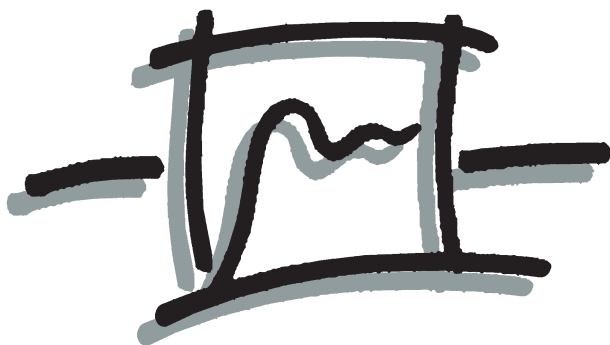


Lutz
Wendt



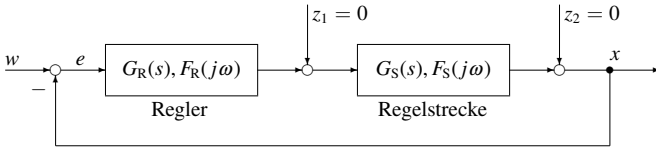
TASCHENBUCH DER REGELUNGSTECHNIK

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

$x(p) = F(p) \cdot w(p), \quad p := j\omega,$ $F(p) = \frac{x(p)}{w(p)} = \frac{F_R(p) \cdot F_S(p)}{1 + F_R(p) \cdot F_S(p)} = \frac{Z_R(p) \cdot Z_S(p)}{N_R(p) \cdot N_S(p) + Z_R(p) \cdot Z_S(p)}$
$e(p) = w(p) - x(p) = [1 - F(p)] \cdot w(p)$ $= \frac{1}{1 + F_R(p) \cdot F_S(p)} \cdot w(p) = \frac{N_R(p) \cdot N_S(p)}{N_R(p) \cdot N_S(p) + Z_R(p) \cdot Z_S(p)} \cdot w(p)$
<p>Bei Sprungaufschaltung $w(t) = w_0 \cdot E(t)$ gilt:</p> $e(t \rightarrow \infty) = \lim_{p \rightarrow 0} [1 - F(p)] \cdot w_0 = \lim_{p \rightarrow 0} \frac{N_R(p) \cdot N_S(p)}{N_R(p) \cdot N_S(p) + Z_R(p) \cdot Z_S(p)} \cdot w_0$

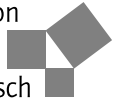
1	Einführung in die Regelungstechnik.....	23	⇒
2	Darstellung von regelungstechnischen Strukturen.....	29	⇒
3	Berechnungsmethoden für Regelkreise	45	⇒
4	Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken	117	⇒
5	Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen	219	⇒
6	Stabilität von Regelkreisen	235	⇒
7	BODE-Verfahren 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	811	⇒
14	Nichtlineare Regelungen.....	873	⇒
15	Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	1023	⇒
16	Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB	1137	⇒
17	Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink	1271	⇒
18	Numerische Verfahren für die Regelungstechnik	1473	⇒
19	Formelzeichen und Abkürzungen.....	1489	⇒
20	Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik	1503	⇒
	Regelungstechnische Begriffe – englisch und deutsch		
	Sachwortverzeichnis	1543	⇒

Taschenbuch der Regelungstechnik

mit MATLAB und Simulink



Edition
Harri
Deutsch



Taschenbuch der Regelungstechnik

mit MATLAB und Simulink

von

Prof. Dr.-Ing. Holger Lutz

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wendt

11., ergänzte Auflage

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

Europa-Nr.: 56788

Autoren:

Dr.-Ing. Holger Lutz, geb. Sinning, Elektromechanikerlehre in einer Firma für Steuer- und Regelungsanlagen, Studium an der Ingenieurschule Kassel zum Ing. grad., nach Berufstätigkeit als 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

11., ergänzte Auflage 2019

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5869-0

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

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

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09618 Brand-Erbisdorf

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

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

Vorwort

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

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

In vielen Anwendungsbereichen hat sich MATLAB als *Language of Technical Computing* auf breiter Ebene für die Berechnung, Visualisierung und Programmierung von technischen und wirtschaftlichen Problemstellungen durchgesetzt. Ergänzt wird MATLAB[®] 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	221
5.1.4	Gleichungen für das Störungsübertragungsverhalten von Laststörgrößen	222
5.1.5	Berechnungsbeispiel	223
5.1.6	Gleichungen für das Stellgrößenverhalten	225
5.2	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 Unterschwingen ohne periodisches Schwingen	369
9.3.2.6	Sprungantwortverläufe mit periodischem Schwingen	371
9.3.2.6.1	Identifikationsmerkmale von PT ₂ -Elementen	371
9.3.2.6.2	PT ₂ -Elemente mit Vorhalt- oder Verzögerungselement	377
9.3.2.7	Sprungantwortverläufe von Elementen mit Totzeit	380
9.3.3	Sprungantwortverläufe mit Wendepunkt und ohne Überspringen	381
9.3.3.1	Prinzip des Wendetangentenverfahrens	381
9.3.3.2	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten	383
9.3.3.3	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit gleichen Zeitkonstanten	387
9.3.3.4	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit mehreren Zeitkonstanten	390
9.3.3.5	Zusammenfassung des Wendetangentenverfahrens	394
9.3.3.6	Zeitprozentkennwertmethode	395
9.3.4	Sprungantwortverläufe von Integral-Elementen	400
9.3.4.1	Eigenschaften von Integral-Elementen	400
9.3.4.2	Identifikation von reinen Integral-Elementen	400
9.3.4.3	Identifikation von Integral-Elementen mit Verzögerung	402
9.3.4.4	Identifikation von Integral-Elementen mit Totzeit	405
9.4	Sprungantworten und Identifizierungsgleichungen	407
9.4.1	Einleitung	407
9.4.2	Zusammenstellung von Sprungantwortfunktionen und mathematischen Modellen von Übertragungselementen	407
9.4.3	Zusammenfassung	433

9.5	Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren	434
9.5.1	Stochastische Prozesse, Modellbegriffe	434
9.5.2	MA-Modell (moving-average model)	434
9.5.3	AR-Modell (auto-regressive model)	436
9.5.4	ARMA-Modell (auto-regressive moving-average model)	437
9.5.5	Modelle mit zusätzlicher deterministischer Eingangsgröße	438
9.5.5.1	Allgemeine Modellstruktur	438
9.5.5.2	Modellarten mit deterministischer und stochastischer Eingangsgröße	440
9.5.6	Parameterschätzung von ARX-Modellen	440
9.5.6.1	Prinzip der Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren (experimentelle Identifikation)	440
9.5.6.2	Fehlerarten für die Anwendung von Parameterschätzverfahren	441
9.5.6.3	Modellbestimmung bei Prozessen mit vernachlässigbaren Störgrößen	443
9.5.6.4	Modellbestimmung mit der Methode der kleinsten Quadrate	449
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise, erweiterte Regelkreisstrukturen	457
10.1	Einleitung	457
10.2	Parameteroptimierung im Zeitbereich	458
10.2.1	Begriff der Regelfläche	458
10.2.2	Integralkriterien im Zeitbereich, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	459
10.2.2.1	Integralkriterium der Linearen Regelfläche, IE-Kriterium (Integrated Error criterion)	459
10.2.2.2	Integralkriterien der Betragsregelfläche, 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	Basisalgorithmen für digitale Regelungen	549
11.2.1	Einleitung	549
11.2.2	Proportionalalgorithmus	550
11.2.3	Approximation von Integration und Differenziation durch diskrete Operationen ...	550
11.2.3.1	Integralalgorithmen mit Rechtecknäherung	550
11.2.3.2	Integralalgorithmus mit Trapeznäherung	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 des Vorfilters	769
12.3.3	Zustandsregelung mit Beobachter	776
12.3.3.1	Prinzipielle Arbeitsweise von Beobachtern	776
12.3.3.2	Ermittlung von Zustandsbeobachtern durch Polvorgabe	780
12.3.4	Systematische Vorgehensweise bei der Berechnung von Zustandsreglern und Zustandsbeobachtern	786
12.3.5	Zusammenfassung	786

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

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

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

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

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

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

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

17.3.2.3	Impulsantwort mit Step-, Sum-, Transfer Fcn-, Mux- und Scope-Block	1285
17.3.2.4	Anstiegsantwort mit Ramp-, Transport Delay-, Zero-Pole-, Mux- und Scope-Block	1286
17.3.2.5	Regelkreis mit Gain-, State-Space- und Floating Scope-Block	1286
17.3.3	Geschwindigkeitsregelung mit trapezförmigem Führungsgrößenprofil	1288
17.3.4	Ermittlung eines Zustandsmodells mit der Funktion linmod	1290
17.3.5	Streckensteuerung für eine Linearachse	1291
17.3.6	Streckensteuerung für eine Linearachse mit Führungsgrößenvorsteuerung	1294
17.3.7	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben	1295
17.3.8	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben und Führungsgrößenvorsteuerung	1300
17.4	Simulation und Programmierung mit Simulink	1301
17.4.1	Ablauf einer Simulation	1301
17.4.2	Algebraische Schleifen	1302
17.4.3	Numerische Lösungsverfahren und Simulations-Parameter für Simulink-Modelle	1304
17.4.3.1	Numerische Lösungsverfahren	1304
17.4.3.2	Simulations-Parameter	1305
17.4.3.3	Simulation einer Lageregelung mit Zerspanungsprozess (steifes System)	1307
17.4.4	Start der Simulation von der MATLAB-Umgebung	1312
17.4.4.1	Allgemeines	1312
17.4.4.2	Simulation eines Gleichstrommotors mit Getriebe	1312
17.4.4.3	Setzen und Abfragen der Simulationsparameter mit simset und simget	1315
17.4.5	Simulink-Subsysteme (Untersysteme, hierarchische Modelle)	1316
17.4.5.1	Allgemeines	1316
17.4.5.2	Strukturierung von Simulink-Modellen durch Untersysteme	1316
17.4.5.3	Strukturierung von Simulink-Modellen mit Subsystem-Blöcken	1318
17.5	Simulation digitaler Regelungen	1320
17.5.1	Allgemeines	1320
17.5.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Discrete Block Library	1320
17.5.2.1	Sprungantwortfolge einer zeitdiskreten PT_1 -Regelstrecke mit Unit Delay-Block	1320
17.5.2.2	Sprungantwortfolge mit Discrete-Time Integrator-Block	1322
17.5.2.3	Sprungverhalten einer I_2 -Regelstrecke mit Halteglied	1324
17.5.2.4	Einschleifiger digitaler Regelkreis mit Zero-Order Hold-Block	1326
17.5.3	Digitale Kaskadenregelung mit unterschiedlichen Abtastzeiten	1327
17.5.4	Digitale Zustandsregelungen	1330
17.5.4.1	Diskretisierung einer Zustandsregelung	1330
17.5.4.2	Zustands-Drehzahlregelung mit zeitdiskretem Streckenmodell	1334
17.5.4.3	Zustands-Drehzahlregelung mit Zustandsbeobachter	1335
17.5.5	Lösungsverfahren für digitale Regelungen	1336
17.6	Simulation nichtlinearer und zeitvarianter Systeme	1336
17.6.1	Allgemeines	1336
17.6.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Discontinuities Block Library	1337
17.6.2.1	Sinusantwort mit Sine Wave-, Dead Zone- und XY Graph-Block	1337
17.6.2.2	Sinusantwort mit Sine Wave- und Saturation-Block	1337
17.6.2.3	Sinusantwort mit Sine Wave- und Backlash-Block	1338
17.6.2.4	Sinusantwort mit Sine Wave- und Relay-Block	1339
17.6.3	Linearisierung des nichtlinearen Modells eines Gleichstrommotors mit linmod	1339
17.6.4	Kraftregelung an Arbeitsmaschinen	1341

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

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

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 .

