₁-Element

Imaginärteil
imaginäre Polstellen

Impuls

- funktion
- folgefunktion
- antwort, Gewichtsfunktion

Anfangs

- zustand
- wert
- wertsatz

Eingangs

- matrix
- signal
- gröÙe
- vektor

Integrierbeiwert

integrierendes Verhalten, I-Verhalten

I-Regler

I-Element

Betragsregelfläche

Quadratische Regelfläche

Zeitquadratgewichtete Quadratische Regelfläche

Zeitgewichtete Betragsregelfläche

Zeitlinear gewichtete Quadratische Regelfläche

Integrierzeitkonstante

Integriersättigung

inverse LAPLACE-Transformation

Inverse einer Matrix

reziproke Übertragungsfunktion

Verzögerung

PT₁-Element

PT₂-Element

PPT₁-PDT₁-Element (-Regler)

LAPLACE

- -Transformierte
- -Transformationspaar
- -Variable

Voreilung

lead element	Vorhalt-Element
least squares method	Methode der kleinsten Quadrate
left half s -plane (LHP)	linke s -Halbebene
limit cycle	Grenzyklus
limiting	Begrenzung
linear	lineares
– control system	– Regelungssystem
– quadratic regulator	linear-quadratischer Regler, LQR
– time-invariant (LTI) control system	zeitinvariantes Regelungssystem
linearity	Linearität
linearization	Linearisierung
loop	Kreis
– gain	– verstärkung
– structure	– struktur
LS	Methode der kleinsten Quadrate
LUENBERGER observer	LUENBERGER-Beobachter
LYAPUNOV	LJAPUNOW
–, first method of	–, erste Methode von
– function	– -Funktion
–, second method of	–, zweite Methode von
(direct method of)	(direkte Methode von)
MA model	MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung
magnitude	Amplitude
magnitude plot	Amplitudengang
manipulated variable	Stellgröße
manual control	Handregelung
mathematical	mathematisches Modell
– model	mathematische Modellbildung
– modeling	
matrix	Matrix-e-Funktion
– exponential	Rang einer Matrix
–, rank of	Überschwingweite
maximum overshoot	Messeinrichtung
measuring device	Minimalphasensystem
minimum-phase system	
model	AR-Modell
–, auto-regressive	ARMA-Modell, autoregressives Modell mit gleiten-
–, auto-regressive moving-average	der Mittelwertbildung
–, auto-regressive moving-average with	ARMAX-Modell, autoregressives Modell mit glei-
extra (exogenous) variable	ter Mittelwertbildung mit externer Variablen
–, auto-regressive with extra (exogenous)	ARX-Modell, autoregressives Modell mit externer
variable	Variablen
–, moving-average	MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung
–, parametric	parametrisches Modell
moving-average	gleitende Mittelwertbildung
moving-average model	MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung
MOORE-PENROSE pseudoinverse	MOORE-PENROSE-Inverse, Pseudoinverse
multi-position element	Mehrpunktglied
multivalued nonlinearity	Element mit mehrdeutiger Kennlinienfunktion

multivariable system

Mehrgrößensystem

Natural frequency

ungedämpfte Frequenz

negative feedback

Gegenkopplung

node

Knotenpunkt

nonlinear

nichtlineares

- element
- system
- control system
- feedback control system
- differential equation

- Element
- System
- Regelungssystem
- Regelungssystem

nonlinearity

nichtlineare Differenzialgleichung

- , backlash
- , dead zone
- , hysteresis

nichtlineares Element mit

- Lose
- Totzone
- Hysterese

nonlinearity

- , inherent
- , intentional

Nichtlinearität als prinzipielle Eigenschaft
absichtlich eingeführte Nichtlinearität

nonlinearity

nichtlineares Element mit

- , limiting
- , multivalued
- , on-off
- , saturating
- , single-valued
- , two-valued

- Begrenzung
- mehrdeutiger Kennlinienfunktion
- Zweipunktverhalten
- Sättigung
- eindeutiger Kennlinienfunktion
- zweideutiger Kennlinienfunktion

normal form

Normalform (kanonische Form)

numerator polynomial

Zählerpolynom

NYQUIST

- stability criterion
- plot, NYQUIST diagram

NYQUIST-Kriterium

Ortskurve der Frequenzgangfunktion

Observability

Beobachtbarkeit

- matrix

Beobachtbarkeitsmatrix

observable

- canonical form
- system

Beobachtungsnormalform

observer based control

beobachtbares System

observer-error

Beobachtung, Regelung mit Beobachter

- state equation

Beobachtungsfehler

observer

– gleichung

- matrix
- model
- vector

Beobachtungs

- matrix
- modell
- vektor

OE model

OUTPUT-ERROR-Modell

offset

Abweichung, bleibende Regelabweichung

on-off control

Zweipunktregelung

open-loop

- control
- frequency response
- stability
- transfer function

Steuerung, steuern

Frequenzgang des offenen Regelkreises

Stabilität des offenen Regelkreises

Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises

operating	Arbeitspunkt
– point	Regelbereich
– range	Operationsverstärker
operational amplifier	Optimale Regelung
optimal control	Optimierung
optimization	gewöhnliche Differenzialgleichung
ordinary differential equation	Schwingung
oscillation	Ausgangs
output	– gleichung
– equation	– rückführung, Teilzustandsrückführung
– feedback	– matrix
– matrix	– gröÙe
– quantity	– gröÙe
– variable	– vektor
– vector	OUTPUT-ERROR-Modell
OUTPUT-ERROR model	Gesamtübertragungsfunktion
overall transfer function	aperiodisch, aperiodisch gedämpft, $D > 1$
overdamped	PT ₂ -Element (mit $D > 1$, Kriechfall)
overdamped system	Überanpassung
overfitting	Überschwingweite
overshoot	
P (proportional)-element	P-Element
parallel	Parallel
– connection	– schaltung
– structure	– struktur
parameter	Parameter
– optimization	– optimierung
– sensitivity	– empfindlichkeit
parametric	Parameteridentifikation, Parameterschätzung
– estimation, identification	Parameterschätzverfahren
– estimation method	Parameteridentifikation, Parameterschätzung
– identification	parametrisches Modell
– model	Partialbruchzerlegung
partial-fraction expansion	PD-Regler
PD (proportional-plus-derivative)-controller	Überschwingweite
peak	$t_{\max}$ -Zeit
– overshoot	Verhalten
– time	Gütekriterium
performance	Gütekriterium
– criterion	periodisch
– index	Phasen
periodic	– winkel
phase	– schnittkreisfrequenz
– angle	– nacheilung
– crossover angular frequency	– voreilung
– lag	– reserve, Phasenrand
– lead	– ebene
– margin	
– plane	

– plane analysis	–, Methode der -ebene
– plot	– gang
– portrait	– portrait
– response	– gang
– shift	– verschiebung
phase-lag compensator	PPT ₁ (Lag)-Element (-Regler)
phase-lead compensator	PDT ₁ (Lead)-Element (-Regler)
PID (proportional-plus-integral-plus-derivative) controller	PID-Regler
PI (proportional-plus-integral) controller	PI-Regler
PI (proportional-plus-integral) control	
– with state feedback	PI-Zustandsregelung
plant	Regelstrecke
– input	Stellgröße
– output	Regelgröße
pneumatic controller	pneumatischer Regler
polar plot	Ortskurve der Frequenzgangfunktion
pole	Polstelle
– placement	Polvorgabe
pole-zero plot, pole-zero diagram,	Pol-Nullstellenplan
pole-zero map	
POPOV line	POPOV-Gerade
POPOV stability criterion	Stabilitätskriterium von POPOV
position control system	Lageregelung
positive feedback	Mitkopplung
power amplifier	Leistungsverstärker
prefilter	Vorfilter
principle	
– of amplification	Verstärkungsprinzip
– of linearity	Linearitätsprinzip
– of shifting	Verschiebungsprinzip
– of superposition	Superpositions-(Überlagerungs)-prinzip
process, stochastic	stochastischer Prozess, Zufallsprozess
proportional	
– action	P-Verhalten, Proportional-Verhalten
– constant, – gain	Proportionalbeiwert
– control	P-Regelung, Proportional-Regelung
– controller	P-Regler
pseudoinverse	MOORE-PENROSE-Inverse, Pseudoinverse
pulse-function sequence	Impulsfolgefunktion
pulse-width modulation	Pulsweitenmodulation
Q uadratic performance index	Quadratisches Gütefunktional
quantity	Variable, variable Größe
R amp	Anstiegs
– function	– funktion, Rampenfunktion
– response	– antwort, Rampenantwort
random	Zufalls
– quantity	– grÖße

– variable	– gröÙe
range	Bereich
rate	
– action	D-Verhalten, differenzierendes Verhalten
– time	Vorhaltzeit
– time constant	Vorhaltzeitkonstante
real part	Realteil
reference input, – variable	FührungsgröÙe, Sollwert
regulator system	Festwertregelung
relay feedback control system	Zweipunktregelung
relay	Zweipunkt-Element
– with dead zone	– mit Totzone, Dreipunkt-Element
– with hysteresis	– mit Hysterese
reset	
– time	Nachstellzeit
– time constant	Nachstellzeitkonstante
– windup	Integriersättigung
resonant	Resonanz
– angular frequency	– kreisfrequenz
– peak magnitude	– wert des Amplitudengangs (PT ₂ -Element)
response function	Antwortfunktion
RICCATI equation	RICCATI-Gleichung
right half <i>s</i> -plane (RHP)	rechte <i>s</i> -Halbebene
rise time	Anregelzeit, Anstiegszeit
robust control system	Robuste Regelung
root contour	WOK-Kontur
root locus	Wurzelort
– amplitude (magnitude) condition	–, Amplitudenbedingung
–, angle of arrival	–, Eintrittswinkel
–, angle of departure	–, Austrittswinkel
–, asymptotes	–, Asymptoten
–, breakaway point	–, Verzweigungspunkt
–, break-in point	–, Verzweigungspunkt
–, branches	–, Zweige
–, construction rules	–, Konstruktionsregeln
–, phase condition	–, Phasenbedingung
root locus	Wurzelorts
– plot	– kurve
– method	– kurvenverfahren
ROUTH array	ROUTH-Tafel
ROUTH's stability criterion	ROUTH-Kriterium
row vector	Zeilenvektor
RUNGE-KUTTA method	RUNGE-KUTTA-Verfahren
S -plane	<i>s</i> -Ebene
saddle point	Sattelpunkt
sample	Abtast
– and-hold element	– halteglied
sampled-data control system	– regelung
sampled signal	Abtastsignal
sampler	Abtaster, Abtast-Element

sampling	Abtastung
sampling	Abtast
– control	– regelung
– element	– -Element, Abtaster
– period	– periode, – zeitintervall
– rate	– rate, – frequenz
saturating nonlinearity	Element mit Sättigung
saturation	Sättigung
scalar product	Skalarprodukt
second-order	
– lag element, – system	PT ₂ -Element
sensitivity	Empfindlichkeit
separation principle	Separationsprinzip
series	
– connection	Reihenschaltung
– structure	Kettenstruktur
servo control	Folgeregelung
set value	Sollwert
setpoint	Sollwert
– control	Festwertregelung
settling time	Ausregelzeit, Beruhigungszeit, Einschwingzeit
signum function	Signum-Funktion
similarity transformation	Ähnlichkeitstransformation
single-entry matrix	Ein-Element-Matrix
single-input single-output (SISO) system	Eingrößensystem
single-loop feedback system	einschleifige Regelung
single-valued nonlinearity	Element mit eindeutiger Kennlinienfunktion
sine	
– function	Sinusfunktion
– response	Sinusantwort
spring-mass-dashpot system	Feder-Masse-Dämpfer-System
stability	Stabilität
–, absolute	–, absolute
–, asymptotic	–, asymptotische
– analysis	Stabilitätsuntersuchung
standard control loop	Standardregelkreis
state	Zustands
– control	– regelung
– differential equation	– differenzialgleichung
– equations	– gleichungen
– feedback	– rückführung
– observation	– beobachtung
– observer	– beobachter
– space	– raum
– transition matrix	– übergangsmatrix, -Transitionsmatrix
– variable	– größe, – variable
– vector	– vektor
state, steady	eingeschwungener Zustand
static behaviour	statisches Verhalten
steady-state	Beharrungszustand, eingeschwungener Zustand

– control error	stationäre Regeldifferenz, bleibende Regelabweichung, bleibende Regeldifferenz
– control accuracy	Regelgenauigkeit im Beharrungszustand
– response	Verhalten im Beharrungszustand
– solution	stationäre Lösung
step	
– function	Sprungfunktion
– response	Sprungantwort
stochastic	
– process	stochastischer Prozess, Zufallsprozess
– variable	stochastische Variable
summation point	Summationselement, Summationspunkt
summing point	Additionsstelle
superposition principle	Überlagerungsprinzip
symmetrical optimum	Symmetrisches Optimum
system, dynamical	dynamisches System
system identification	Systemidentifikation
system matrix	Systemmatrix
system with play	Lose, System mit Flankenspiel

TAYLOR series

test input signal	TAYLOR-Reihe
three-position element	Testeingangssignal
three-step action element	Dreipunkt-Element
three-step control	Dreipunkt-Element
three-step controller	Dreipunkt-Regelung
three-term controller	Dreipunkt-Regler
time	PID-Regler
– behavior	Zeit
– constant	– verhalten
– delay	– konstante, Verzögerungszeit
– domain	– verzögerung, Totzeit
– lag	– bereich
– response	– verzögerung
time constant of integrator	– verhalten
time-invariant system	Integrierzeitkonstante
time-varying system	zeitinvariantes System
tracking system	zeitvariantes System
trajectory	Folgeregelung
transducer	Zustandskurve, Trajektorie
transfer	Messwandler
– element	Übertragungs
– function	– element
– function matrix	– funktion
– lag	– matrix
transient	– verzögerung
– behavior	Übergangsverhalten
– error signal	vorübergehende Regeldifferenz
transport-lag element, dead-time element	T_t -Element, Totzeitelement

transpose of a matrix
 trapezoidal approximation of integral
 tuning rules
 TUSTIN's method
 two-position element
 two-position control
 two-position controller
 two-step action element
 two-step control
 two-step controller
 two-term controller
 two-valued nonlinearity

Transponierte einer Matrix
 Trapeznäherung
 Einstellregeln
 TUSTIN-Formel
 Zweipunkt-Element
 Zweipunkt-Regelung
 Zweipunkt-Regler
 Zweipunkt-Element
 Zweipunkt-Regelung
 Zweipunkt-Regler
 PI-Regler
 Element mit zweideutiger Kennlinienfunktion

Uncontrollable system
 undamped natural angular frequency
 underdamped
 underdamped system
 undershoot
 unit circle
 unit-impulse
 – function
 – response
 unit matrix
 unit-ramp
 – function
 – response
 unit-step
 – function
 – response
 unit vector
 unity-feedback control system
 unstable system

nicht steuerbares System
 Kennkreisfrequenz
 periodisch, $0 \leq D < 1$
 PT₂-Element (mit $D < 1$, Schwingfall)
 Unterschwingen
 Einheitskreis
 Einheitsimpuls
 – funktion
 – antwort
 Einheitsmatrix
 Einheitsanstiegs
 – funktion
 – antwort
 Einheitssprung
 – funktion
 – antwort
 Einheitsvektor
 Regelungssystem mit direkter Gegenkopplung
 instabiles System

Variable
 – , random
 – , stochastic
 variation of parameters
 velocity
 – control system
 – (ramp) error
 viscous
 – friction
 – friction coefficient

Variable, Größe
 Zufallsgröße
 stochastische Variable
 Parametervariation
 Geschwindigkeits
 – regelung
 – fehler
 viskose Reibung
 viskoser Dämpfungskoeffizient

Water-level control
 weighting function

Wasserstandsregelung
 Gewichtsfunktion

z-plane

z-Ebene

z-transfer function	z-Übertragungsfunktion
z-transform	z-Transformation
z-transform pair	z-Transformationspaar
zero	Nullstelle
zero-input response	Antwortfunktion der homogenen Zustandsgleichung
zero-order hold element (ZOH)	Halteglied nullter Ordnung
zero-state response	Antwortfunktion der inhomogenen Zustandsgleichung

20.5 Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: deutsch-englisch

Aggregation

Aggregationsoperator
(MAX- oder SUM-Operator)
algebraische Summe, t -Konorm
algebraisches Produkt, t -Norm
Ausgangsgröße, scharfe
Aussage

aggregation
aggregation operator, aggregator

algebraic sum
algebraic product
crisp output
conclusion

Basisvariable

Bedingung
begrenzte Differenz, t -Norm
begrenzte Summe, t -Konorm
Bezeichner, linguistischer
BOOLEsche Algebra
BOOLEsche Logik

base variable
premise
bounded difference
bounded sum
linguistic descriptor, linguistic label
BOOLEAN logic
BOOLEAN logic, crisp logic

Charakteristische Funktion einer Menge

characteristic function

DANN-Teil

DANN-Teil einer Regel
Defuzzifizierung
Defuzzifizierungsverfahren
Dehnung (Modifikator)
drastische Summe, t -Konorm
drastisches Produkt, t -Norm
dreieckförmige Zugehörigkeitsfunktion
Dreiecks-Norm
Durchschnittsoperation bei Mengen
(UND-Operation)

conclusion
consequent, rule-consequent part
defuzzification
defuzzification, defuzzification method
dilatation, dilation
drastic sum
drastic product
triangular membership function
triangular norm, t -norm
intersection operation

Eingangsgröße, scharfe

EINSTEIN-Produkt, t -Norm
EINSTEIN-Summe, t -Konorm
Entscheidung
Entscheidung, unscharfe
Erfüllungsgrad einer Regel
Erzeugung eines scharfen Wertes

crisp input
EINSTEIN product
EINSTEIN sum
decision
fuzzy decision
degree of fulfillment
defuzzification

Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzifizierung

Fuzzifizierung
Fuzzy-Logik
Fuzzy-Mengen, Konvexität von
Fuzzy-NICHT-Operator
Fuzzy-ODER-Operator

partitioning

fuzzification
fuzzy logic
convexity of fuzzy set (membership function)
fuzzy NOT
fuzzy OR

Fuzzy-PID-Regler	fuzzy-PID-controller
Fuzzy-Regelung	fuzzy control
Fuzzy-Regelungssystem	fuzzy control system
Fuzzy-Regler, relationaler	MAMDANI-controller
Fuzzy-UND-Operator	fuzzy AND
γ -Operator (kompensatorischer Operator)	γ -operator
Gewichtete-Mittelwerte-Methode, Defuzzifizierungsverfahren	weighted average defuzzification
H AMACHER-Produkt, t -Norm	HAMACHER intersection operator, – product
HAMACHER-Summe, t -Konorm	HAMACHER union operator, – sum
I mplikation	implication
Implikation nach MAMDANI	MAMDANI implication
Implikationsoperator	implication operator
Inferenz, Kompositionsregel der Information, unscharfe	compositional rule of inference fuzzy information
K ern	core of membership function
kompensatorischer ODER-Operator	compensatory OR
kompensatorischer Operator	compensatory operator
kompensatorischer UND-Operator	compensatory AND
Komplement	complement
Komplement-Operator	fuzzy NOT
Komplementbildung (Modifikator)	complement
Komposition	composition
Kompositionsregel der Inferenz	compositional rule of inference
Konklusion	conclusion
Kontrast-Intensivierung (Modifikator)	intensification, contrast intensification
Konvexität von Fuzzy-Mengen	convexity of fuzzy set (membership function)
Konzentration (Modifikator)	concentration
λ -Operator (kompensatorischer Operator)	λ -operator
linguistische Regel	linguistic rule
linguistische Variable	linguistic variable
linguistischer Bezeichner	linguistic descriptor, linguistic label
linguistischer Modifikator	linguistic modifier, linguistic hedge
linguistischer Wertname	linguistic label, linguistic term, linguistic value
Links-Max-Methode, Defuzzifizierungsverfahren	first of maxima (FOM) defuzzification
Logik	logic
Logik, scharfe	crisp logic
Logik, unscharfe	fuzzy logic
Logiktafel	truth table

M AMDANI-Implikation	MAMDANI implication
MAX-Average-Produkt (arithmetischer Mittelwert)	max-average composition
MAX-MIN-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren	MAMDANI inference, max-min inference
MAX-MIN-Komposition (-Produkt, -Verkettung)	max-min composition
MAX-PROD-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren	max-dot inference, max-prod inference
MAX-PROD-Komposition (-Produkt, -Verkettung)	max-dot composition, max-prod composition
maximale Höhe, Methode der, Defuzzifizierungsverfahren	height defuzzification
Maximum-Mittelwert-Methode, Defuzzifizierungsverfahren	mean of maximum (MOM) defuzzification, middle of maxima defuzzification
Maximum-Operation, <i>t</i> -Konorm	maximum function
Menge	set
Menge, scharfe	crisp set
Menge, unscharfe	fuzzy set
Mengenoperator	set operator
Methode der maximalen Höhe, Defuzzifizierungsverfahren	max-height defuzzification
MIN-MAX-Komposition	min-max composition
Minimum-Operation, <i>t</i> -Norm	minimum function
mittelnder Operator	averaging operator
Mittelwert-Operator	averaging operator
Modifikator	modifier
Modifikator, linguistischer	linguistic hedge
N ahe-Null (ZE)	zero (ZO)
negativ (NE)	negative (N)
negativ-groß (NG),	negative big (NB)
negativ-klein (NK)	negative small (NS)
negativ-mittel (NM)	negative medium (NM)
normalisierte unscharfe Menge	normalized fuzzy set
O DER-Operator, kompensatorischer	compensatory OR
ODER-Verknüpfung	disjunction
ODER-Verknüpfung, unscharfe	fuzzy OR
Operation zwischen scharfen Mengen	binary operation
Operator, kompensatorischer	compensatory operator
Operator, parametrisierter	parametrized operator
Operator, unscharfer	fuzzy operator
P arametrisierter Operator	parametrized operator
positiv (PO)	positive (P)
positiv-groß (PG)	positive big (PB)
positiv-klein (PK)	positive small (PS)
positiv-mittel (PM)	positive medium (PM)
Prämisse	premise