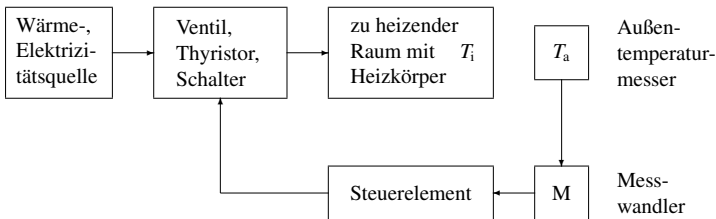


Bild 1.1-1: Technologieschema einer Temperatursteuerung

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.

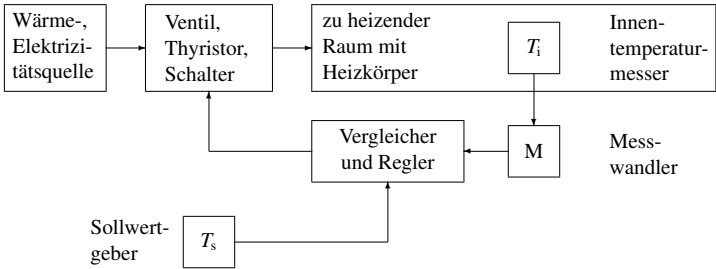


Bild 1.1-2: Technologieschema einer Temperaturregelung

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 an-greifen.	Reagiert nur auf Störungen, die ge-messen und in der Steuerung verar-beitet werden.
Reaktion auf Störungen (zeitlich):	Reagiert erst dann, wenn die Dif-ferenz von Soll- und Istwert sich ändert.	Reagiert schnell, da die Störung di-rekt gemessen wird.
Technischer Aufwand:	Geringer Aufwand: Messung der zu regelnden Größe, Soll-Istwert-Vergleich, Leistungsverstärkung.	Hoher Aufwand, wenn viele Stör-ungen berücksichtigt werden müssen, geringer Aufwand, wenn keine Stö-rungen auftreten.
Verhalten bei instabilen Systemen:	Bei instabilen Systemen müssen Regelungen eingesetzt werden.	Steuerungen sind bei instabilen Sys-temen 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.

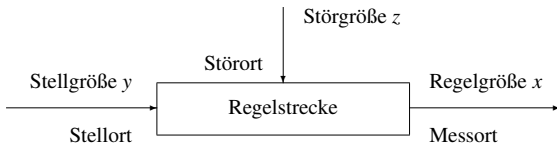


Bild 1.2-1: Regelstrecke mit Ein- und Ausgangsgrößen

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 Regelungssystems 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.

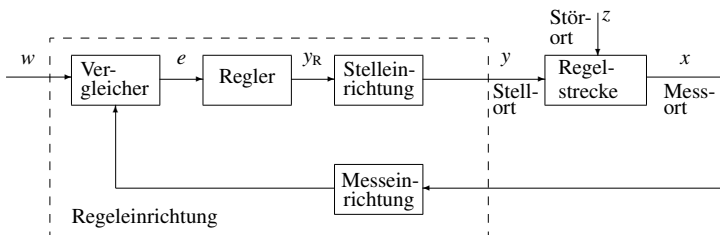


Bild 1.2-2: Regelungstechnische Elemente und Begriffe

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.

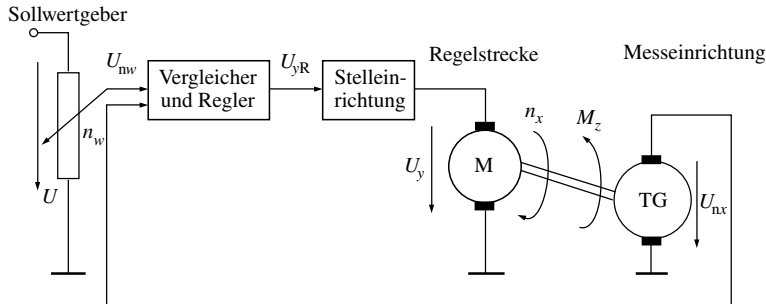


Bild 1.2-3: Technologieschema einer Drehzahlregelung

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 Dimension $\text{mV}/\text{min}^{-1}$. 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.

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

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

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

(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)):

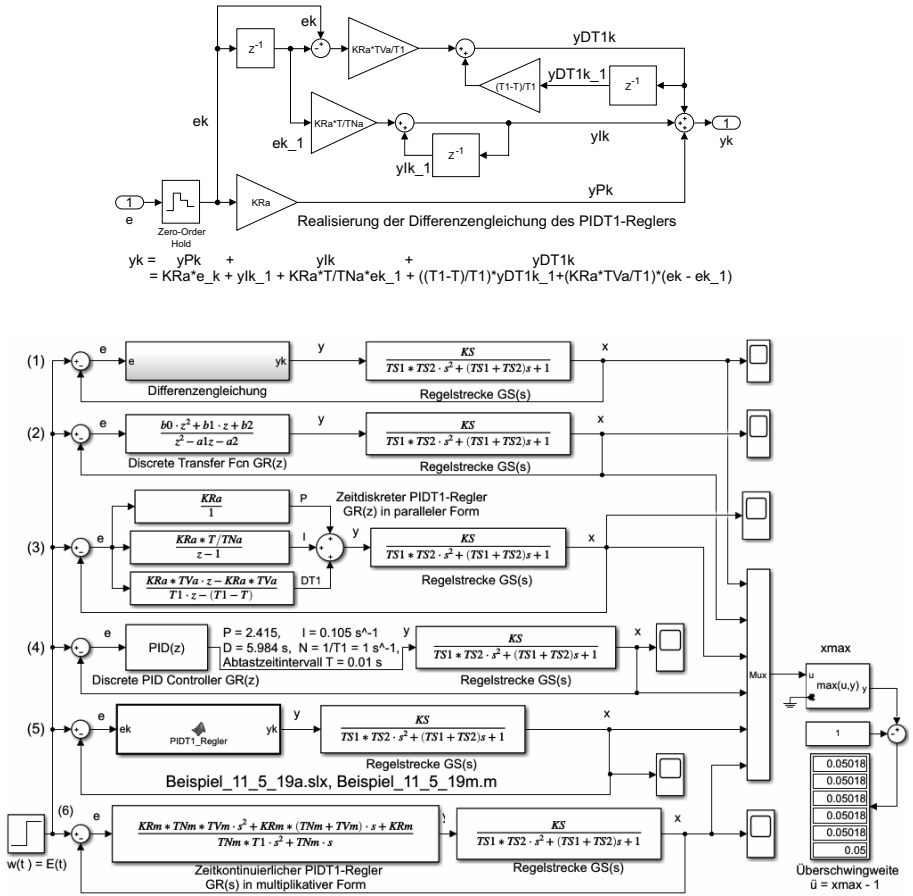
$$G_{\text{R}}(s) = \frac{K_{\text{Rm}} \cdot (1 + T_{\text{Nm}} \cdot s) \cdot (1 + T_{\text{Vm}} \cdot s)}{T_{\text{Nm}} \cdot s \cdot (1 + T_1 \cdot s)} = \frac{K_{\text{Rm}} \cdot T_{\text{Nm}} \cdot T_{\text{Vm}} \cdot s^2 + K_{\text{Rm}} \cdot (T_{\text{Vm}} + T_{\text{Nm}}) \cdot s + K_{\text{Rm}}}{T_{\text{Nm}}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

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 PID₁-Reglern (Abtastzeitintervall $T = 0.01$ s)

(2) Geschlossene Darstellung nach Tabelle 11.5-10:

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

$$= \underbrace{\frac{b_0 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_2}{z^2 - \frac{T_1 - T}{T_1} \cdot z}}_{G_{\Delta R}(z)} \cdot e(z)$$

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

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)

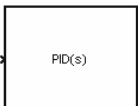
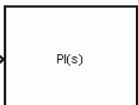
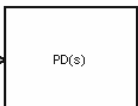
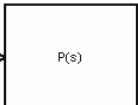

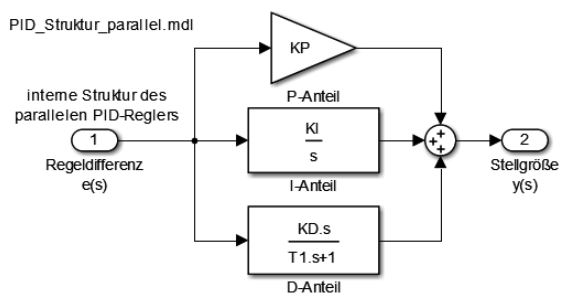
Blocksymbole	Beschreibung
 <p>PID Controller</p>  <p>PI Controller</p>  <p>PD Controller</p>  <p>P Controller</p>  <p>I Controller</p>	<p>PID Controller, zeitkontinuierlicher PID-Standardregler in additiver Form (Abschnitt 4.5.3.5), der Block kann auch als PI-, PD-, P- oder I-Regler implementiert werden.</p> <p>Blockparameter: Reglerart: PID-Regler, (PI-, PD-, P- oder I-Regler), Reglerform: parallel oder ideal (standardisiert), Reglerparameter: Proportional-, Integral-, Differenzierwert, Filterfaktor N für die Verzögerungszeitkonstante $T_1 = 1/N$ des Differenzier-Anteils, Begrenzung des Reglerausgangssignals, Verhinderung des Integralhochlaufs (anti-windup), Vorgabe von Anfangswerten für Integral-Element und Filter, Rücksetzmöglichkeit für das Integral-Element, Eingangsgröße: Regeldifferenz $e(t)$, Ausgangsgröße: Stellgröße $y(t)$.</p> <p>Parallele (additive) Form des PID-Reglers: Bei der parallelen Form des PID-Reglers werden getrennte Verstärkungsfaktoren $P = K_P$, $I = K_I$, $D = K_D$ für P-, I- und D-Anteil verwendet.</p> <p>Beispiel: Für die Reglerparameter Proportionalverstärkung $P = K_P = 2$, Integrierverstärkung $I = K_I = 0.25 \text{ s}^{-1}$, Differenzierverstärkung $D = K_D = 0.5 \text{ s}$, Filterkoeffizient $N = 1/T_1 = 8 \text{ s}^{-1}$, Verzögerungszeitkonstante $T_1 = 1/N = 0.125 \text{ s}$, ergibt sich die Reglerübertragungsfunktion</p> $G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = P + \frac{I}{s} + \frac{D \cdot s}{\frac{1}{N} \cdot s + 1} = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D \cdot s}{T_1 \cdot s + 1}$ $= \frac{(K_P \cdot T_1 + K_D) \cdot s^2 + (K_P + K_I \cdot T_1) \cdot s + K_I}{T_1 \cdot s^2 + s}$ $= 2 + \frac{0.25}{s} + \frac{0.5 \cdot s}{0.125 \cdot s + 1} = \frac{6 \cdot s^2 + 16.25 \cdot s + 2}{s^2 + 8 \cdot s}$ <p>Reglerstruktur für den parallelen PID-Regler:</p>  <p>PID_Struktur_parallel.mdl</p> <p>interne Struktur des parallelen PID-Reglers</p> <p>1 Regeldifferenz $e(s)$</p> <p>2 Stellgröße $y(s)$</p> <p>PID Controller form: Parallel</p> <p>Eingabe:</p> <p>Proportional (P): K_P</p> <p>Integral (I): K_I</p> <p>Derivative (D): K_D</p> <p>Filter coefficient (N): $1/T_1$</p>
<p>Ideale (standardisierte, additive) Form des PID-Reglers: Bei der idealen Form des PID-Reglers wirkt die Reglerverstärkung K_R auf alle Zweige. Die oben verwendeten Werte liefern die Reglerverstärkung K_R, Nachstellzeitkonstante T_N, Vorhaltzeitkonstante T_V und Verzögerungszeitkonstante T_1 des realen, additiven PID-Reglers (Abschnitt 4.5.3.5) mit $K_R = K_P = 2$, $T_N = \frac{K_P}{K_I} = 8 \text{ s}$, $T_V = \frac{K_D}{K_P} = 0.25 \text{ s}$, $T_1 = \frac{1}{N} = 0.125 \text{ s}$, $P = K_R = 2$, $I = \frac{1}{T_N} = 0.125 \text{ s}^{-1}$, $D = T_V = 0.25 \text{ s}$, $N = \frac{1}{T_1} = 8 \text{ s}^{-1}$.</p>	

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

Beschreibung

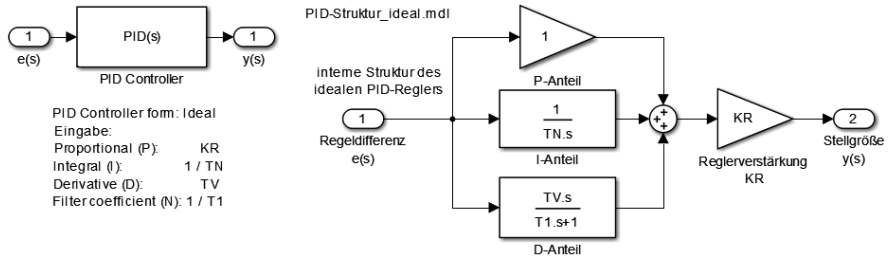
Die Reglerübertragungsfunktion in der idealen Form ist

$$G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = P \cdot \left(1 + \frac{I}{s} + D \cdot \frac{N \cdot s}{s + N} \right) = K_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + \frac{T_V \cdot s}{T_I \cdot s + 1} \right)$$

$$= \frac{K_R \cdot T_N \cdot (T_I + T_V) \cdot s^2 + K_R \cdot (T_N + T_I) \cdot s + K_R}{T_N \cdot T_I \cdot s^2 + T_N \cdot s}$$

$$= 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{8 \cdot s} + \frac{0.25 \cdot s}{0.125 \cdot s + 1} \right) = \frac{6 \cdot s^2 + 16.25 \cdot s + 2}{s^2 + 8 \cdot s}$$

Reglerstruktur für den idealen PID-Regler:



Mit den berechneten Werten ist das Zeitverhalten der Regler gleich,

$$G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = \underbrace{K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D \cdot s}{T_I \cdot s + 1}}_{\text{PID-Regler parallel}} \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + \frac{T_V \cdot s}{T_I \cdot s + 1} \right)}_{\text{PID-Regler ideal}}$$

$$K_R = K_P, \quad T_N = \frac{K_P}{K_I}, \quad T_V = \frac{K_D}{K_P}, \quad T_I = \frac{1}{N},$$

die Sprungantwort ist angegeben.

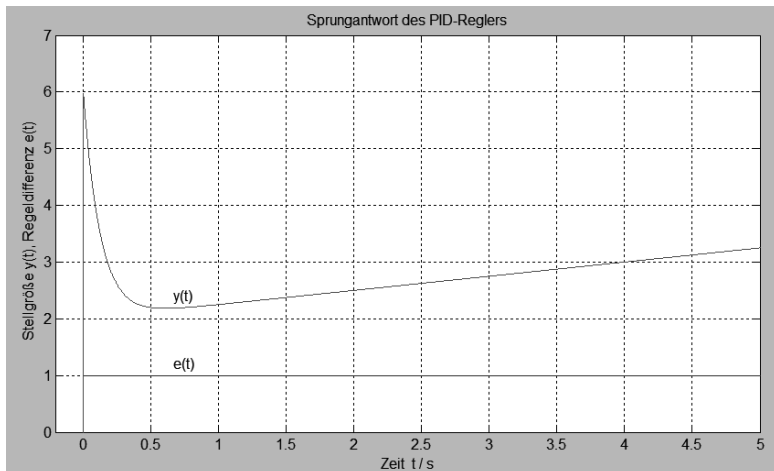
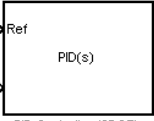
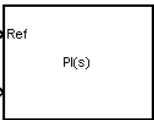



Tabelle 17.7-2: Continuous Block Library,
Modellblöcke für zeitkontinuierliche lineare Systeme (Fortsetzung)

Beschreibung	
Für die weiteren implementierten Regler gelten folgende Zusammenhänge:	
PI-Regler: $G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = \underbrace{K_P + \frac{K_I}{s}}_{\text{PI-Regler parallel}} = \underbrace{K_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s}\right)}_{\text{PI-Regler ideal}}, \quad K_R = K_P, \quad \frac{K_R}{T_N} = K_I.$	
PD-Regler: $G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = \underbrace{K_P + \frac{K_D \cdot s}{T_I \cdot s + 1}}_{\text{PD-Regler parallel}} = \underbrace{K_R \cdot \left(1 + \frac{T_V \cdot s}{T_I \cdot s + 1}\right)}_{\text{PD-Regler ideal}}, \quad K_R = K_P, \quad K_R \cdot T_V = K_D, \quad T_I = \frac{1}{N}.$	
P-Regler: $G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = K_P = K_R.$	
I-Regler: $G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = \frac{K_I}{s} = \frac{K_R}{T_N \cdot s}, \quad \frac{K_R}{T_N} = K_I.$	
Blocksymbole	Beschreibung
	<p>PID Controller (2DOF), two-degree of freedom, zeitkontinuierlicher PID-Standardregler mit zwei Freiheitsgraden in additiver Form (Abschnitt 4.5.3.8), der Block kann auch als PI-Regler oder PD-Regler mit zwei Freiheitsgraden implementiert werden.</p> <p>Blockparameter: Reglerart: PID-Regler, (PI- oder PD-Regler), Reglerform: parallel oder ideal (standardisiert), Reglerparameter: Proportional-, Integrier-, Differenzierwert, Filterfaktor N für die Verzögerungszeitkonstante $T_I = 1/N$ des Differenzier-Anteils, Führungsgrößenfaktor b für den Proportionalanteil, Führungsgrößenfaktor c für den Differenzieranteil, Begrenzung des Reglerausgangssignals, Verhinderung des Integralhochlaufs (anti-windup), Vorgabe von Anfangswerten für Integral-Element und Filter, Rücksetzmöglichkeit für das Integral-Element,</p> <p>Eingangsgrößen: Führungsgröße $w(t)$, Regelgröße $x(t)$, Ausgangsgröße: Stellgröße $y(t)$.</p> <p>Mit den zusätzlichen Freiheitsgraden b und c des Reglers lässt sich ein gewünschtes Führungsverhalten des Regelkreises einstellen (Abschnitt 4.5.3.8, Beispiel 4.5-12).</p>
	
	

20 Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik, regelungstechnische Begriffe

20.1 Deutschsprachige Fachliteratur

- ADAMY, J.: Nichtlineare Systeme und Regelungen.
3. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, 2018.
- ANGERMAN, A.; BEUSCHEL, M.; RAU, M.; WOHLFARTH, U.: MATLAB – Simulink – Stateflow: Grundlagen, Toolboxes, Beispiele.
9. Auflage, Berlin, De Gruyter Oldenbourg Verlag, 2017.
- 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.
- JASCHEK, H.; VOOS, H.: Grundkurs der Regelungstechnik.
15. Auflage, München, Wien, R. Oldenbourg Verlag, 2010.
- JUNGAS, P.: Praxis der Simulationstechnik.
Haan-Gruiten, Verlag Europa-Lehrmittel, 2014.
- KAHLERT, J.: Crash-Kurs Regelungstechnik.
2. Auflage, Berlin, VDE-VERLAG, 2015.
- KASPERS/KÜFNER: Messen, Steuern, Regeln.
8. Auflage, Braunschweig, Wiesbaden, Vieweg Teubner, 2009.
- LITZ, L.: Grundlagen der Automatisierungstechnik.
2. Auflage, De Gruyter Oldenbourg, München, 2012.
- LUNZE, J.: Regelungstechnik, Band I, II.
11., 9. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016, 2016.
- 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.: MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis.
4. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014.
- PHILIPPSEN, H.-W.: Einstieg in die Regelungstechnik.
2. Auflage, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2015.
- REINSCHKE, K.: Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie.
2. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2014.
- SCHERF, H. E.: Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme.
4. Auflage, München, Wien, Oldenbourg Verlag, 2009.
- SCHMID, D.; u. a.: Steuern und Regeln für Maschinenbau und Mechatronik.
15. Auflage, Haan, Verlag Europa-Lehrmittel, 2017.
- SCHNEIDER, W.; HEINRICH, B.: Praktische Regelungstechnik.
4. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2017.
- 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.
- 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.
7. Auflage, Pearson Education, Harlow, UK, 2015.
- GOLNARAGHI, F.; KUO, B. C.: Automatic Control Systems.
9. Auflage, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2009.
- KARRIS, ST. T.: Introduction to Simulink with Engineering Applications.
3. Auflage, Fremont, CA, Orchard Publications, 2011.
- 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.
- MOHAN, N.: Advanced Electric Drives:
Analysis, Control and Modeling Using MATLAB / Simulink.
Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2014.
- NISE, M. S.: Control Systems Engineering.
6. Auflage, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2011.
- OGATA, K.: Modern Control Engineering.
5. Auflage, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2010.
- PALM, W. J.: Introduction to MATLAB for Engineers.
3. Auflage, Singapore, McGraw-Hill, 2010.
- XUE, D.; CHEN, Y.: System Simulation Techniques with MATLAB and Simulink.
Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2013.
- XUE, D.; CHEN, Y.: Modeling, Analysis and Design of Control Systems with MATLAB and Simulink.
Singapore, World Scientific Publishing, 2015.
- 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
– grÖÖße	– 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	BODE plot, BODE diagram
BODE-Diagramm	BOX-JENKINS model, BJ model
BOX-JENKINS-Modell	
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	dynamic behaviour
– Verhalten	
– System	dynamic system
E ck	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