R echts-Max-Methode	last of maxima (LOM)
Regel	rule
Regel, linguistische	linguistic rule
Regel, unscharfe	fuzzy rule
regelbasierte Schlussfolgerung	rule-based inference
Regelbasis	rule-base
Regeln mit ODER-Verknüpfung	disjunctive rules
Regeln mit UND-Verknüpfung	conjunctive rules
Regler	controller
Relation	relation
Relation, scharfe	crisp relation
Relation, unscharfe	fuzzy relation
Relation zwischen scharfen Mengen	binary relation
relationaler Fuzzy-Regler	MAMDANI-controller
S -Norm	s -norm, triangular conorm, t -conorm
Schaltalgebra	crisp logic
scharf	crisp
scharfe Ausgangsgröße	crisp output
scharfe Eingangsgröße	crisp input
scharfe Logik	crisp logic
scharfe Menge	crisp set
scharfe Relation (Beziehung)	crisp relation
scharfer Wert	crisp value
Schließen, unscharfes	fuzzy inference, fuzzy reasoning, approximate reasoning
Schlussfolgerung	conclusion
Schlussfolgerung, regelbasierte	rule-based inference
Schlussfolgerungssystem, unscharfes	fuzzy inference system (FIS)
Schlussfolgerungsverfahren	inference
Schwerpunkt der größten Fläche, Defuzzifizierungsverfahren	center of largest area, defuzzification
Schwerpunktmethode, Defuzzifizierungsverfahren	center of area (COA), defuzzification, center of gravity (COG) defuzzification, centroid defuzzification method
Schwerpunktsummenmethode, Defuzzifizierungsverfahren	center of sums (COS) defuzzification
Singleton	fuzzy singleton, singleton
Stützmenge einer unscharfen Menge	support of membership function
SUGENO, funktionaler Fuzzy-Regler nach	SUGENO controller
SUGENO, Implikation nach	SUGENO implication
SUM-MIN-Inferenz, unscharfes Schlussfolge- rungsverfahren	sum-min inference
SUM-PROD-Inferenz, unscharfes Schlussfolge- rungsverfahren	sum-prod inference
t -Konorm	s -norm, t -conorm, triangular conorm
t -Norm	t -norm, triangular norm
Toleranz einer unscharfen Menge	core of membership function

Träger einer unscharfen Menge
 trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion
 trianguläre Konorm
 trianguläre Norm

support of membership function
 trapezoidal membership function
t-conorm, triangular conorm
t-norm, triangular norm

Über-MAX-Operator
 (alle *t*-Konormen außer MAX)
 UND-Operator, kompensatorischer
 UND-Verknüpfung
 UND-Verknüpfung, unscharfe
 unscharfe Entscheidung
 unscharfe Information
 unscharfe Logik
 unscharfe Menge
 unscharfe Menge mit einem Wertepaar
 unscharfe ODER-Verknüpfung
 unscharfe Regel
 unscharfe Relation (Beziehung)
 unscharfe UND-Verknüpfung
 unscharfe Zahl
 unscharfer Operator
 unscharfes Schließen

 unscharfes Schlussfolgerungssystem
 Unter-MIN-Operator
 (alle *t*-Normen außer MIN)

over max operator

 compensatory AND
 conjunction
 fuzzy AND
 fuzzy decision
 fuzzy information
 fuzzy logic
 fuzzy set
 fuzzy singleton, singleton
 fuzzy OR
 fuzzy rule
 fuzzy relation
 fuzzy AND
 fuzzy number
 fuzzy operator
 approximate reasoning, fuzzy inference,
 fuzzy reasoning
 fuzzy inference system (FIS)
 under min operator

Variable, linguistische
 Vereinigungsoperation bei Mengen
 (ODER-Operation)
 Verkettung von unscharfen Relationen
 Voraussetzung

linguistic variable
 union operation

 composition
 premise

Wahrheitstabelle
 WENN-DANN-Regel
 WENN-DANN-Zusammenhang
 WENN-Teil
 WENN-Teil einer Regel
 Wert, scharfer
 Wertname, linguistischer
 Wissensbasis

truth table
 IF-THEN-rule
 implication
 premise
 antecedent part, rule-antecedent part
 crisp value
 linguistic value, linguistic label
 knowledge base

Zahl, unscharfe
 Zerlegung (von zusammengesetzten Regeln)
 Zugehörigkeit
 Zugehörigkeitsgrad
 Zugehörigkeitsfunktion
 Zugehörigkeitsfunktion, dreieckförmige

fuzzy number
 decomposition (of compound rules)
 membership
 degree of membership
 characteristic function, membership function
 triangular membership function

Zugehörigkeitsfunktion, Höhe einer
Zugehörigkeitsfunktion, trapezförmige
Zusammensetzung (Überlagerung)
von aktivierten Regeln

height of membership function
trapezoidal membership function
aggregation

20.6 Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: englisch-deutsch

aggregation

aggregation operator, aggregator

algebraic product
algebraic sum
antecedent part
approximate reasoning
averaging operator

Aggregation, Zusammensetzung
(Überlagerung) von aktivierten Regeln
Aggregationsoperator
(MAX- oder SUM-Operator)
algebraisches Produkt, t -Norm
algebraische Summe, t -Konorm
WENN-Teil einer Regel
unscharfes Schließen
Mittelwert-Operator,
mittelnder Operator

base variable

binary operation
binary relation
BOOLEAN logic
bounded difference
bounded sum

Basisvariable
Operation zwischen scharfen Mengen
Relation zwischen scharfen Mengen
BOOLEsche Algebra, Logik
begrenzte Differenz, t -Norm
begrenzte Summe, t -Konorm

Center of area (COA) defuzzification

center of gravity (COG)
defuzzification
center of largest area defuzzification
center of sums (COS) defuzzification
centroid defuzzification method

characteristic function

compensatory AND
compensatory operator
compensatory OR
complement

composition

compositional rule of inference
concentration
conclusion

conjunction
conjunctive rules

Schwerpunktmethode,
Defuzzifizierungsverfahren
Schwerpunktmethode,
Defuzzifizierungsverfahren
Schwerpunkt der größten Fläche,
Defuzzifizierungsverfahren
Schwerpunktsummenmethode,
Defuzzifizierungsverfahren
Schwerpunktmethode,
Defuzzifizierungsverfahren
charakteristische Funktion einer Menge,
Zugehörigkeitsfunktion
kompensatorischer UND-Operator
kompensatorischer Operator
kompensatorischer ODER-Operator
Komplement,
Komplementbildung (Modifikator)
Komposition, Verkettung
(von unscharfen Relationen)
Kompositionsregel der Inferenz
Konzentration (Modifikator)
DANN-Teil, Konklusion,
Schlussfolgerung, Aussage
UND-Verknüpfung
mit UND verknüpfte Regeln

consequent	DANN-Teil einer Regel
contrast intensification	Kontrast-Intensivierung (Modifikator)
controller	Regler
convexity of fuzzy set (membership function)	Konvexität von Fuzzy-Mengen
core of membership function	Kern, Toleranz einer unscharfen Menge
crisp	scharf
crisp input	scharfe Eingangsgröße
crisp logic	scharfe Logik, Schaltalgebra, BOOLEsche Logik
crisp output	scharfe Ausgangsgröße
crisp relation	scharfe Relation (Beziehung)
crisp set	scharfe Menge
crisp value	scharfer Wert
d ecision	Entscheidung
decomposition (of compound rules)	Zerlegung (von zusammengesetzten Regeln)
defuzzification	Defuzzifizierung, Erzeugung eines scharfen Wertes
defuzzification method	Defuzzifizierungsverfahren
degree of membership	Zugehörigkeitsgrad
degree of fulfillment	Erfüllungsgrad einer Regel
dilatation, dilation	Dehnung (Modifikator)
disjunction	ODER-Verknüpfung
disjunctive rules	mit ODER verknüpfte Regeln
drastic product	drastisches Produkt, t -Norm
drastic sum	drastische Summe, t -Konorm
E INSTEIN product	EINSTEIN-Produkt, t -Norm
EINSTEIN sum	EINSTEIN-Summe, t -Konorm
f irst of maxima (FOM) defuzzification	Links-Max-Methode, Defuzzifizierungsverfahren
fuzzification	Fuzzifizierung, Umsetzung von scharfen Signalwerten in Zugehörigkeitsgrade von linguistischen Werten
fuzzy AND	Fuzzy-UND-Operator, unscharfe UND-Verknüpfung
fuzzy control	Fuzzy-Regelung
fuzzy control system	Fuzzy-Regelungssystem
fuzzy decision	unscharfe Entscheidung
fuzzy inference	unscharfes Schließen
fuzzy inference system (FIS)	unscharfes Schlussfolgerungssystem
fuzzy information	unscharfe Information
fuzzy logic	Fuzzy-Logik, unscharfe Logik
fuzzy NOT	Fuzzy-NICHT-Operator, Komplement-Operator
fuzzy number	unscharfe Zahl
fuzzy operator	unscharfer Operator

fuzzy OR	Fuzzy-ODER-Operator, unscharfe ODER-Verknüpfung
fuzzy-PID-controller	Fuzzy-PID-Regler
fuzzy reasoning	unscharfes Schließen
fuzzy relation	unscharfe Relation (Beziehung)
fuzzy rule	unscharfe Regel
fuzzy set	unscharfe Menge
fuzzy singleton	Singleton, unscharfe Menge mit einem Wertepaar
γ -operator	γ -Operator (kompensatorischer Operator)
HAMACHER intersection operator	HAMACHER-Produkt, t -Norm
HAMACHER product	HAMACHER-Produkt, t -Norm
HAMACHER sum	HAMACHER-Summe, t -Konorm
HAMACHER union operator	HAMACHER-Summe, t -Konorm
hedge, linguistic	linguistischer Modifikator
height defuzzification	Methode der maximalen Höhe, Defuzzifizierungsverfahren
height of membership function	Höhe einer Zugehörigkeitsfunktion
IF-THEN-rule	WENN-DANN-Regel
implication	Implikation, WENN-DANN-Zusammenhang
implication operator	Implikationsoperator
inference	Schlussfolgerungsverfahren
intensification	Kontrast-Intensivierung (Modifikator)
intersection operation	Durchschnittsoperation bei Mengen (UND-Operation)
knowledge base	Wissensbasis
λ -operator	λ -Operator (kompensatorischer Operator)
last of maxima (LOM) defuzzification	Rechts-Max-Methode, Defuzzifizierungsverfahren
linguistic descriptor	linguistischer Bezeichner
linguistic hedge	linguistischer Modifikator
linguistic label	linguistischer Bezeichner, linguistischer Wertname
linguistic modifier	linguistischer Modifikator
linguistic term	linguistischer Wertname
linguistic rule	linguistische Regel
linguistic value	linguistischer Wertname
linguistic variable	linguistische Variable
logic	Logik

M AMDANI-controller	relationaler Fuzzy-Regler
MAMDANI implication	Implikation nach MAMDANI
MAMDANI inference	MAX-MIN-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
max-average composition	MAX-Average-Produkt (arithmetischer Mittelwert)
max-dot composition	MAX-PROD-Komposition (-Produkt, -Verkettung)
max-dot inference	MAX-PROD-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
max-height defuzzification	Methode der maximalen Höhe, Defuzzifizierungsverfahren
maximum function	Maximum-Operation, t -Konorm
max-min composition	MAX-MIN-Komposition (-Produkt, -Verkettung)
max-min inference	MAX-MIN-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
max-prod composition	MAX-PROD-Komposition (-Produkt, -Verkettung)
max-prod inference	MAX-PROD-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
mean of maximum (MOM) defuzzification	Maximum-Mittelwert-Methode, Defuzzifizierungsverfahren
middle of maxima defuzzification	Maximum-Mittelwert-Methode, Defuzzifizierungsverfahren
minimum function	Minimum-Operation, t -Norm
min-max composition	MIN-MAX-Komposition
membership	Zugehörigkeit
membership degree	Zugehörigkeitsgrad
membership function	Zugehörigkeitsfunktion
modifier	Modifikator
n egative (N)	negativ (NE)
negative big (NB)	negativ-groß (NG),
negative medium (NM)	negativ-mittel (NM)
negative small (NS)	negativ-klein (NK)
normalized fuzzy set	normalisierte unscharfe Menge
O ver max operator	Über-MAX-Operator, (alle t -Konormen außer MAX)
P arametrized operator	parametrisierter Operator
partitioning	Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzifizierung
positive (P)	positiv (PO)
positive big (PB)	positiv-groß (PG)
positive medium (PM)	positiv-mittel (PM)
positive small (PS)	positiv-klein (PK)
premise	WENN-Teil, Prämisse, Voraussetzung, Bedingung