impulse response

Gewichtsfunktion

ordinary differential equation

gewöhnliche Differenzialgleichung

Gleichungsfehler

equation error

gleitende Mittelwertbildung

moving-average

Grenzfall, aperiodischer

critically damped, $D = 1$

Grenzyklus

limit cycle

Gütefunktional

cost function

Gütekriterium

performance criterion

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

Hysteresis

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

integral action

integrierendes Verhalten

inverse matrix

Inverse einer Matrix

inverse LAPLACE transform

inverse LAPLACE-Transformation

Istwert	actual value
IT ₁ -Element	I (integral)-element with first order lag
K anonische Form	canonical form
Kaskaden	cascade
– regelung	– control
– struktur	– structure
Kennkreisfrequenz	undamped natural angular frequency
Kennlinie	characteristic curve
Kettenstruktur	series structure
Knotenpunkt	node
Kompensation, dynamische	dynamic compensation
Kreiskriterium	circle criterion
Kreis	loop
– struktur	– structure
– verstärkung	– gain, closed loop gain
kritische Dämpfung (PT ₂ -Element mit $D = 1$)	critical damping
kritisch gedämpftes System (PT ₂ -Element mit $D = 1$)	critically damped system
L ageregelung	position control system
LAPLACE	LAPLACE
– -Transformierte	– transform
– -Transformationspaar	– transform pair
– -Übertragungsfunktion	continuous-time transfer function
– -Variable	– variable
Leistungsverstärker	power amplifier
lineares	linear
– Regelungssystem	– control system
– zeitinvariantes Regelungssystem	– time-invariant (LTI) control system
Linearisierung	linearization
Linearität	linearity
linke s -Halbebene	left half s -plane (LHP)
LJAPUNOV	LYAPUNOV
–, erste Methode von	–, first method of
– -Funktion	– function
–, zweite Methode von	– second method of
–, (direkte Methode von)	– (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
- wandler
- measuring device
- 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
- , autoregressives, mit gleitender Mittelwertbildung mit externer Variablen
- , autoregressives, mit externer Variablen
- mit gleitender Mittelwertbildung
- , parametrisches
- , selbstbezügliches
- AR model, auto-regressive model
- ARMAX model, auto-regressive moving-average model with extra (exogenous) variable
- ARX model, auto-regressive model with extra (exogenous) variable
- MA model, moving-average model
- parametric model
- AR model, auto-regressive model

MOORE-PENROSE-Inverse

MOORE-PENROSE pseudoinverse

Nachstellzeit

reset time

Nachstellzeitkonstante

reset time constant

Nennerpolynom

denominator polynomial

nichtlineare Differenzialgleichung

nonlinear differential equation

nichtlineares

nonlinear

- Element
- Regelungssystem
- System
- element
- feedback control system
- system

Nichtlinearität

nonlinearity

- als prinzipielle Eigenschaft
- absichtlich eingeführte
- , inherent
- , intentional

nichtsteuerbares System

uncontrollable system

Normalform (kanonische Form)

normal form

normierte Dämpfung

damping ratio

Nullstelle

zero

NYQUIST-Kriterium

NYQUIST stability criterion

Operationsverstärker

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
- Regelung
- Regler
- Verhalten
- element
- control
- controller
- 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
– nachteilung	– 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
PT ₂ -Element (mit $D < 1$, Schwingfall)	underdamped system
Pulsweitenmodulation	pulse-width modulation

Quadrate, Methode der kleinsten
quadratische Regelfläche

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

Rang einer Matrix

rank of matrix

Realteil

real part

rechte s -Halbebene

right half s -plane (RHP)

Regel

control

- abweichung
 - -, bleibende
- algorithmus
- bereich
- differenz
 - -, bleibende
- faktor
- fläche
- einrichtung
- geschwindigkeit
- größe
- 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

plant

Regelung

steady-state control accuracy

- mit Störgrößenaufschaltung

closed-loop control, feedback control

Regelungs

feedforward control

- 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

Regler

series connection

Reihenschaltung

Reihenstruktur

chain structure

Resonanz

resonant

- kreisfrequenz
- wert des Amplitudengangs
(PT₂-Element)

- angular frequency
- peak magnitude

reziproke Übertragungsfunktion

inverse transfer function

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, control signal, actuating signal, plant input
– gröÙe	controllable system
steuerbares System	controllability
Steuerbarkeit	controllability matrix
Steuerbarkeitsmatrix	controlling quantity
Steuergröße	control
Steuerung, Regelung	open-loop control
Steuerung, Steuern (offene Wirkungskette)	

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 AYLOR-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, Dreipunkregler, 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_t -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	feedback control
–, Steuerung mit offenem	feedforward control
– mit offener Wirkungskette	feedforward control
Wirkungslinie	action line

Wirkungs	functional
– plan	– diagram
– planblock	– block
Wurzelort	root locus
–, Amplitudenbedingung	– amplitude (magnitude) condition
–, Asymptoten	– asymptotes
–, Austrittswinkel	– angle of departure
–, Eintrittswinkel	– angle of arrival
–, Konstruktionsregeln	– construction rules
–, Phasenbedingung	– phase condition
–, Verzweigungspunkt	– breakaway point, break-in point
–, Zweige	– branches
Wurzelorts	root locus
– kurve	– plot
– verfahren	– method
z -Ebene	z-plane
z-Transformation	z-transform
z-Transformationspaar	z-transform pair
z-Übertragungsfunktion	z-transfer function
Zählerpolynom	numerator polynomial
Zeit	time
– bereich	– domain
– konstante	– constant
– verhalten	– behaviour, response
– verzögerung	– delay, – lag
Zeitgewichtete Betragsregelfläche	integral of time multiplied by absolute value of error (ITAE)
zeitinvariantes System	time-invariant system
Zeitkonstante	time constant
Zeitlinear gewichtete	integral of time multiplied by
Quadratische Regelfläche	squared error (ITSE)
Zeitquadratgewichtete	integral of squared time multiplied
Quadratische Regelfläche	by squared error (ISTSE)
zeitvariantes System	time-varying system
Zeitverhalten	time response
Zufallsgröße	random variable, random quantity
Zufallsprozess	stochastic process
Zustand, eingeschwungener	steady state
Zustands	state
– beobachter	– observer
– beobachtung	– observation
– differenzialgleichung	– differential equation
– gleichungen	– equations
– grÖße	– variable
– raum	– 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_I -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	Differenzengleichung
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
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	Differenzierelement 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
H URWITZ's stability criterion	HURWITZ-Kriterium
hysteresis	Hysterese
I (integral)-control with state feedback	I-Zustandsregelung
I (integral)-element with first order lag	IT ₁ -Element

imaginary	Imaginärteil
– part	imaginäre Polstellen
– poles	Impuls
impulse	– funktion
– function	– folgefunktion
– function sequence	– antwort, Gewichtsfunktion
– response	Anfangs
initial	– zustand
– state	– wert
– value	– wertsatz
initial-value theorem	Eingangs
input	– matrix
– matrix	– signal
– signal	– gröÙe
– variable	– vektor
– vector	Integrierbeiwert
integration constant	integrierendes Verhalten, I-Verhalten
integral	I-Regler
– action	I-Element
– controller	Betragsregelfläche
– element	Quadratische Regelfläche
– of absolute value of error (IAE)	Zeitquadratgewichtete Quadratische Regelfläche
– of squared error (ISE)	Zeitgewichtete Betragsregelfläche
– of squared time multiplied by squared error (ISTSE)	Zeitlinear gewichtete Quadratische Regelfläche
– of time multiplied by absolute value of error (ITAE)	Integrierzeitkonstante
– of time multiplied by squared error (ITSE)	Integriersättigung
– time constant	inverse LAPLACE-Transformation
– windup	Inverse einer Matrix
inverse	reziproke Übertragungsfunktion
– LAPLACE transform	Verzögerung
– matrix	PT ₁ -Element
– transfer function	PT ₂ -Element
lag	PPT ₁ -PDT ₁ -Element (-Regler)
lag element	LAPLACE
–, first order	– -Transformierte
–, second order	– -Transformationspaar
lag-lead compensator	– -Variable
LAPLACE	Voreilung
– transform	Vorhalt-Element
– transform pair	Methode der kleinsten Quadrate
– variable	linke <i>s</i> -Halbebene
lead	Grenzzzyklus
lead element	Begrenzung
least squares method	
left half <i>s</i> -plane (LHP)	
limit cycle	
limiting	

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

linearity

linearization

loop

- gain
- structure

LS

LUENBERGER observer

LYAPUNOV

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

MA model

magnitude

magnitude plot

manipulated variable

manual control

mathematical

- model
- modeling

matrix

- exponential
- , rank of

maximum overshoot

measuring device

minimum-phase system

model

- , auto-regressive
- , auto-regressive moving-average
- , auto-regressive moving-average with
 extra (exogenous) variable
- , auto-regressive with extra (exogenous)
 variable
- , moving-average
- , parametric

moving-average

moving-average model

MOORE-PENROSE pseudoinverse

multi-position element

multivalued nonlinearity

multivariable system

Natural frequency

negative feedback

node

lineares

– Regelungssystem
 zeitinvariantes Regelungssystem

Linearität

Linearisierung

Kreis

- verstärkung
- struktur

Methode der kleinsten Quadrate

LUENBERGER-Beobachter

LJAPUNOV

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

MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung

Amplitude

Amplitudengang

Stellgröße

Handregelung

mathematisches Modell

mathematische Modellbildung

Matrix-e-Funktion

Rang einer Matrix

Überschwingweite

Messeinrichtung

Minimalphasensystem

AR-Modell

ARMA-Modell, autoregressives Modell mit gleiten-
 der Mittelwertbildung

ARMAX-Modell, autoregressives Modell mit glei-
 tender Mittelwertbildung mit externer Variablen