R elation	Relation
rule	Regel
rule-antecedent part	WENN-Teil einer Regel
rule-base	Regelbasis
rule-based inference	regelbasierte Schlussfolgerung
rule-consequent part	DANN-Teil einer Regel
S et	Menge
set operator	Mengenoperator
singleton	Singleton, unscharfe Menge mit einem Wertepaar
s -norm	t -Konorm, s -Norm
SUGENO-controller	funktionaler Fuzzy-Regler nach SUGENO
SUGENO implication	Implikation nach SUGENO
sum-min inference	SUM-MIN-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
sum-prod inference	SUM-PROD-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
support of membership function	Träger, Stützmenge einer unscharfen Menge
t -conorm	trianguläre Konorm, t -Konorm, s -Norm
t -norm	trianguläre Norm, t -Norm, Dreiecksnorm
trapezoidal membership function	trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion
triangular membership function	dreieckförmige Zugehörigkeitsfunktion
triangular conorm	trianguläre Konorm, t -Konorm, s -Norm
triangular norm	trianguläre Norm, t -Norm, Dreiecks-Norm
truth table	Wahrheitstabelle, Logiktablelle
U nder min operator	Unter-MIN-Operator, (alle t -Normen außer MIN)
union operation	Vereinigungsoperation bei Mengen (ODER-Operation)
W eighted average defuzzification	Gewichtete-Mittelwerte-Methode, Defuzzifizierungsverfahren
Z ero (ZO)	nahe-Null (ZE)

Sachwortverzeichnis

A

- Abklingzeitkonstante 128
- abs 1164, 1192
- Abs 1428
- Absenkungsfaktor 309
- absolut stabil 1008
- absolute Stabilität 1008
- Abtast-Halte-Schaltung 548
- Abtastung 548
- Abtastvorgang 547
- Abtastzeit 547, 861
- Abtastzeitintervall 547
- acker 1281, 1286
- acos 1192
- acosc 1192
- acosh 1193
- acot 1192
- acotd 1192
- acoth 1193
- acsc 1192
- acsed 1192
- acsch 1193
- Action Port 1446
- Add 1428, 1440
- Aggregation 1105, 1129
- Ähnlichkeitssatz 69, 606
- Ähnlichkeitstransformationen 1278
- Aktivierungsgrad 1105
- Algebraic Constraint 1429
- algebraische Schleife 1326
- Allpass 356
- Allpass-Element 140
 - , I. Ordnung 141
 - , II. Ordnung 142 f.
- Allpassverhalten 140
- Amplitudenabsenkung 311
- Amplitudenbedingung 256
- Amplitudengang 114, 292
- Amplitudenrand 301
- Amplitudenreserve 301, 1229
- Analog-Digital-Wandler 548
- Analog-Digital-Wandlung 548
- Analyse, experimentelle 358
 - , theoretische 358
- analytische Funktion 909
- Anfangsbedingungen 77
- Anfangswertproblem 1508
- Anfangswertsatz 72, 611
- angle 1164, 1192
- Anhebungsfaktor 304
- Ankerinduktivität 837
- Anregelzeit 315, 374, 583
- ans 1162, 1192
- Anstiegsantwort 63, 1212
- Anstiegsantwortfolge 1248
- Anstiegsfunktion 63
 - , Einheits- 63
- Anstiegswinkel, der Asymptoten 263
- Anstiegszeit 314 f.
- Antriebsmotor 836
- Antriebsregelstrecke 838
- Antriebsverstärkung 837
- aperiodischer Grenzfall 58, 129
- append 1208 f.
- Arbeitspunkt 47
- Argument Inport 1488
- Argument Outport 1488
- ARMA-Modell 437
- ARMA-Prozess 437
- ARMAX-Modell 440
- AR-Modell 436
- AR-Prozess 436
- ARX-Modell 439 f.
- ASCII to String 1496
- asec 1193
- asecd 1193
- asech 1193
- asin 1193
- asind 1193
- asinh 1193
- Assertion 1442
- Assignment 1430
- Assoziativ-Gesetz 1069
- Asymptote, Anstiegswinkel 263
 - , Schnittpunkt 263
- asymptotisch stabil 996 f.
- atan 1193
- atan2 1193
- atand 1193
- atanh 1193
- Atomic Subsystem 1459
- aufgeschnittener Regelkreis 219
- augstate 1286
- Ausgangsfehler 441
- Ausgangsgleichung 730, 732
- Ausgangsmatrix 732
- Ausgangsvariable 736, 1197
- Ausgangsvektor 731, 735, 1197, 1513
- Ausgleich 171
- Ausgleichszeit 381, 384, 581

Ausregelbarkeit 228
 Ausregelzeit 315
 Ausschaltdauer 1019
 Austrittswinkel der WOK aus Polstellen 269
 autoregressives Modell 436
 AVERAGE-Operation 1088
 axes 1193
 axis 1181, 1193, 1218
 azimuth 1186

B

Backlash 1394
 Backward Euler 717, 719, 1402, 1406
 Bahnsteuerung 844, 1319
 BAIRSTOW-Verfahren 1501, 1503
 Bandbreite 314
 Band-Limited White Noise 1482
 bar 1193
 Bedingung, unscharfe 1057
 Bedingungsteil 1090
 Begrenzungselement 922
 Beharrungszustand 996
 Beobachtbarkeit 757
 –, Prüfung 760
 Beobachtbarkeitsbedingung 765
 Beobachtbarkeitsmatrix 757, 765
 Beobachter 786
 Beobachtungsmodell 790
 Beobachtungsnormform 750, 766, 790, 1278
 Beobachtungsprinzip 787
 Beobachtungsvektor 786
 Beschleunigungsantwort 855
 Beschleunigungsfehler 233
 Beschleunigungsfunktion 855
 Beschleunigungsmoment 838
 Beschreibungsfunktion 920
 –, Methode der 917
 BESSEL-Filter 479
 Betrag 108, 291
 Betragsoptimum 504, 515
 Bewegungsachse 838
 Bias 1430
 Bildbereich 64
 Bildvariable, komplexe 64
 bilineares System 910
 Bilineartransformation 689
 Binomial-Filter 479
 Binomialfilter-Übertragungsfunktion 869
 Bit Clear 1420
 Bit Set 1420
 Bitwise Operator 1420
 Block Support Table 1445

bode 1200, 1227, 1237, 1266
 BODE-Diagramm 114, 291
 BODE-Verfahren 291, 313
 BOOLEsche Algebra 1069
 BOX-JENKINS-Modell 440
 break 1175, 1193
 BROMWICH-Integral 65
 Bus Assignment 1469
 Bus Creator 1469
 Bus Element In 1469
 Bus Element Out 1469
 Bus Selector 1470
 Bus to Vector 1465
 BUTTERWORTH-Filter 479

C

C Caller 1488
 C Function 1488
 c2d 1239, 1266
 canon 1286
 case 1176, 1193
 cat 1190
 ceil 1192
 charakteristische Gleichung 53, 80 f., 237, 592, 671
 – des nichtlinearen Regelkreises 975
 – des nichtlinearen Systems 942
 –, Nullstellen 81
 Check Discrete Gradient 1442
 Check Dynamic Gap 1442
 Check Dynamic Lower Bound 1443
 Check Dynamic Range 1442
 Check Dynamic Upper Bound 1443
 Check Input Resolution 1443
 Check Static Gap 1443
 Check Static Lower Bound 1444
 Check Static Range 1443
 Check Static Upper Bound 1444
 CHIEN 495
 Chirp Signal 1482
 cla 1193
 clear 1165, 1190
 clf 1193
 clock 1190
 Clock 1482
 CodeReuse Subsystem 1459
 Combinatorial Logic 1421
 Compare To Constant 1421
 Compare To Zero 1421
 Complex to Magnitude-Angle 1430
 Complex to Real-Imag 1431
 Compose String 1496
 cond 1190

conj 1192
 connect 1208 f.
 Constant 1482
 continue 1193
 contour 1182, 1193
 contour3 1183
 Control System Toolbox 1188
 conv 1170, 1190
 cos 1164, 1192
 cosd 1192
 cosh 1193
 Cosine 1425
 cot 1192
 cotd 1192
 coth 1193
 Coulomb & Viscous Friction 1394
 Counter Free-Running 1482
 Counter Limited 1483
 cross 1190
 csc 1192
 csd 1192
 csch 1193
 ctranpose 1190
 ctrb 1286
 cumprod 1190
 cumsum 1190

D

d2c 1239, 1266
 damp 1218, 1237, 1253, 1266, 1286
 Dämpfung 58, 128, 314, 1253
 Dämpfungskraft 838
 Dämpfungssatz 606
 DANN-Teil 1090, 1128
 Darstellung, normierte 45
 Data Store Memory 1470
 Data Store Read 1470
 Data Store Write 1470
 Data Type Conversion 1465
 Data Type Conversion Inherited 1465
 Data Type Duplicate 1465
 Data Type Propagation 1465
 Data Type Scaling Strip 1466
 Datenbasis 1129
 dB 114
 dcgain 1215
 DDC-Regelung 549
 Dead Zone 1395
 Dead Zone Dynamic 1395
 Dead-Beat-Regelung 555
 Dead-Beat-Regler 698, 701, 711
 deconv 1190

Defuzzifizierung 1095, 1108, 1111
 Defuzzifizierungsverfahren 1111
 Dehnung 1059
 Dekade 124, 149
 –, Kreisfrequenz- 149
 Delay 1399
 δ -Abtaster 597
 δ -Folge 674, 686
 Delta-Folge 642
 DE MORGANSche Gesetze 1070
 Demux 1471
 Derivative 1377
 Descriptor State-Space 1377
 det 1190
 Detect Change 1421
 Detect Decrease 1421
 Detect Fall Negative 1422
 Detect Fall Nonpositive 1422
 Detect Increase 1422
 Detect Rise Nonnegative 1422
 Detect Rise Positive 1422
 Determinantenkriterium, nach COHN, SCHUR, JURY 695
 Dezibel 114
 diag 1168, 1190
 Difference 1400
 Differenz, begrenzte 1072
 Differenzbildung 556
 Differenzgleichung 589
 Differenzialalgorithmus 556
 Differenzial-Element 154, 363
 – mit Verzögerung 156, 432
 Differenzialgleichung 52, 212
 –, erster Ordnung 1508
 –, Linearisierung 52
 –, Lösung der homogenen 53
 Differenziationssatz 70, 606
 Differenziervverstärkung 154, 207
 Differenzierzeitkonstante 46
 Differenzverstärker 323
 Differenzverstärkung 323
 Digital Clock 1483
 digitale Regelung 549
 dirac 1233
 DIRAC-Folge 674, 1258, 1400
 DIRAC-Impuls 61, 603, 1233
 Direct Lookup Table (n-D) 1425
 Discrete Derivative 1400
 Discrete Filter 1400
 Discrete FIR Filter 1401
 Discrete PID Controller 1402
 Discrete PID Controller (2DOF) 1406

- Discrete State-Space 1412
 - Discrete Transfer Fcn 1412
 - Discrete Zero-Pole 1412
 - Discrete-Time Integrator 1412
 - diskrete Zeitvariable 548
 - diskretes Modell 438
 - Diskretisierung 717 f.
 - Diskretisierungsverfahren 715
 - Diskretisierungszeit 593
 - disp 1190
 - Display 1480
 - Divide 1431, 1436
 - Divisionsstelle 32
 - Do While Iterator 1446, 1463
 - Do While Iterator Subsystem 1463
 - Do While Subsystem 1446
 - DocBlock 1445
 - dominierende Zeitkonstante 584
 - dominierendes Polpaar 320
 - dot 1190
 - Dot Product 1431
 - D-Regler 1151
 - Drehwinkel 838
 - Drehwinkelgeschwindigkeitsregelkreis 849
 - Drehzahlregelung 848
 - Dreiecksfunktion 1054, 1097
 - Dreipunkt-Element 945, 953
 - mit Hysterese 954
 - Dreipunkt-Regler 906
 - mit verzögerter Rückführung 1044
 - dss 1203
 - dssdata 1203
 - DT₁-Element 156, 432
 - Durchgangsfaktor 1197, 1513
 - Durchgangsmatrix 732
 - Durchschnitt 1065, 1072
 - Durchtrittsfrequenz 155, 158, 170, 295, 300, 302, 315, 1229
 - Durchtrittsphasenwinkel 300
 - dynamischer Operator 900
 - dynamisches Element 898
 - dynamisches Verhalten 77
- E**
- echo 1177, 1190
 - Eckkreisfrequenz 124, 295
 - eig 1190, 1274, 1286
 - Eigenkreisfrequenz 127 ff.
 - Ein-Element-Matrix 822
 - Eingangsfehler 442
 - Eingangsmatrix 732
 - Eingangsvariable 736, 1197
 - Eingangsvektor 731, 735, 1197, 1513
 - Einheitsanstiegsfolge 675
 - Einheitsanstiegsfunktion 63, 207
 - Einheitsimpulsfolge 674, 1258
 - Einheitsimpulsfunktion 61
 - Einheitssprungfolge 675
 - Einheitssprungfunktion 62, 207, 363
 - Einschaldauer 1019
 - Einschrittverfahren 1508
 - Einstellregeln 493, 581
 - nach CHIEN, HRONES, RESWICK 495
 - nach TAKAHASHI 587
 - von ZIEGLER und NICHOLS 494
 - Einstellzeit 581
 - , endliche 698, 701
 - Eintrittswinkel der WOK in Nullstellen 269
 - Element, Differenzial- 363
 - , dynamisches 898
 - , Integral- 363
 - mit Begrenzung 963
 - mit degressiver Kennlinie 962
 - mit Hysterese und Umkehrspanne (Lose) 970
 - mit Lose 930
 - mit Offset 913, 944
 - mit progressiver Kennlinie 959
 - mit Totzone 964
 - mit Vorspannung 967
 - , neutrales 1069
 - , Null- 1069
 - , Proportional- 363
 - , statisches 897
 - elevation 1186
 - else 1175, 1193
 - elseif 1174, 1193
 - Enable 1446
 - Enabled and Triggered Subsystem 1447
 - Enabled Delay 1413
 - Enabled Subsystem 1448
 - end 1175, 1190
 - Endwertsatz 72, 611
 - Energiespeicher 77
 - Enumerated Constant 1483
 - Environment Controller 1471
 - eps 1192
 - Erfüllungsgrad 1104
 - Ersatztotzeit 381
 - Ersatzzeitkonstante 182, 509, 841
 - Ersetzungsregel 1090
 - etime 1190
 - Event Listener 1489
 - exit 1165, 1190
 - exp 1164, 1192

experimentelle Identifikation 434
 expm 1190, 1270, 1286
 Extract Bits 1423
 eye 1168, 1190

F

Faltungintegral 72
 Faltungssatz 72, 610
 Fcn 1490
 feedback 1205 f., 1209, 1286
 Fehler, verallgemeinerter 442
 figure 1193
 Find Nonzero Elements 1431
 FIR-Filter 1401
 First Order Hold 1380
 fix 1192
 Flächenschwerpunktformel 1113
 Floating Display 1480
 Floating Scope 1481
 floor 1192
 Folgerung, unscharfe 1057
 for 1173, 1193
 For Each 1448
 For Each Subsystem 1448
 For Iterator 1449
 For Iterator Subsystem 1449
 format long 1164, 1195
 format short 1164, 1195
 for-Schleife 1173
 Forward Euler 717, 719, 1402, 1406
 fplot 1193
 fprintf 1190
 frd 1196, 1203
 frdata 1203
 Freiheitsgrad 201
 Frequenzbereich 64
 Frequenzgang 108
 –, Betrag 108
 –, Phase 108
 Frequenzgangfunktion 81
 Frequenzgangmodell der Übertragungsfunktion 1196
 Frequenzkennlinien-Diagramm 114, 291
 FROBENIUSform 747
 From 1471
 From File 1483
 From Spreadsheet 1484
 From Workspace 1485
 Führungsfrequenzgangfunktion 221, 230
 Führungsgröße 25, 219
 Führungsgrößenvorsteuerung 1318
 Führungsübertragungsfunktion 220, 230
 Führungsübertragungsverhalten 39, 221, 680

Führungsverhalten 219
 function 1451
 Function Caller 1490
 Function-Call Feedback Latch 1450
 Function-Call Generator 1451
 Function-Call Split 1451
 Function-Call Subsystem 1451
 Function-File 1171 f.
 Fünfpunkt-Element 956
 Funktion, analytische 909
 –, charakteristische 1048
 –, harmonische 63
 –, mehrdeutige 910
 –, positiv definite 1005
 –, stückweise lineare 910
 Funktionalmatrix 1001
 Fuzzifizierung 1096, 1129
 –, Datenbasis 1097
 –, lineare 1134
 –, nichtlineare 1099, 1137
 Fuzzifizierungskomponente 1095
 Fuzzy-D-Übertragungselement 1151
 Fuzzy-I-Regler 1154
 Fuzzy-Logik 1047
 Fuzzy-Menge 1047
 –, normale 1053
 Fuzzy-NICHT-Operator 1066
 Fuzzy-ODER-Operator 1066, 1068, 1072
 Fuzzy-PD-Regler 1096, 1102, 1146
 Fuzzy-PID-Regler 1132, 1141, 1155
 Fuzzy-PI-Geschwindigkeitsregler 1155
 Fuzzy-PI-Stellungsregler 1151
 Fuzzy-P-Regler 1129, 1137, 1143
 Fuzzy-Regelung 1094
 Fuzzy-Regler 1095, 1131
 –, funktionaler 1095, 1129
 – nach MAMDANI 1127
 – nach SUGENO 1127
 –, relationaler 1095
 Fuzzy-Relationenprodukt 1086
 Fuzzy-UND-Operator 1065, 1068, 1072
 Fuzzy-Zahl 1053
 Fuzzy-Zustandsregelung 1158

G

Gain 1432
 Gamma-Operator 1077
 –, kompensatorischer 1077
 Gegenkopplung, indirekte 230
 Gesamtrträgheitsmoment 838
 Geschwindigkeitsalgorithmus 561
 Geschwindigkeitsfehler 233

Geschwindigkeitsregelung 848
 get 1203
 Getriebelose 911
 Getriebeispiel 911
 Gewichtsfolge 610, 715
 Gewichtsfunktion 61
 ginput 1193
 Glättung 347
 Glättungselement 347
 –, passives 348
 Glättungszeitkonstante 348
 Gleichgewichtslage 992
 Gleichgewichtszustand 996
 Gleichrichter-Element 927
 Gleichstrommotor 1336
 Gleichtaktverstärkung 323
 Gleichung, charakteristische 80, 639
 –, charakteristische, Nullstellen 81
 Gleichung der Harmonischen Balance 975
 global asymptotisch stabil 997
 Goto 1471
 Goto Tag Visibility 1472
 grafisches User Interface 1287
 GRAHAM 461
 Grenzfall, instabiler aperiodischer 129
 Grenzwertschwingung 986
 –, Stabilität 986
 grenzstabil 997
 Grenzwertsatz 72
 Grenzwertsätze 362
 Grenzyklus 908, 992
 grid 1177f., 1193
 Ground 1485
 Grundlast 1016
 gtext 1180, 1193

H

Halteelement 602
 Haltefunktion 602
 Halteglied 549, 597, 600
 Halteoperation 548
 Harmonische Balance 917
 –, Gleichung der 942, 975
 harmonische Funktion 63
 harmonische Linearisierung 917
 Hauptlast 1016
 heaviside 1234
 help 1162
 hist 1193
 Hit Crossing 1395
 Hochpass 356
 Höhe 1053

hold 1193
 hold off 1179
 hold on 1179
 HRONES 495
 HURWITZ-Kriterium 243, 689
 HURWITZ-Sektor 1009

I

IAE-Kriterium 461
 IC 1466
 Idempotenz 1069
 Identifikation 357
 IE-Kriterium 459
 I-Element 168, 400, 424
 if 1174, 1193
 If 1452
 If Action Subsystem 1453
 ilaplace 1233
 imag 1164, 1192
 Imaginärteil 108
 Implikation 1090
 –, unscharfe 1083
 Implikationskonklusion 1091
 Implikationsoperator 1091
 Implikationsprämisse 1091
 Impulsantwort 61, 1210
 impulse 1200, 1210, 1215, 1246, 1266, 1286
 Impulsfolgefunktion 598, 601
 Impulsfunktion 61
 Impulsübertragung 643
 In Bus Element 1454, 1485
 In1 1455, 1485
 Index Vector 1472
 indirekte Gegenkopplung 230
 inf 1192
 Inferenz 1090, 1129
 –, Kompositionsregel 1091, 1106
 –, regelbasierte 1095, 1102
 Inferenzeinheit 1102
 initial 1272, 1286
 Initialize Function 1490
 Inport 1455, 1485
 input 1175, 1190
 instabil 997
 Integralalgorithmus 550
 – mit Rechtecknäherung 550
 – mit Trapeznäherung 555
 Integral-Element 168, 363, 400, 424
 Integral-Element mit Totzeit 428
 Integral-Element mit Verzögerung I. Ordnung 426
 Integralkriterium 459
 – der Betragsregelgröße 461

- der Zeitgewichteten Betragsregelfläche 461
- der Zeitlinear gewichteten Quadratischen Regelfläche 486
- der Zeitquadratgewichteten Betragsregelfläche 462
- der Zeitquadratgewichteten Quadratischen Regelfläche 486
- , Lineare Regelfläche 459
- Integral-Regler 176
- Integrationssatz 70, 607
- Integrator 1381
- Integrator Limited 1381
- Integrierbeiwert 168, 177
- Integrierverstärkung 206
- Integrierzeit 169
- Integrierzeitkonstante 46, 169, 177, 338
- Interpolating Using Prelookup 1425
- Interpreted MATLAB Function 1491
- Interval Test 1423
- Interval Test Dynamic 1423
- inv 1169, 1191
- Invarianz 532
- inverse Kennlinie 912
- , Linearisierung 912
- Inversenbildung 1085
- Inversionsstelle 32
- invertierende Grundschaltung 350
- invertierende Schaltung 329
- invertierender PI-Regler 339
- I-Regelstrecke 171
- I-Regler 176, 352 f.
- ISA-Standardform 202
- ISE-Kriterium 486
- ISTAE-Kriterium 462
- ISTSE-Kriterium 486
- ITAE-Kriterium 461
- IT₁-Element 403, 426
- IT₁-Regelstrecke 173
- ITSE-Kriterium 486
- IT_i-Element 428
- IT_i-Regelstrecke 175, 406
- iztrans 1258

J

JACOBI-Matrix 1001

K

Kaskadenregelung 859
 Kaskadenstruktur 847
 Kennkreisfrequenz 58, 127, 314, 1253
 Kennlinie, degressive 925
 –, inverse 912
 –, progressive 924