ARX-Modell, autoregressives Modell mit externer
 Variablen

MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung

parametrisches Modell

gleitende Mittelwertbildung

MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung

MOORE-PENROSE-Inverse, Pseudoinverse

Mehrpunktglied

Element mit mehrdeutiger Kennlinienfunktion

Mehrgrößensystem

ungedämpfte Frequenz

Gegenkopplung

Knotenpunkt

nonlinear	nichtlineares
– element	– Element
– system	– System
– control system	– Regelungssystem
– feedback control system	– Regelungssystem
– differential equation	nichtlineare Differenzialgleichung
nonlinearity	nichtlineares Element mit
–, backlash	– Lose
–, dead zone	– Totzone
–, hysteresis	– Hysterese
nonlinearity	Nichtlinearität als prinzipielle Eigenschaft
–, inherent	absichtlich eingeführte Nichtlinearität
–, intentional	nichtlineares Element mit
nonlinearity	– Begrenzung
–, limiting	– mehrdeutiger Kennlinienfunktion
–, multivalued	– Zweipunktverhalten
–, on-off	– Sättigung
–, saturating	– eindeutiger Kennlinienfunktion
–, single-valued	– zweideutiger Kennlinienfunktion
–, two-valued	Normalform (kanonische Form)
normal form	Zählerpolynom
numerator polynomial	
NYQUIST	NYQUIST-Kriterium
– stability criterion	Ortskurve der Frequenzgangfunktion
– plot, NYQUIST diagram	
Observability	Beobachtbarkeit
– matrix	Beobachtbarkeitsmatrix
observable	
– canonical form	Beobachtungsnormalform
– system	beobachtbares System
observer based control	Beobachtung, Regelung mit Beobachter
observer-error	Beobachtungsfehler
– state equation	– gleichung
observer	Beobachtungs
– matrix	– matrix
– model	– modell
– vector	– vektor
OE model	OUTPUT-ERROR-Modell
offset	Abweichung, bleibende Regelabweichung
on-off control	Zweipunktregelung
open-loop	
– control	Steuerung, steuern
– frequency response	Frequenzgang des offenen Regelkreises
– stability	Stabilität des offenen Regelkreises
– transfer function	Übertragungsfunktion des offenen Regelkreises
operating	
– point	Arbeitspunkt
– range	Regelbereich
operational amplifier	Operationsverstärker
optimal control	Optimale Regelung

optimization
ordinary differential equation
oscillation
output

- equation
- feedback
- matrix
- quantity
- variable
- vector

OUTPUT-ERROR model

overall transfer function

overdamped

overdamped system

overfitting

overshoot

P (proportional)-element

parallel

- connection
- structure

parameter

- optimization
- sensitivity

parametric

- estimation, identification
- estimation method
- identification
- model

partial-fraction expansion

PD (proportional-plus-derivative)-controller

peak

- overshoot
- time

performance

- criterion
- index

periodic

phase

- angle
- crossover angular frequency
- lag
- lead
- margin
- plane
- plane analysis
- plot
- portrait
- response
- shift

Optimierung

gewöhnliche Differenzialgleichung

Schwingung

Ausgangs

- gleichung
- rückführung, Teilzustandsrückführung
- matrix
- gröÙe
- gröÙe
- vektor

OUTPUT-ERROR-Modell

Gesamtübertragungsfunktion

aperiodisch, aperiodisch gedämpft, $D > 1$

PT₂-Element (mit $D > 1$, Kriechfall)

Überanpassung

Überschwingweite

P-Element

Parallel

- schaltung
- struktur

Parameter

- optimierung
- empfindlichkeit

Parameteridentifikation, Parameterschätzung

Parameterschätzverfahren

Parameteridentifikation, Parameterschätzung

parametrisches Modell

Partialbruchzerlegung

PD-Regler

Überschwingweite

t_{\max} -Zeit

Verhalten

Gütekriterium

Gütekriterium

periodisch

Phasen

- winkel
- schnittkreisfrequenz
- nacheilung
- voreilung
- reserve, Phasenrand
- ebene
- , Methode der -ebene
- gang
- portrait
- gang
- 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 uantity	Variable, variable Größe
R amp	Anstiegs
– function	– funktion, Rampenfunktion
– response	– antwort, Rampenantwort
random	Zufalls
– quantity	– grÖße
– variable	– grÖße
range	Bereich
rate	
– action	D-Verhalten, differenzierendes Verhalten
– time	Vorhaltzeit
– time constant	Vorhaltzeitkonstante

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

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-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	– gröÙe, – variable
– vector	– vektor
state, steady	eingeschwungener Zustand
static behaviour	statisches Verhalten
steady-state	Beharrungszustand, eingeschwungener Zustand
– control error	stationäre Regeldifferenz, bleibende Regelabweichung, bleibende Regeldifferenz
	Regelgenauigkeit im Beharrungszustand
	Verhalten im Beharrungszustand
	stationäre Lösung
step	
– function	Sprungfunktion
– response	Sprungantwort

stochastic	stochastischer Prozess, Zufallsprozess
– process	stochastische Variable
– variable	Summationselement, Summationspunkt
summation point	Additionsstelle
summing point	Überlagerungsprinzip
superposition principle	Symmetrisches Optimum
symmetrical optimum	dynamisches System
system, dynamical	Systemidentifikation
system identification	Systemmatrix
system matrix	Lose, System mit Flankenspiel
system with play	
T AYLOR series	TAYLOR-Reihe
test input signal	Testeingangssignal
three-position element	Dreipunkt-Element
three-step action element	Dreipunkt-Element
three-step control	Dreipunkt-Regelung
three-step controller	Dreipunkt-Regler
three-term controller	PID-Regler
time	Zeit
– behavior	– verhalten
– constant	– konstante, Verzögerungszeit
– delay	– verzögerung, Totzeit
– domain	– bereich
– lag	– verzögerung
– response	– verhalten
time constant of integrator	Integrierzeitkonstante
time-invariant system	zeitinvariantes System
time-varying system	zeitvariantes System
tracking system	Folgeregelung
trajectory	Zustandskurve, Trajektorie
transducer	Messwandler
transfer	Übertragungs
– element	– element
– function	– funktion
– -function matrix	– matrix
– lag	– verzögerung
transient	Übergangsverhalten
– behavior	vorübergehende Regeldifferenz
– error signal	T_t -Element, Totzeitelement
transport-lag element, dead-time element	Transponierte einer Matrix
transpose of a matrix	Trapeznäherung
trapezoidal approximation of integral	Einstellregeln
tuning rules	TUSTIN-Formel
TUSTIN's method	Zweipunkt-Element
two-position element	Zweipunkt-Regelung
two-position control	Zweipunkt-Regler
two-position controller	Zweipunkt-Element
two-step action element	Zweipunkt-Regelung
two-step control	

two-step controller
 two-term controller
 two-valued nonlinearity

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-transfer function
 z-transform
 z-transform pair
 zero
 zero-input response
 zero-order hold element (ZOH)
 zero-state response

z-Ebene
 z-Übertragungsfunktion
 z-Transformation
 z-Transformationspaar
 Nullstelle
 Antwortfunktion der homogenen Zustandsgleichung
 Halteglied nullter Ordnung
 Antwortfunktion der inhomogenen Zustandsgleichung

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

A ggregation	aggregation
Aggregationsoperator (MAX- oder SUM-Operator)	aggregation operator, aggregator
algebraische Summe, t -Konorm	algebraic sum
algebraisches Produkt, t -Norm	algebraic product
Ausgangsgröße, scharfe	crisp output
Aussage	conclusion
B asisvariable	base variable
Bedingung	premise
begrenzte Differenz, t -Norm	bounded difference
begrenzte Summe, t -Konorm	bounded sum
Bezeichner, linguistischer	linguistic descriptor, linguistic label
BOOLEsche Algebra	BOOLEAN logic
BOOLEsche Logik	BOOLEAN logic, crisp logic
C harakteristische Funktion einer Menge	characteristic function
D ANN-Teil	conclusion
DANN-Teil einer Regel	consequent, rule-consequent part
Defuzzifizierung	defuzzification
Defuzzifizierungsverfahren	defuzzification, defuzzification method
Dehnung (Modifikator)	dilatation, dilation
drastische Summe, t -Konorm	drastic sum
drastisches Produkt, t -Norm	drastic product
dreieckförmige Zugehörigkeitsfunktion	triangular membership function
Dreiecks-Norm	triangular norm, t -norm
Durchschnittsoperation bei Mengen (UND-Operation)	intersection operation
E ingangsgröße, scharfe	crisp input
EINSTEIN-Produkt, t -Norm	EINSTEIN product
EINSTEIN-Summe, t -Konorm	EINSTEIN sum
Entscheidung	decision
Entscheidung, unscharfe	fuzzy decision
Erfüllungsgrad einer Regel	degree of fulfillment
Erzeugung eines scharfen Wertes	defuzzification
F estlegung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzifizierung	partitioning
Fuzzifizierung	fuzzification
Fuzzy-Logik	fuzzy logic
Fuzzy-Mengen, Konvexität von	convexity of fuzzy set (membership function)
Fuzzy-NICHT-Operator	fuzzy NOT
Fuzzy-ODER-Operator	fuzzy OR

Fuzzy-PID-Regler
 Fuzzy-Regelung
 Fuzzy-Regelungssystem
 Fuzzy-Regler, relationaler
 Fuzzy-UND-Operator

fuzzy-PID-controller
 fuzzy control
 fuzzy control system
 MAMDANI-controller
 fuzzy AND

γ -Operator (kompensatorischer Operator)
 Gewichtete-Mittelwerte-Methode,
 Defuzzifizierungsverfahren

γ -operator
 weighted average defuzzification

HAMACHER-Produkt, t -Norm

HAMACHER intersection operator,
 – product

HAMACHER-Summe, t -Konorm

HAMACHER union operator,
 – sum

Implikation
 Implikation nach MAMDANI
 Implikationsoperator
 Inferenz, Kompositionsregel der
 Information, unscharfe

implication
 MAMDANI implication
 implication operator
 compositional rule of inference
 fuzzy information

Kern
 kompensatorischer ODER-Operator
 kompensatorischer Operator
 kompensatorischer UND-Operator
 Komplement
 Komplement-Operator
 Komplementbildung (Modifikator)
 Komposition
 Kompositionsregel der Inferenz
 Konklusion
 Kontrast-Intensivierung (Modifikator)
 Konvexität von Fuzzy-Mengen
 Konzentration (Modifikator)

core of membership function
 compensatory OR
 compensatory operator
 compensatory AND
 complement
 fuzzy NOT
 complement
 composition
 compositional rule of inference
 conclusion
 intensification, contrast intensification
 convexity of fuzzy set (membership function)
 concentration

λ -Operator (kompensatorischer Operator)
 linguistische Regel
 linguistische Variable
 linguistischer Bezeichner
 linguistischer Modifikator
 linguistischer Wertname
 Links-Max-Methode,
 Defuzzifizierungsverfahren

λ -operator
 linguistic rule
 linguistic variable
 linguistic descriptor, linguistic label
 linguistic modifier, linguistic hedge
 linguistic label, linguistic term, linguistic value
 first of maxima (FOM)
 defuzzification

Logik
 Logik, scharfe
 Logik, unscharfe
 Logiktablelle

logic
 crisp logic
 fuzzy logic
 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, t -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, t -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

Rechts-Max-Methode

Regel
 Regel, linguistische
 Regel, unscharfe
 regelbasierte Schlussfolgerung
 Regelbasis
 Regeln mit ODER-Verknüpfung
 Regeln mit UND-Verknüpfung
 Regler
 Relation
 Relation, scharfe
 Relation, unscharfe
 Relation zwischen scharfen Mengen
 relationaler Fuzzy-Regler

last of maxima (LOM)
 rule
 linguistic rule
 fuzzy rule
 rule-based inference
 rule-base
 disjunctive rules
 conjunctive rules
 controller
 relation
 crisp relation
 fuzzy relation
 binary relation
 MAMDANI-controller

S-Norm

Schaltalgebra
 scharf
 scharfe Ausgangsgröße
 scharfe Eingangsgröße
 scharfe Logik
 scharfe Menge
 scharfe Relation (Beziehung)
 scharfer Wert
 Schließen, unscharfes

 Schlussfolgerung
 Schlussfolgerung, regelbasierte
 Schlussfolgerungssystem, unscharfes
 Schlussfolgerungsverfahren
 Schwerpunkt der größten Fläche,
 Defuzzifizierungsverfahren
 Schwerpunktmethode,
 Defuzzifizierungsverfahren

 Schwerpunktsummenmethode,
 Defuzzifizierungsverfahren
 Singleton
 Stützmenge einer unscharfen Menge
 SUGENO, funktionaler Fuzzy-Regler nach
 SUGENO, Implikation nach
 SUM-MIN-Inferenz, unscharfes Schlussfolge-
 rungsverfahren
 SUM-PROD-Inferenz, unscharfes Schlussfolge-
 rungsverfahren

s-norm, triangular conorm, *t*-conorm
 crisp logic
 crisp
 crisp output
 crisp input
 crisp logic
 crisp set
 crisp relation
 crisp value
 fuzzy inference, fuzzy reasoning,
 approximate reasoning
 conclusion
 rule-based inference
 fuzzy inference system (FIS)
 inference
 center of largest area,
 defuzzification
 center of area (COA),
 defuzzification,
 center of gravity (COG) defuzzification,
 centroid defuzzification method
 center of sums (COS)
 defuzzification
 fuzzy singleton, singleton
 support of membership function
 SUGENO controller
 SUGENO implication
 sum-min inference

 sum-prod inference

t-Konorm

t-Norm
 Toleranz einer unscharfen Menge

s-norm, *t*-conorm, triangular conorm
t-norm, triangular norm
 core of membership function

Träger einer unscharfen Menge
 trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion
 triangulare Konorm
 triangulare 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

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

characteristic function

compensatory AND
compensatory operator
compensatory OR
complement

composition

compositional rule of inference
concentration
conclusion

conjunction
conjunctive rules

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	nomalisierte 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

Relation

rule
rule-antecedent part
rule-base
rule-based inference
rule-consequent part

Relation

Regel
WENN-Teil einer Regel
Regelbasis
regelbasierte Schlussfolgerung
DANN-Teil einer Regel

Set

set operator
singleton

 s -norm
SUGENO-controller
SUGENO implication
sum-min inference

sum-prod inference

support of membership function

Menge

Mengenoperator
Singleton, unscharfe Menge mit einem Wertepaar
 t -Konorm, s -Norm
funktionaler Fuzzy-Regler nach SUGENO
Implikation nach SUGENO
SUM-MIN-Inferenz,
unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
SUM-PROD-Inferenz,
unscharfes Schlussfolgerungsverfahren
Träger, Stützmenge einer unscharfen Menge

t-conorm

t -norm
trapezoidal membership function
triangular membership function
triangular conorm
triangular norm
truth table

triangulare Konorm, t -Konorm, s -Norm
trianguläre Norm, t -Norm, Dreiecksnorm
trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion
dreieckförmige Zugehörigkeitsfunktion
trianguläre Konorm, t -Konorm, s -Norm
trianguläre Norm, t -Norm, Dreiecks-Norm
Wahrheitstabelle, Logiktablelle

Under min operator

union operation

Unter-MIN-Operator,
(alle t -Normen außer MIN)
Vereinigungsoperation bei Mengen
(ODER-Operation)

Weighted average defuzzification

Gewichtete-Mittelwerte-Methode,
Defuzzifizierungsverfahren

Zero (ZO)

nahe-Null (ZE)

Sachwortverzeichnis

A

- Abklingzeitkonstante 128
- abs 1140, 1168
- Abs 1402
- Absenkungsfaktor 309
- absolut stabil 984
- absolute Stabilität 984
- Abtast-Halte-Schaltung 548
- Abtastung 548
- Abtastvorgang 547
- Abtastzeit 547, 837
- Abtastzeitintervall 547
- ackcr 1257, 1262
- acos 1168
- acosc 1168
- acosh 1169
- acot 1168
- acotd 1168
- acoth 1169
- acsc 1168
- acscd 1168
- acsch 1169
- Action Port 1420
- Add 1402, 1414
- Aggregation 1081, 1105
- Ähnlichkeitssatz 69, 606
- Ähnlichkeitstransformationen 1254
- Aktivierungsgrad 1081
- Algebraic Constraint 1403
- algebraische Schleife 1302
- 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, 1205
- Analog-Digital-Wandler 548
- Analog-Digital-Wandlung 548
- Analyse, experimentelle 358
 - , theoretische 358
- analytische Funktion 885
- Anfangsbedingungen 77
- Anfangswertproblem 1480
- Anfangswertsatz 72, 611
- angle 1140, 1168
- Anhebungsfaktor 304
- Ankerinduktivität 813
- Anregelzeit 315, 374, 583
- ans 1138, 1168
- Anstiegsantwort 63, 1188
- Anstiegsantwortfolge 1224
- Anstiegsfunktion 63
 - , Einheits- 63
- Anstiegswinkel, der Asymptoten 263
- Anstiegszeit 314 f.
- Antriebsmotor 812
- Antriebsregelstrecke 814
- Antriebsverstärkung 813
- aperiodischer Grenzfall 58, 129
- append 1184 f.
- Arbeitspunkt 47
- Argument Inport 1462
- Argument Outport 1462
- ARMA-Modell 437
- ARMA-Prozess 437
- ARMAX-Modell 440
- AR-Modell 436
- AR-Prozess 436
- ARX-Modell 439 f.
- ASCII to String 1469
- asec 1169
- asecd 1169
- asech 1169
- asin 1169
- asind 1169
- asinh 1169
- Assertion 1416
- Assignment 1404
- Assoziativ-Gesetz 1045
- Asymptote, Anstiegswinkel 263
 - , Schnittpunkt 263
- asymptotisch stabil 972 f.
- atan 1169
- atan2 1169
- atand 1169
- atanh 1169
- Atomic Subsystem 1433
- aufgeschnittener Regelkreis 219
- augstate 1262
- Ausgangsfehler 441
- Ausgangsgleichung 730, 732
- Ausgangsmatrix 732
- Ausgangsvariable 736, 1173
- Ausgangsvektor 731, 735, 1173, 1485
- Ausgleich 171
- Ausgleichszeit 381, 384, 581

Ausregelbarkeit 228
 Ausregelzeit 315
 Ausschaltdauer 995
 Austrittswinkel der WOK aus Polstellen 269
 autoregressives Modell 436
 AVERAGE-Operation 1064
 axes 1169
 axis 1157, 1169, 1194
 azimuth 1162

B

Backlash 1369
 Backward Euler 717, 719, 1376, 1380
 Bahnsteuerung 820, 1295
 BAIRSTOW-Verfahren 1473, 1475
 Bandbreite 314
 Band-Limited White Noise 1456
 bar 1169
 Bedingung, unscharfe 1033
 Bedingungsteil 1066
 Begrenzungselement 898
 Beharrungszustand 972
 Beobachtbarkeit 757
 –, Prüfung 760
 Beobachtbarkeitsbedingung 765
 Beobachtbarkeitsmatrix 757, 765
 Beobachter 777
 Beobachtungsmodell 780
 Beobachtungsnormalform 750, 765, 781, 1254
 Beobachtungsprinzip 777
 Beobachtungsvektor 777
 Beschleunigungsantwort 831
 Beschleunigungsfehler 233
 Beschleunigungsfunktion 831
 Beschleunigungsmoment 814
 Beschreibungsfunktion 896
 –, Methode der 893
 BESSEL-Filter 479
 Betrag 108, 291
 Betragsoptimum 504, 515
 Bewegungsachse 814
 Bias 1404
 Bildbereich 64
 Bildvariable, komplexe 64
 bilineares System 886
 Bilineartransformation 689
 Binomial-Filter 479
 Binomialfilter-Übertragungsfunktion 845
 Bit Clear 1394
 Bit Set 1394
 Bitwise Operator 1394
 Block Support Table 1419

bode 1176, 1203, 1213, 1242
 BODE-Diagramm 114, 291
 BODE-Verfahren 291, 313
 BOOLEsche Algebra 1045
 BOX-JENKINS-Modell 440
 break 1151, 1169
 BROMWICH-Integral 65
 Bus Assignment 1443
 Bus Creator 1443
 Bus Element In 1443
 Bus Element Out 1443
 Bus Selector 1444
 Bus to Vector 1439
 BUTTERWORTH-Filter 479

C

C Caller 1462
 c2d 1215, 1242
 canon 1262
 case 1152, 1169
 cat 1166
 ceil 1168
 charakteristische Gleichung 53, 80 f., 237, 592, 671
 – des nichtlinearen Regelkreises 951
 – des nichtlinearen Systems 918
 –, Nullstellen 81
 Check Discrete Gradient 1416
 Check Dynamic Gap 1416
 Check Dynamic Lower Bound 1417
 Check Dynamic Range 1416
 Check Dynamic Upper Bound 1417
 Check Input Resolution 1417
 Check Static Gap 1417
 Check Static Lower Bound 1418
 Check Static Range 1417
 Check Static Upper Bound 1418
 CHIEN 495
 Chirp Signal 1456
 cla 1169
 clear 1141, 1166
 clf 1169
 clock 1166
 Clock 1456
 CodeReuse Subsystem 1433
 Combinatorial Logic 1395
 Compare To Constant 1395
 Compare To Zero 1395
 Complex to Magnitude-Angle 1404
 Complex to Real-Imag 1405
 Compose String 1469
 cond 1166
 conj 1168

connect 1184 f.
 Constant 1456
 continue 1169
 contour 1158, 1169
 contour3 1159
 Control System Toolbox 1164
 conv 1146, 1166
 cos 1140, 1168
 cosd 1168
 cosh 1169
 Cosine 1399
 cot 1168
 cotd 1168
 coth 1169
 Coulomb & Viscous Friction 1369
 Counter Free-Running 1456
 Counter Limited 1457
 cross 1166
 csc 1168
 cscd 1168
 csch 1169
 ctranpose 1166
 ctrb 1262
 cumprod 1166
 cumsum 1166