Kern 1053
 Kettenstruktur 34, 1267
 keyboard 1177, 1190, 1220
 Koeffizientenkriterium 692
 Kommutativ-Gesetz 1069
 Kompensation 509, 697
 Kompensation einer Nichtlinearität 913
 Kompensationsregler 697
 Komplement 1065 f.
 Komplementbildung 1060, 1085
 komplexe Bildvariable 64
 Komposition 1086
 Konklusion 1057, 1090, 1128
 Kontrast-Intensivierung 1059
 konvex 1052
 Konzentration 1059
 Kraftregelung 1365
 Kreisfrequenz-Dekade 149
 Kreisstruktur 36, 1267
 Kreisverstärkung 302
 Kriechfall 58, 129
 Kriterium von POPOW 1008
 kritischer Punkt 246

L

Lag-Element 168, 309
 Lageregelung 835, 843, 859, 867
 –, digitale 860
 –, einschleifige 843, 845
 –, Kaskadenstruktur 847
 Lambda-Operator 1076
 –, kompensatorischer 1076
 laplace 1233
 LAPLACE-Rücktransformation 66
 LAPLACE-Transformation 63
 –, diskrete 596
 –, Rechenregeln 84
 LAPLACE-Transformierte 65
 LAPLACE-Variable 64
 Lastkraft 838
 Lastmoment 838
 Laststörgröße 38, 219
 Laststörungsfrequenzgangfunktion 221, 230
 Laststörungsübertragungsfunktion 220, 230
 LATHROP 461
 Laufzeit 138, 380
 Lead-Element 168, 304
 legend 1193
 Leistungssteuerung 564
 Leistungsverstärker 564
 length 1191
 Level-2 MATLAB S-Function 1491

Linear System Analyzer 1287
 Lineare Regelfläche 459
 lineare Zustandsdifferenzialgleichung 731
 Linearisierung 46, 48
 –, harmonische 917
 – im Arbeitspunkt 916
 – mit Rückführung 914
 Linearisierung mit inversen Kennlinien 912
 Linearisierungsverfahren 912
 Linearität 46, 67, 605
 Linearitätsprinzip 898
 linguistisch 1057
 –, Operator 1059
 –, Variable 1057
 –, Wert 1057
 –, Wertname 1058
 Linke-Hand-Regel 246
 Links-Max-Methode 1111
 Linksverschiebung 609
 linmod 1314, 1363
 linspace 1167, 1182, 1191
 LJPUNOW, direkte Methode von 1004
 –, zweite Methode von 1004
 LJPUNOW-Funktion 1006
 LJPUNOW-stabil 997
 load 1165, 1190
 log 1175, 1192
 log10 1164, 1192
 log2 1192
 logarithmisches Verstärkungsmaß 292
 Logical Operator 1423
 Logik, BOOLEsche 1090
 –, scharfe 1047, 1090
 –, unscharfe 1047
 Logikfunktion 1048
 loglog 1180, 1193
 logspace 1167, 1191
 lokal asymptotisch stabil 997
 Lookup Table (1-D) 1425
 Lookup Table (2-D) 1425
 Lookup Table Dynamic 1426
 Lookup Table (n-D) 1426
 Lose 930
 Lösung, partikuläre 54
 Lösung der homogenen Differenzialgleichung 53
 lqr 1286
 lsim 1212, 1215, 1249, 1266, 1286
 LTI-Modell 1203
 LTI-Objekt 1195

M

Magnitude-Angle to Complex 1433
 MAMDANI-Implikation 1091
 MA-Modell 434
 Manual Switch 1473
 Manual Variant Sink 1473
 Manual Variant Source 1473
 MA-Prozess 434
 margin 1229, 1237
 Massenkraft 838
 Math Function 1433
 MATLAB 1161
 MATLAB Function 1491
 MATLAB System 1492
 matlab.mat 1165
 Matrix Concatenate 1433, 1474
 Matrix-e-Funktion 737
 max 1191 f., 1251, 1434 f.
 MAX-AVERAGE-Produkt 1088
 Maximalwert der Regelgröße 1019
 Maximum 1072
 Maximum-Mittelwert-Methode 1111
 Maximum-Mittelwert-Operator 1078
 MAX-MIN-Inferenz 1106, 1112, 1116
 MAX-MIN-Komposition 1086, 1091
 MAX-MIN-Produkt 1086
 MAX-MIN-Verfahren 1108
 MAX-Operation 1069, 1087 f.
 MAX-Operator 1066, 1102, 1106
 MAX-PROD-Inferenz 1106, 1112, 1116
 MAX-PROD-Komposition 1087
 MAX-PROD-Produkt 1088
 MAX-PROD-Verfahren 1109
 mean 1191 f.
 median 1191
 mehrdeutige Funktion 910
 Mehrpunkt-Element 945, 957
 Memory 1414
 Menge, scharfe 1047
 –, unscharfe 1047
 Merge 1474
 mesh 1182, 1194
 meshc 1194
 meshgrid 1183, 1194
 meshz 1194
 Messmatrix 444
 Messort 25
 Methode der Beschreibungsfunktion 917
 Methode der kleinsten Quadrate von GAUSS 449
 Methode der maximalen Höhe 1111
 Methode der Phasenebene 990

Methode von LJAPUNOW, direkte 1004
 –, zweite 1004
 Methode von SCHWARZE 395
 m-File 1171
 min 1191 f., 1434 f.
 minimalphasig 148
 Minimalwert der Regelgröße 1019
 Minimum-Mittelwert-Operator 1078
 MinMax 1434
 MinMax Running Resetable 1435
 MIN-MAX-Komposition 1089
 MIN-Methode 1105, 1108
 MIN-Operation 1069, 1087
 MIN-Operator 1065, 1102
 minreal 1275, 1286
 mittlere Regelabweichung 1019
 mod 1192
 mode 1191
 Model 1455
 Model Info 1445
 Model Variants 1455
 Modell, analytisches 357
 –, diskretes 438
 –, experimentelles 357
 –, mathematisches 357
 –, nichtparametrisches 362
 –, parametrisches 357, 362
 Modellbildung 362
 Modellgewinnung 357
 Modellparameter 438
 Modellstruktur 358, 438
 Modifikator 1059
 Momentengleichung 838
 Momentenkonstante 837
 Momentenregelkreis 847
 Momentenregelung 847
 Momentenregler 847
 Monotonie 1069
 MOORE-PENROSE-Inverse 452
 Motormoment 838
 Motorspannung 837
 Multiplikationsstelle 32
 Multiport Switch 1474
 Mux 1475

N

Nachstellzeit 179, 183, 339
 NaN 1192
 NEWTON-Verfahren 397, 1501 f.
 NICHOLS 494, 587
 nichtinvertierende Grundschialtung 350
 nichtinvertierende Schaltung 329

nichtlineares System 897
 Nichtlinearität, Kompensation 913
 nichtminimalphasig 148
 Nichtphasenminimumsystem 148
 norm 1191
 Norm, Dreiecks- 1068
 –, triangulare 1068
 Normalform 745
 Normalisierung 1053
 Normieren 45
 normierte Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße 583
 normierte Darstellung 45
 Normierung 45, 169
 Null-Element 1069
 Nullmatrix 740, 1527
 Nullphasenwinkel 59
 Nullstellen, Übertragungsfunktion 81
 Nullstellenberechnung 1504
 Nullvektor 1528
 numden 1263
 nyquist 1200, 1224, 1237, 1266
 NYQUIST-Kriterium 113, 245
 –, vereinfachtes 246
 NYQUIST-Verfahren 299

O

obsv 1286
 ODER-Verknüpfung, unscharfe 1066
 ones 1183, 1191
 Operationsverstärker 323
 Operator, dynamischer 900
 –, kompensatorischer 1076
 –, mittelnder 1076
 –, statischer 900
 Optimierung 457
 – im Zeitbereich 457
 – nach CHIEN, HRONES und RESWICK 495
 – nach ZIEGLER und NICHOLS 494, 587
 Optimierungskriterium 457
 Optimierungsverfahren 457
 Originalbereich 64
 Ortskurve 113
 otherwise 1176, 1193
 Out Bus Element 1457, 1480
 Out1 1458, 1480
 Output 1458, 1480
 OUTPUT-ERROR-Modell 440

P

Parallelstruktur 34, 1267
 Parameter Writer 1475

- Parameterermittlung 358
- Parameteridentifikation 434
- Parameteroptimierung 457
- Parameterschätzung 434
- Parametervektor 451
- Partialbruchzerlegung 78
- Partial-Differenziationssatz 607
- Partial-Integrationssatz 608
- pause 1177, 1190
- PD/PDT₁-Regler 334, 352
- PD-Regler 166
- PDT₁-Element 165
- PDT₁-Regler 166
- P-Element 408
- Periodendauer 128 f., 372, 584
- Permute Dimensions 1435
- Phase 108, 291
- Phasenanhhebung 304
- Phasenbedingung 256
- Phasenebene 990
- , Methode der 990
- Phasengang 114, 292
- Phasenminimumsystem 148
- Phasenportrait 990
- Phasenrand 301
- Phasenreserve 301, 315, 1229
- Phasenschnittkreisfrequenz 1229
- pi 1192
- PID Controller 1382
- PID Controller (2DOF) 1384
- PID-Geschwindigkeitsalgorithmus 561, 1141
- PID/PIDT₁-Regler 354
- , additive Form 341
- , multiplikative Form 342
- PID-Regelalgorithmus 560
- , modifiziert 580
- PID-Regler 182, 1141
- , additive Form 195
- , multiplikative Form 195
- , zwei Freiheitsgrade 202
- PID-Reglerstrukturen 195
- PID-Standardregler 1382, 1402
- PID-Stellungsalgorithmus 560, 1141, 1155
- PID-Stellungsregler 1141
- PIDT₁-Regler, additive Form 196
- , multiplikative Form 196
- pie 1194
- PI-Element 430
- PI-Geschwindigkeitsalgorithmus 1154
- pinv 456, 1191
- PI-Regler 178
- PI-Stellungsalgorithmus 861, 1151
- PI-Zustandsregelung 806
- PI-Zustandsregler 796
- place 1284, 1286
- plot 1177, 1194
- plot3 1182, 1194
- plotyy 1194
- polar 1181, 1194
- pole 1219, 1238, 1266, 1286
- Pol-Nullstellenform der Übertragungsfunktion 1196
- Pol-Nullstellenmodell 1197
- Pol-Nullstellenplan 80 f.
- Polstellen, Übertragungsfunktion 81
- Polvorgabe 789, 869, 880
- poly 1170, 1191
- polyder 1191
- polyfit 1191
- Polynomform der Übertragungsfunktion 1196
- Polynomial 1436
- polyval 1170, 1191
- POPOW, Kriterium von 1008
- POPOW-Gerade 1012
- POPOW-Ortskurve 1012
- Positionsregelung 835
- positiv definite Funktion 1005
- Potenz-Element 925
- Potenzreihenentwicklung 641
- PPT₁-Element 161, 163
- Prämisse 1057, 1090, 1128
- Prämissenauswertung 1104, 1129
- P-Regelstrecke 121
- P-Regler 120
- mit Spannungsvergleichsstelle 351
- mit Stromvergleichsstelle 351
- Prelookup 1426
- pretty 1259
- Prinzip der gleitenden Mittelwerte 435
- Probe 1466
- prod 1191
- PROD-Methode 1105, 1109
- PROD-Operation 1088
- Product 1436
- Product of Elements 1436
- Produkt, algebraisches 1072, 1075
- , drastisches 1072, 1075
- , EINSTEIN- 1072
- , HAMACHER- 1072, 1075
- , HAMACHER-, parametrisiertes 1075
- , kartesisches 1080
- Proportionalalgorithmus 550
- Proportionalbeiwert 47, 58, 123
- Proportional-Differenzial-Element, mit Verzögerung 165, 412, 414