D

d2c 1215, 1242
 damp 1194, 1213, 1229, 1242, 1262
 Dämpfung 58, 128, 314, 1229
 Dämpfungskraft 814
 Dämpfungssatz 606
 DANN-Teil 1066, 1104
 Darstellung, normierte 45
 Data Store Memory 1444
 Data Store Read 1444
 Data Store Write 1444
 Data Type Duplicate 1439
 Data Type Propagation 1439
 Data Type Scaling Strip 1440
 Datenbasis 1105
 dB 114
 dcgain 1191
 DDC-Regelung 549
 Dead Zone 1370
 Dead Zone Dynamic 1370
 Dead-Beat-Regelung 555
 Dead-Beat-Regler 698, 701, 711
 deconv 1166
 Defuzzifizierung 1071, 1084, 1087
 Defuzzifizierungsverfahren 1087
 Dehnung 1035

Dekade 124, 149
 –, Kreisfrequenz- 149
 Delay 1373
 δ -Abtaster 597
 δ -Folge 674, 686
 Delta-Folge 642
 DE MORGANSche Gesetze 1046
 Demux 1445
 Derivative 1353
 Descriptor State-Space 1353
 det 1166
 Detect Change 1395
 Detect Decrease 1395
 Detect Fall Negative 1396
 Detect Fall Nonpositive 1396
 Detect Increase 1396
 Detect Rise Nonnegative 1396
 Detect Rise Positive 1396
 Determinantenkriterium, nach COHN, SCHUR, JURY 695
 Dezibel 114
 diag 1144, 1166
 Difference 1374
 Differenz, begrenzte 1048
 Differenzbildung 556
 Differenzengleichung 589
 Differenzialalgorithmus 556
 Differenzial-Element 154, 363
 – mit Verzögerung 156, 432
 Differenzialgleichung 52, 212
 –, erster Ordnung 1480
 –, Linearisierung 52
 –, Lösung der homogenen 53
 Differenziationssatz 70, 606
 Differenzierv Verstärkung 154, 207
 Differenzierzeitkonstante 46
 Differenzverstärker 323
 Differenzverstärkung 323
 Digital Clock 1457
 digitale Regelung 549
 dirac 1209
 DIRAC-Folge 674, 1234
 DIRAC-Folge 1374
 DIRAC-Impuls 61, 603, 1209
 Direct Lookup Table (n-D) 1399
 Discrete Derivative 1374
 Discrete Filter 1374
 Discrete FIR Filter 1375
 Discrete PID Controller 1376
 Discrete PID Controller (2DOF) 1380
 Discrete State-Space 1386
 Discrete Transfer Fcn 1386

Discrete Zero-Pole 1386
 Discrete-Time Integrator 1386
 diskrete Zeitvariable 548
 diskretes Modell 438
 Diskretisierung 717 f.
 Diskretisierungsverfahren 715
 Diskretisierungszeit 593
 disp 1166
 Display 1454
 Divide 1405, 1410
 Divisionsstelle 32
 Do While Iterator 1420, 1437
 Do While Iterator Subsystem 1437
 Do While Subsystem 1420
 DocBlock 1419
 dominierende Zeitkonstante 584
 dominierendes Polpaar 320
 dot 1166
 D-Regler 1127
 Drehwinkel 814
 Drehwinkelgeschwindigkeitsregelkreis 825
 Drehzahlregelung 824
 Dreiecksfunktion 1030, 1073
 Dreipunkt-Element 921, 929
 – mit Hysterese 930
 Dreipunkt-Regler 882
 – mit verzögerter Rückführung 1020
 dss 1179
 dssdata 1179
 DT₁-Element 156, 432
 Durchgangsfaktor 1173, 1485
 Durchgangsmatrix 732
 Durchschnitt 1041, 1048
 Durchtrittskreisfrequenz 155, 158, 170, 295, 300, 302, 315, 1205
 Durchtrittsphasenwinkel 300
 dynamischer Operator 876
 dynamisches Element 874
 dynamisches Verhalten 77

E

echo 1153, 1166
 Eckkreisfrequenz 124, 295
 eig 1166, 1250, 1262
 Eigenkreisfrequenz 127 ff.
 Eingangsfehler 442
 Eingangsmatrix 732
 Eingangsvariable 736, 1173
 Eingangsvektor 731, 735, 1173, 1485
 Einheitsanstiegsfolge 675
 Einheitsanstiegsfunktion 63, 207
 Einheitsimpulsfolge 674, 1234

Einheitsimpulsfunktion 61
 Einheitssprungsfolge 675
 Einheitssprungfunktion 62, 207, 363
 Einschaltdauer 995
 Einschrittverfahren 1480
 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 874
 –, Integral- 363
 – mit Begrenzung 939
 – mit degressiver Kennlinie 938
 – mit Hysterese und Umkehrspanne (Lose) 946
 – mit Lose 906
 – mit Offset 889, 920
 – mit progressiver Kennlinie 935
 – mit Totzone 940
 – mit Vorspannung 943
 –, neutrales 1045
 –, Null- 1045
 –, Proportional- 363
 –, statisches 873
 elevation 1162
 else 1151, 1169
 elseif 1150, 1169
 Enable 1420
 Enabled and Triggered Subsystem 1421
 Enabled Delay 1387
 Enabled Subsystem 1422
 end 1151, 1166
 Endwertsatz 72, 611
 Energiespeicher 77
 Enumerated Constant 1457
 Environment Controller 1445
 eps 1168
 Erfüllungsgrad 1080
 Ersatztotzeit 381
 Ersatzzeitkonstante 182, 509, 817
 Ersetzungsregel 1066
 etime 1166
 exit 1141, 1166
 exp 1140, 1168
 experimentelle Identifikation 434
 expm 1166, 1246, 1262
 Extract Bits 1397
 eye 1144, 1166

F

- Faltungintegral 72
- Faltungssatz 72, 610
- Fcn 1464
- feedback 1181 f., 1185, 1262
- Fehler, verallgemeinerter 442
- figure 1169
- Find Nonzero Elements 1405
- FIR-Filter 1375
- First Order Hold 1388
- fix 1168
- Flächenschwerpunktformel 1089
- Floating Display 1454
- Floating Scope 1455
- floor 1168
- Folgerung, unscharfe 1033
- for 1149, 1169
- For Each 1422
- For Each Subsystem 1422
- For Iterator 1423
- For Iterator Subsystem 1423
- format long 1140, 1171
- format short 1140, 1171
- for-Schleife 1149
- Forward Euler 717, 719, 1376, 1380
- fplot 1169
- fprintf 1166
- frd 1172, 1179
- frdata 1179
- Freiheitsgrad 201
- Frequenzbereich 64
- Frequenzgang 108
- , Betrag 108
- , Phase 108
- Frequenzgangfunktion 81
- Frequenzgangmodell der Übertragungsfunktion 1172
- Frequenzkennlinien-Diagramm 114, 291
- FROBENIUSform 747
- From 1445
- From File 1457
- From Spreadsheet 1458
- From Workspace 1459
- Führungsfrequenzgangfunktion 221, 230
- Führungsgröße 25, 219
- Führungsgrößenvorsteuerung 1294
- Führungsübertragungsfunktion 220, 230
- Führungsübertragungsverhalten 39, 221, 680
- Führungsverhalten 219
- function 1425
- Function Caller 1464
- Function-Call Feedback Latch 1424
- Function-Call Generator 1425
- Function-Call Split 1425
- Function-Call Subsystem 1425
- Function-File 1147 f.
- Fünfpunkt-Element 932
- Funktion, analytische 885
- , charakteristische 1024
- , harmonische 63
- , mehrdeutige 886
- , positiv definite 981
- , stückweise lineare 886
- Funktionalmatrix 977
- Fuzzifizierung 1072, 1105
- , Datenbasis 1073
- , lineare 1110
- , nichtlineare 1075, 1113
- Fuzzifizierungskomponente 1071
- Fuzzy-D-Übertragungselement 1127
- Fuzzy-I-Regler 1130
- Fuzzy-Logik 1023
- Fuzzy-Menge 1023
- , normale 1029
- Fuzzy-NICHT-Operator 1042
- Fuzzy-ODER-Operator 1042, 1044, 1048
- Fuzzy-PD-Regler 1072, 1078, 1122
- Fuzzy-PID-Regler 1108, 1117, 1131
- Fuzzy-PI-Geschwindigkeitsregler 1131
- Fuzzy-PI-Stellungsregler 1127
- Fuzzy-P-Regler 1105, 1113, 1119
- Fuzzy-Regelung 1070
- Fuzzy-Regler 1071, 1107
- , funktionaler 1071, 1105
- nach MAMDANI 1103
- nach SUGENO 1103
- , relationaler 1071
- Fuzzy-Relationenprodukt 1062
- Fuzzy-UND-Operator 1041, 1044, 1048
- Fuzzy-Zahl 1029
- Fuzzy-Zustandsregelung 1134

G

- Gain 1406
- Gamma-Operator 1053
- , kompensatorischer 1053
- Gegenkopplung, indirekte 230
- Gesamträgheitsmoment 814
- Geschwindigkeitsalgorithmus 561
- Geschwindigkeitsfehler 233
- Geschwindigkeitsregelung 824
- get 1179
- Getriebelose 887
- Getriebespiel 887
- Gewichtsfolge 610, 715

Gewichtsfunktion 61
 ginput 1169
 Glättung 347
 Glättungselement 347
 –, passives 348
 Glättungszeitkonstante 348
 Gleichgewichtslage 968
 Gleichgewichtszustand 972
 Gleichrichter-Element 903
 Gleichstrommotor 1312
 Gleichtaktverstärkung 323
 Gleichung, charakteristische 80, 639
 –, charakteristische, Nullstellen 81
 Gleichung der Harmonischen Balance 951
 global asymptotisch stabil 973
 Goto 1445
 Goto Tag Visibility 1446
 grafisches User Interface 1263
 GRAHAM 461
 Grenzfall, instabiler aperiodischer 129
 Grenzwertung 962
 –, Stabilität 962
 grenzstabil 973
 Grenzwertsatz 72
 Grenzwertsätze 362
 Grenzyklus 884, 968
 grid 1153 f., 1169
 Ground 1459
 Grundlast 992
 gtext 1156, 1169