Proportional-Differenzial-Regler 166
 Proportional-Element 117, 363, 408
 – mit Verzögerung 410
 – mit Verzögerung II. Ordnung 127, 418, 420
 Proportional-Element mit Verzögerung n -ter Ordnung 422
 Proportional-Integral-Differenzial-Regler 182
 Proportional-Integral-Element 430
 Proportional-Integral-Regler 178
 Proportional-Regelstrecke 121
 Proportional-Regler 120
 Proportionalverstärkung 123, 207, 314, 333
 Pseudoinverse 452
 PT_1 -Element 410
 PT_2 -Element 127, 418, 420
 PT_n -Element 422
 PT_1 -Element 416
 Pulsbreitenmodulation 564
 Pulse Generator 1485
 Pulsweite 564
 Pulsweitenmodulation 561, 564
 PWM 1396
 PWM 566
 pzmap 1216, 1238, 1254

Q

Quadrir-Element 927
 Quantisierung 549
 Quantizer 1397
 quasianaloge Regelung 547
 quasistetiger Regler 1041
 quit 1165, 1190

R

Ramp 1485
 Rampenfunktion 1054
 rand 1191
 randn 1191
 Random Number 1485
 rank 1191, 1286
 Rate Limiter 1397
 Rate Limiter Dynamic 1397
 Rate Transition 1466
 RC-Netzwerk zur Amplitudenabsenkung 309
 RC-Netzwerk zur Phasenhebung 304
 real 1164, 1192
 Real-Imag to Complex 1436
 realmax 1192
 realmin 1192
 Realteil 108
 Rechenregeln, LAPLACE-Transformation 84
 –, z -Transformation 612

Rechteckfunktion 1054
 Rechtecknäherung 550
 Rechts-Max-Methode 1111
 Rechtsverschiebung 608
 Reciprocal Sqrt 1437, 1439
 Regel, unscharfe 1083
 Regelabweichung, mittlere 1019
 Regelaktivierung 1105, 1129
 Regelalgorithmus 548
 Regelbasis 1100, 1129
 Regeldifferenz 25, 219
 –, bleibende 72, 302, 314
 Regeleinrichtung 25, 323
 Regelfaktor 38
 Regelfehler, Beschleunigungsfehler 233
 –, Geschwindigkeitsfehler 233
 – I. Ordnung 232
 – II. Ordnung 233
 – III. Ordnung 233
 – IV. Ordnung 233
 –, Ruckfehler 233
 Regelfläche 458
 –, Lineare 459
 –, Quadratische 486
 Regelgröße 24, 219
 –, Maximalwert der 1019
 –, Minimalwert der 1019
 Regelkreis 23
 –, aufgeschnittener 219
 –, quasikontinuierlicher digitaler 581
 Regelkreisgleichung 37, 220
 Regelkreisstruktur, Gegenkopplung, indirekte 37
 Regelstrecke 24
 Regeltabelle 1100
 Regelung 23
 –, digitale 549
 –, quasianaloge 547
 Regelungsnormalform 746, 1277, 1513
 Regler, auf endliche Einstellzeit 711
 –, Integral- 176
 –, Proportional-Integral- 178
 –, Proportional-Integral-Differenzial- 182
 –, quasistetiger 1041
 –, schaltender 1014
 Reglerfrequenzgangfunktion 219
 Reglerübertragungsfunktion 219
 Reglerverstärkung 120
 Reibungsmoment 838
 Relation, scharfe 1079 f.
 –, unscharfe 1079, 1081 f.
 Relational Operator 1424
 Relationsmatrix 1080

Relay 1398
 rem 1192
 Repeating Sequence 1485
 Repeating Sequence Interpolated 1486
 Repeating Sequence Stair 1486
 Reset 1458
 Reset Function 1492
 Resettable Delay 1399, 1415
 Resettable Subsystem 1458
 Reshape 1437
 residue 1191, 1219, 1238
 Residuensatz 66
 Residuum 66
 Resonanzkreisfrequenz 134, 314
 Resonanzwert 134
 RESWICK 495
 return 1193
 rlocfind 1221 f., 1238, 1256
 rlocus 1200, 1221, 1238, 1256
 roots 1170, 1191, 1219
 rotate3d 1188, 1194
 round 1192
 Rounding Function 1437
 ROUTH-Kriterium 240, 689
 ROUTH-Schema 240
 ROUTH-Verfahren 240
 Ruckfehler 233
 Rücktransformation, LAPLACE- 66
 Rückwärtsdifferenz 609, 725
 Rückwärtsdifferenzen, Methode der 719
 Ruhelage 236, 992, 996
 RUNGE-KUTTA-Verfahren 1501, 1509

S

Sättigungselement 903
 Sättigungskennlinie 904
 Sättigungsverhalten 904
 Saturation 1398
 Saturation Dynamic 1398
 Saturn-V-Rakete 1372
 save 1165, 1190
 Scan String 1496
 schaltender Regler 1014
 Schaltfunktion 62
 Schleppfehler 854
 Schließen, approximatives 1090
 –, unscharfes 1090
 Schlussfolgerung, unscharfe 1090
 Schlussfolgerungsteil 1090
 Schnittpunkt, der Asymptoten 263
 Schnittwinkel, der WOK-Zweige in Verzweigungs-
 punkten 266

Schwerpunktmethod 1108, 1113
 –, vereinfachte 1113
 Schwerpunktsummenmethode 1113
 Schwerpunktsummen-Verfahren 1116
 –, Dreiecksfunktionen 1120
 –, Trapezfunktionen 1120
 Schwerpunktverfahren 1113, 1124
 –, für erweiterte Zugehörigkeitsfunktionen 1126
 –, vereinfachtes 1116
 Schwingfall 58
 –, grenzstabiler 129
 –, instabiler 129
 –, stabiler 129
 Scope 1481
 Script-File 1171 f.
 sec 1193
 secd 1193
 sech 1193
 Second-Order Integrator 1389
 Second-Order Integrator Limited 1389
 Selector 1476
 semilogx 1180, 1194, 1238
 semilogy 1180, 1194
 Separationstheorem 791
 set 1198, 1203
 S-Function 1493
 S-Function Builder 1493
 sgrid 1194, 1216, 1238
 Shift Arithmetic 1424
 sign 1175, 1192
 Sign 1437
 Signal, fuzzifiziertes 1098
 –, nichtperiodisches 362
 –, periodisches 362
 Signal Builder 1486
 Signal Conversion 1467
 Signal Generator 1486
 Signal Specification 1467
 Signalfussplan 29
 Signed Sqrt 1438 f.
 simple 1236
 simget 1339
 Simulink Function 1494
 sin 1164, 1193
 sind 1193
 Sine 1427
 Sine Wave 1486
 Sine Wave Function 1438
 Singleton 1050, 1093, 1124
 sinh 1193
 Sinusantwort 63
 Sinusfunktion 63

- size 1191
- Slider Gain 1438
- SMITH-Prädiktor 542
- SMITH-Regler 542
- s-Norm 1068
- sort 1191
- Spannungsfolger 350
- Spannungsvergleichsstelle 331
- SPC-Regelung 549
- Speicherung 548
- Spiel 930
- Sprungantwort 62, 116, 363, 1211
 - , normierte 62
 - , Steigung 365
- Sprungantwortfolge 1246
- Sprungantwortfunktion, Anfangswert 365
- Sprungfunktion 62
- sqrt 1164, 1192
- Sqrt 1439
- Squeeze 1439
- ss 1196, 1199, 1203, 1272
 - ss2ss 1278, 1286
 - ssdata 1203, 1272
- Störgrößenaufschaltung 530
- stabiler Schwingfall 129
- Stabilität 235, 237, 686, 996
 - , absolute 1008
 - einer Differenzengleichung 595
 - von Abtastsystemen 595
 - von Grenzschwingungen 986
- Stabilitätsbereich 686
- Stabilitätsgrenze 242, 299, 588, 686
- Stabilitätsgüte 302
- Stabilitätskriterium 239, 688
 - von JURY 695
- Stabilitätstest, JURY- 696
- stairs 1194, 1242, 1266
- standardisierte Parameter 205
- standardisierte Zeitkonstante 211
- Standardregelalgorithmus 567
- State Reader 1477
- State Writer 1478
- State-Space 1390
- stationärer Betriebszustand 236
- stationärer Regelfehler 232
- stationärer Zustand 996
- statischer Operator 900
- statisches Element 897
- std 1191 f.
- Steifigkeitskraft 838
- Stelleinrichtung 25
- Stellgrößenübertragungsfunktion 225
- Stellgröße 24, 219, 225
- Stellgrößenfolge 549
- Stellgrößenfrequenzgangfunktion 226
- Stellgrößenverhalten 219, 225
- Stellort 25
- Stellungsalgorithmus 561
- stem 1194, 1266
- stem3 1194
- step 1200, 1211, 1215, 1248, 1266, 1286
- Step 1486
- Steuerbarkeit 755, 810
 - , Prüfung 759
- Steuerbarkeitsmatrix 756
- Steuerkette 23
- Steuerung 23
 - , Punkt-zu-Punkt- 844
- Steuerungsnormalform 747
- Stop Simulation 1481
- Störgröße, Versorgungs- 38
- Störgröße, Last- 38
- Störgrößenaufschaltung 529 f., 879, 881, 884 f.
- Störgrößenbeobachter 876
- Störort 25
- Störübertragungsverhalten 38
- Störung 25
- Störungsübertragungsverhalten 222, 680
- Störungsverhalten 219
- Streckenfrequenzgangfunktion 219
- Streckenübertragungsfunktion 219
- String Compare 1496
- String Concatenate 1497
- String Constant 1497
- String Contains 1497
- String Count 1497
- String Ends With 1497
- String Length 1498
- String Starts With 1497
- String to ASCII 1498
- String to Double 1498
- String to Enum 1499
- String to Single 1499
- Stromrichter 512
- Stromrichterantrieb 512
- Stromvergleichsstelle 332
- Struktur, Gegenkopplung, direkte 37
 - , Gegenkopplung, indirekte 36
- Strukturmittlung 358
- Strukturoptimierung 457
- stückweise lineare Funktion 910
- Stützmenge 1053
- subnormal 1053
- subplot 1180, 1194

subs 1236
 Substitutionsverfahren 716, 723
 Substring 1500
 Subsystem 1459
 Subtract 1440
 SUGENO-Regler, nullter Ordnung 1128
 sum 1191
 Sum 1440
 Sum of Elements 1440
 Summation 610
 Summationselement 32
 Summe, algebraische 1072, 1076
 –, begrenzte 1072
 –, drastische 1072, 1076
 –, EINSTEIN- 1072
 –, HAMACHER- 1072
 –, HAMACHER-, parametrisierte 1076
 Summenzeitkonstante 497, 499
 SUM-MIN-Inferenz 1106, 1116
 SUM-MIN-Verfahren 1110
 SUM-Operator 1106
 SUM-PROD-Inferenz 1106, 1116
 SUM-PROD-Verfahren 1110
 Superpositionsprinzip 46
 Support 1053
 surf 1182, 1194
 surfc 1194
 switch 1176, 1193
 Switch 1478
 Switch Case 1459
 Switch Case Action Subsystem 1460
 sym2poly 1263
 Symbolic Math Toolbox 1233, 1258
 Symmetrisches Optimum 516
 syms 1233, 1258
 System, bilineares 910
 –, nichtlineares 897
 systemantwortinvariante Transformation 726
 Systemmatrix 732, 735, 1197, 1513

T

Tachokonstante 836
 TAKAHASHI 587
 tan 1193
 tand 1193
 tanh 1193
 Tapped Delay 1416
 Tastgrad 1396
 TAYLOR-Entwicklung 916
 TAYLOR-Reihe 916
 Technologieschema 26, 29
 Terminate Function 1495
 Terminator 1481
 Testfunktion 61, 362
 text 1180, 1194
 tf 1196f., 1200, 1203
 tfdata 1198, 1203
 Tiefpass 355
 Time-Based Linearization 1445
 title 1194
 l -Konorm 1068, 1072
 –, parametrisierbare 1068
 –, parametrisierte 1075
 $t_{\max}$ -Zeit 315
 l -Norm 1068, 1072
 –, parametrisierte 1075
 To File 1481
 To String 1500
 To Workspace 1481
 Toleranz 1053
 Toolbox 1161
 Totzeit 138, 251, 380
 Totzeitelement 251
 Totzeit-Element 138, 416
 Totzone 913
 trace 1191
 Träger 1053
 Trajektorie 990
 Transfer Fcn 1390
 Transfer Fcn First Order 1417
 Transfer Fcn Lead or Lag 1417
 Transfer Fcn Real Zero 1418
 Transformation 63
 –, impulsinvariante 727
 –, LAPLACE- 63f.
 –, sprunginvariante 727
 –, systemantwortinvariante 726
 Transformationsmatrix 762
 Transformationsmatrix 739, 744, 1270
 Transitkreisfrequenz 325
 Transponierung 1166
 Transport Delay 1390
 transpose 1191
 Trapezfunktion 1054, 1097
 Trapeznäherung 555, 718
 –, Methode der 720
 Trapezoidal 717, 720, 1402, 1406
 Treppenfunktion 548, 602, 1248
 Trigger 1461
 Trigger-Based Linearization 1445
 Triggered Subsystem 1461
 Trigonometric Function 1440
 T-Summen-Einstellung nach KUHN 497

T-Summen-Regel 499
 – von KUHN 501
 TUSTIN-Formel 718
 two-degree of freedom 1406
 type 1177, 1190
 tzero 1219, 1238, 1266, 1286

U

Überdeckung, optimale 1099
 Übergangsfunktion 62
 Überlagerungsprinzip 46, 67, 898
 Überlappung, optimale 1136
 Überschwingweite 128, 314 f., 373
 Übertragungsblock 29
 Übertragungsfunktion 78, 80, 1196
 –, Frequenzgangmodell 1196
 –, LAPLACE- 78
 –, Nullstellen 81
 –, Pol-Nullstellenform 1196
 –, Polstellen 81
 –, Polynomform 1196
 Übertragungssymbol 212
 Übertragungsverhalten, Führungs- 39
 –, Stör- 38
 Umformungsregel 33, 40
 –, Signalflussstrukturen 33
 –, z-Transformation 675
 Umkehrspanne 911
 Unary Minus 1441
 unbestimmte Koeffizienten 54
 UND-Verknüpfung, unscharfe 1065
 Uniform Random Number 1487
 Unit Conversion 1467
 Unit Delay 1419
 Unit System Configuration 1461

V

var 1191
 Variable and Resettable Delay 1399
 Variable Integer Delay 1399, 1419
 Variable Pulse Generator 1398
 Variable Time Delay 1390
 Variable Transport Delay 1390
 Variant Sink 1478
 Variant Source 1479
 Variant Subsystem 1462
 Vector Concatenate 1441, 1479
 verallgemeinerter Fehler 442
 Vereinfachungsregel 33
 Vereinigung 1065 f., 1072
 Vergleichsschaltung 329
 Vergrößerung 1059

Verhalten, differenzierendes 363
 –, integrierendes 363
 –, proportionales 363
 Verkettung 1086
 Verkleinerung 1059
 Verschiebung, im Frequenzbereich 69
 – nach links im Zeitbereich 69
 – nach rechts im Zeitbereich 68
 Verschiebungsoperator 608
 Verschiebungssätze 68
 Versorgungsstörgröße 38, 219
 Versorgungsstörungsfrequenzgangfunktion 221, 230
 Versorgungsstörungsübertragungsfunktion 220, 230
 Verstärkungs-Bandbreite-Produkt 326
 Verstärkungsmaß, logarithmisches 292
 Verstärkungsprinzip 46, 67, 898
 Verzögerungselement 379
 Verzögerungszeit 581
 Verzögerungszeitkonstante 123, 334
 Verzugszeit 381, 384, 581
 Verzweigungselement 31
 view 1186, 1194
 Vorfilter 523, 775, 804, 871
 Vorhaltzeit 183
 Vorhaltzeitkonstante 166, 334
 Vorspannung 913
 Vorwärtsdifferenz 610, 724
 Vorwärtsdifferenzen, Methode der 719
 vpa 1264

W

Wahrheitsfunktion 1048
 Wahrheitsgrad 1048
 Waveform Generator 1487
 Weighted Sample Time 1468
 Weighted Sample Time Math 1441
 Wendepunkt 381
 Wendetangentenverfahren 381, 384, 391
 Wendezeit 315
 WENN-DANN-Regel 1090, 1099
 WENN-Teil 1090, 1128
 Wertefolge 603
 what 1177, 1190
 while 1174, 1193
 While Iterator 1463
 While Iterator Subsystem 1463
 while-Schleife 1174
 whitebg 1194
 who 1165, 1190
 whos 1165, 1190
 Width 1468
 Winkelgeschwindigkeit 838

Wirkungsplan 29
Wirkungsweg 23
WOK, Austrittswinkel aus Polstellen 269
–, Eintrittswinkel in Nullstellen 269
WOK-Kontur 285
WOK-Verfahren 254
WOK-Zweig, Schnittwinkel in Verzweigungspunkten 266
Wrap To Zero 1398
Wurzel-Element 925
Wurzelortskurve 253, 1221
Wurzelschwerpunkt 263

X

xlabel 1194
XY Graph 1481

Y

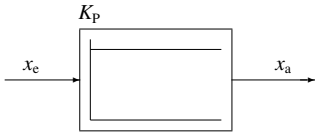
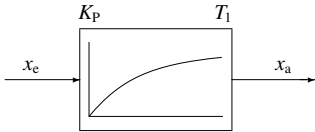
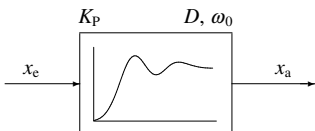
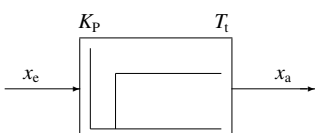
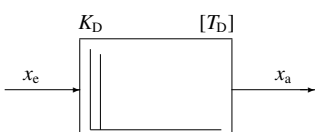
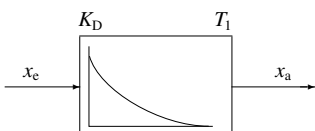
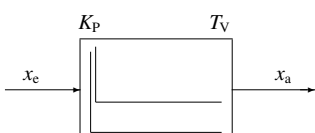
ylabel 1194

Z

Zahl, unscharfe 1053
Zeitbereich 64
Zeitkonstante 123, 209
–, Ersatz- 841
–, mechanische 840
Zeitprozentkennwertmethode 395
Zeitprozentwert 395
Zeitvariable, diskrete 548
Zero Order Hold 1419
Zero-Pole 1393
zeros 1177, 1191
zgrid 1194, 1254, 1266
ZIEGLER 494, 587
zlabel 1194

zpk 1196, 1198, 1203
zpkdata 1203, 1272
z-Rücktransformation 1258
ztrans 1258
z-Transformation 589, 596, 603, 1258
–, inverse 638 f.
z-Transformierte 603
z-Übertragungsfunktion 600, 644
Zugehörigkeitsaussage 1048
Zugehörigkeitsfunktion 1047, 1052
–, binäre 1048
–, dreieckförmige 1062
–, quadratische 1062
–, rechteckförmige 1123
Zugehörigkeitsgrad 1047 f.
Zustandsbeobachter 786, 788, 876
Zustandsbeschreibung 729
Zustandsdarstellung 736
Zustandsdifferenzialgleichung 730, 732
Zustandsebene 990
Zustandsgleichung 1269
Zustandskurve 990
Zustandsmodell 1196 f.
Zustandsregelung 766, 1280
Zustandsregler 807, 867
Zustandsrückführung 766, 879
Zustandsvariable 730, 736, 1510
Zustandsvektor 731, 1197
Zweiortskurvenverfahren 978
Zweipunkt-Element 922, 928, 945, 948
– mit Hysterese 935, 951
Zweipunktregelkreis 1016
Zweipunktregler 1016
– mit nachgebender Rückführung 1041
– mit verzögert-nachgebender Rückführung 1041

Differenzialgleichungen von Regelkreiselementen

Name	Gleichungen im Zeitbereich	Übertragungssymbol
P	$x_a = K_P \cdot x_e$	
PT ₁	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_P \cdot x_e$	
PT ₂	$\frac{1}{\omega_0^2} \cdot \frac{d^2 x_a}{dt^2} + \frac{2 \cdot D}{\omega_0} \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_P \cdot x_e$	
PT _t	$x_a = K_P \cdot x_e(t - T_t)$	
D	$x_a = K_D \cdot \frac{dx_e}{dt}, \quad \left[x_a = T_D \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	
DT ₁	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_D \cdot \frac{dx_e}{dt}$	
PD	$x_a = K_P \cdot \left[T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} + x_e \right]$	

Name	Gleichungen im Zeitbereich	Übertragungssymbol
PDT ₁	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_P \cdot \left[T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} + x_e \right],$ $T_V > T_1$	
PPT ₁	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_P \cdot \left[T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} + x_e \right],$ $T_V < T_1$	
I	$x_a = K_I \int x_e dt, \quad \left[x_a = \frac{1}{T_I} \int x_e dt \right]$	
PI	$x_a = K_P \cdot \left[x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt \right]$	
PID additive Form	$x_a = K_P \cdot \left[x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt + T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	
PID multiplikative Form	$x_a = K_P \cdot \left[\frac{T_N + T_V}{T_N} \cdot x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt + T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	
PIDT ₁ additive Form	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_P \cdot \left[\frac{T_1 + T_N}{T_N} \cdot x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt + (T_1 + T_V) \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	
PIDT ₁ multiplikative Form	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_P \cdot \left[\frac{T_V + T_N}{T_N} \cdot x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt + T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	

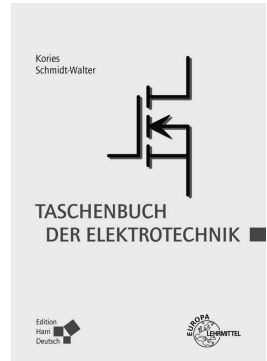
R. Kories, H. Schmidt-Walter

Taschenbuch der Elektrotechnik

11., überarbeitete Auflage 2017,
768 Seiten, 2-fbg., gebunden, Kunststoffeinband,
Stichwortverz. dt. – engl.,

Europa-Nr.: 56689

ISBN 978-3-8085-5865-2



Themen

- Gleichstrom
- Elektrische und magnetische Felder
- Wechselstrom und Drehstrom
- Elektrische Maschinen
- Messung von Strom, Spannung, Leistung
- Netzwerke bei veränderlicher Frequenz
- Signale und Systeme
- Analoge Schaltungstechnik
- Digitaltechnik
- Stromversorgungen

Anhang

- Mathematische Formelsammlung
- Größen und Maßeinheiten
- Tabellen zu Grundlagen, Elektrotechnik und Elektronik
- Elemente der Installationstechnik
- Deutsch/Englische Fachbegriffe
- Schaltzeichen