H
 Halteelement 602
 Haltefunktion 602
 Halteglied 549, 597, 600
 Halteoperation 548
 Harmonische Balance 893
 –, Gleichung der 918, 951
 harmonische Funktion 63
 harmonische Linearisierung 893
 Hauptlast 992
 heaviside 1210
 help 1138
 hist 1169
 Hit Crossing 1370
 Hochpass 356
 Höhe 1029
 hold 1169
 hold off 1155
 hold on 1155
 HRONES 495
 HURWITZ-Kriterium 243, 689
 HURWITZ-Sektor 985

I
 IAE-Kriterium 461
 IC 1440
 Idempotenz 1045
 Identifikation 357
 IE-Kriterium 459
 I-Element 168, 400, 424
 if 1150, 1169
 If 1426
 If Action Subsystem 1427
 ilaplace 1209
 imag 1140, 1168
 Imaginärteil 108
 Implikation 1066
 –, unscharfe 1059
 Implikationskonklusion 1067
 Implikationsoperator 1067
 Implikationsprämisse 1067
 Impulsantwort 61, 1186
 impulse 1176, 1186, 1191, 1222, 1242, 1262
 Impulsfolgefunktion 598, 601
 Impulsfunktion 61
 Impulsübertragung 643
 In Bus Element 1428, 1459
 Inl 1429, 1459
 Index Vector 1446
 indirekte Gegenkopplung 230
 inf 1168
 Inferenz 1066, 1105
 –, Kompositionsregel 1067, 1082
 –, regelbasierte 1071, 1078
 Inferenzeinheit 1078
 initial 1248, 1262
 Initialize Function 1464
 Inport 1429, 1459
 input 1151, 1166
 instabil 973
 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 Betragsregelfläche 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 1356
 Integrator Limited 1356
 Integrierbeiwert 168, 177
 Integrierverstärkung 206
 Integrierzeit 169
 Integrierzeitkonstante 46, 169, 177, 338
 Interpolating Using Prelookup 1399
 Interpreted MATLAB Function 1465
 Interval Test 1397
 Interval Test Dynamic 1397
 inv 1145, 1167
 Invarianz 532
 inverse Kennlinie 888
 –, Linearisierung 888
 Inversenbildung 1061
 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
 IT₁-Element 428
 IT₁-Regelstrecke 175, 406
 iztrans 1234

J

JACOBI-Matrix 977

K

Kaskadenregelung 835
 Kaskadenstruktur 823
 Kennkreisfrequenz 58, 127, 314, 1229
 Kennlinie, degressive 901
 –, inverse 888
 –, progressive 900
 Kern 1029
 Kettenstruktur 34, 1243
 keyboard 1153, 1166, 1196
 Koeffizientenkriterium 692
 Kommutativ-Gesetz 1045
 Kompensation 509, 697
 Kompensation einer Nichtlinearität 889

Kompensationsregler 697
 Komplement 1041 f.
 Komplementbildung 1036, 1061
 komplexe Bildvariable 64
 Komposition 1062
 Konklusion 1033, 1066, 1104
 Kontrast-Intensivierung 1035
 konvex 1028
 Konzentration 1035
 Kraftregelung 1341
 Kreisfrequenz-Dekade 149
 Kreisstruktur 36, 1243
 Kreisverstärkung 302
 Kriechfall 58, 129
 Kriterium von POPOW 984
 kritischer Punkt 246

L

Lag-Element 168, 309
 Lageregelung 811, 819, 835, 843
 –, digitale 836
 –, einschleifige 819, 821
 –, Kaskadenstruktur 823
 Lambda-Operator 1052
 –, kompensatorischer 1052
 laplace 1209
 LAPLACE-Rücktransformation 66
 LAPLACE-Transformation 63
 –, diskrete 596
 –, Rechenregeln 84
 LAPLACE-Transformierte 65
 LAPLACE-Variable 64
 Lastkraft 814
 Lastmoment 814
 Laststörgröße 38, 219
 Laststörungsfrequenzgangfunktion 221, 230
 Laststörungsübertragungsfunktion 220, 230
 LATHROP 461
 Laufzeit 138, 380
 Lead-Element 168, 304
 legend 1169
 Leistungssteuerung 564
 Leistungsverstärker 564
 length 1167
 Level-2 MATLAB S-Function 1465
 Linear System Analyzer 1263
 Lineare Regelfläche 459
 lineare Zustandsgleichung 731
 Linearisierung 46, 48
 –, harmonische 893
 –, im Arbeitspunkt 892
 – mit Rückführung 890

Linearisierung mit inversen Kennlinien 888
 Linearisierungsverfahren 888
 Linearität 46, 67, 605
 Linearitätsprinzip 874
 linguistisch 1033
 –, Operator 1035
 –, Variable 1033
 –, Wert 1033
 –, Wertname 1034
 Linke-Hand-Regel 246
 Links-Max-Methode 1087
 Linksverschiebung 609
 linmod 1290, 1339
 linspace 1143, 1158, 1167
 LJAPUNOW, direkte Methode von 980
 –, zweite Methode von 980
 LJAPUNOW-Funktion 982
 LJAPUNOW-stabil 973
 load 1141, 1166
 log 1151, 1168
 log10 1140, 1168
 log2 1168
 logarithmisches Verstärkungsmaß 292
 Logical Operator 1397
 Logik, BOOLEsche 1066
 –, scharfe 1023, 1066
 –, unscharfe 1023
 Logikfunktion 1024
 loglog 1156, 1169
 logspace 1143, 1167
 lokal asymptotisch stabil 973
 Lookup Table (1-D) 1399
 Lookup Table (2-D) 1399
 Lookup Table Dynamic 1400
 Lookup Table (n-D) 1400
 Lose 906
 Lösung, partikuläre 54
 Lösung der homogenen Differenzialgleichung 53
 lsim 1188, 1191, 1225, 1242, 1262
 LTI-Modell 1179
 LTI-Objekt 1171

M

MAMDANI-Implikation 1067
 MA-Modell 434
 Manual Switch 1447
 Manual Variant Sink 1447
 Manual Variant Source 1447
 MA-Prozess 434
 margin 1205, 1213
 Massekraft 814
 Math Function 1407

MATLAB 1137
 MATLAB Function 1465
 MATLAB System 1466
 matlab.mat 1141
 Matrix Concatenate 1407, 1448
 Matrix-e-Funktion 737
 max 1167 f., 1227, 1408 f.
 MAX-AVERAGE-Produkt 1064
 Maximalwert der Regelgröße 995
 Maximum 1048
 Maximum-Mittelwert-Methode 1087
 Maximum-Mittelwert-Operator 1054
 MAX-MIN-Inferenz 1082, 1088, 1092
 MAX-MIN-Komposition 1062, 1067
 MAX-MIN-Produkt 1062
 MAX-MIN-Verfahren 1084
 MAX-Operation 1045, 1063 f.
 MAX-Operator 1042, 1078, 1082
 MAX-PROD-Inferenz 1082, 1088, 1092
 MAX-PROD-Komposition 1063
 MAX-PROD-Produkt 1064
 MAX-PROD-Verfahren 1085
 mean 1167 f.
 median 1167
 mehrdeutige Funktion 886
 Mehrpunkt-Element 921, 933
 Memory 1388
 Menge, scharfe 1023
 –, unscharfe 1023
 Merge 1448
 mesh 1158, 1170
 meshc 1170
 meshgrid 1159, 1170
 meshz 1170
 Messmatrix 444
 Messort 25
 Methode der Beschreibungsfunktion 893
 Methode der kleinsten Quadrate von GAUSS 449
 Methode der maximalen Höhe 1087
 Methode der Phasenebene 966
 Methode von LJAPUNOW, direkte 980
 –, zweite 980
 Methode von SCHWARZE 395
 m-File 1147
 min 1167 f., 1408 f.
 minimalphasig 148
 Minimalwert der Regelgröße 995
 Minimum-Mittelwert-Operator 1054
 MinMax 1408
 MinMax Running Resettable 1409
 MIN-MAX-Komposition 1065
 MIN-Methode 1081, 1084

MIN-Operation 1045, 1063
 MIN-Operator 1041, 1078
 minreal 1251, 1262
 mittlere Regelabweichung 995
 mod 1168
 mode 1167
 Model 1429
 Model Info 1419
 Model Variants 1429
 Modell, analytisches 357
 –, diskretes 438
 –, experimentelles 357
 –, mathematisches 357
 –, nichtparametrisches 362
 –, parametrisches 357, 362
 Modellbildung 362
 Modellgewinnung 357
 Modellparameter 438
 Modellstruktur 358, 438
 Modifikator 1035
 Momentengleichung 814
 Momentenkonstante 813
 Momentenregelkreis 823
 Momentenregelung 823
 Momentenregler 823
 Monotonie 1045
 MOORE-PENROSE-Inverse 452
 Motormoment 814
 Motorspannung 813
 Multiplikationsstelle 32
 Multiport Switch 1448
 Mux 1449

N

Nachstellzeit 179, 183, 339
 NaN 1168
 NEWTON-Verfahren 397, 1473 f.
 NICHOLS 494, 587
 nichtinvertierende Grundschialtung 350
 nichtinvertierende Schaltung 329
 nichtlineares System 873
 Nichtlinearität, Kompensation 889
 nichtminimalphasig 148
 Nichtphasenminimumsystem 148
 norm 1167
 Norm, Dreiecks- 1044
 –, triangulare 1044
 Normalform 745
 Normalisierung 1029
 Normieren 45
 normierte Änderungsgeschwindigkeit der Regelgröße 583
 normierte Darstellung 45
 Normierung 45, 169
 Null-Element 1045
 Nullmatrix 740, 1498
 Nullphasenwinkel 59
 Nullstellen, Übertragungsfunktion 81
 Nullstellenberechnung 1476
 Nullvektor 1499
 numden 1239
 nyquist 1176, 1200, 1213, 1242
 NYQUIST-Kriterium 113, 245
 –, vereinfachtes 246
 NYQUIST-Verfahren 299

O

obsv 1262
 ODER-Verknüpfung, unscharfe 1042
 ones 1159, 1167
 Operationsverstärker 323
 Operator, dynamischer 876
 –, kompensatorischer 1052
 –, mittelnder 1052
 –, statischer 876
 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 1152, 1169
 Out Bus Element 1431, 1454
 Out1 1432, 1454
 Output 1432, 1454
 OUTPUT-ERROR-Modell 440

P

Parallelstruktur 34, 1243
 Parameter Writer 1449
 Parameterermittlung 358
 Parameteridentifikation 434
 Parameteroptimierung 457
 Parameterschätzung 434
 Parametervektor 451
 Partialbruchzerlegung 78
 Partial-Differenziationssatz 607
 Partial-Integrationssatz 608
 pause 1153, 1166
 PD/PDT₁-Regler 334, 352
 PD-Regler 166
 PDT₁-Element 165

-
- PDT₁-Regler 166
 - P-Element 408
 - Periodendauer 128 f., 372, 584
 - Permute Dimensions 1409
 - Phase 108, 291
 - Phasenhebung 304
 - Phasenbedingung 256
 - Phasenebene 966
 - , Methode der 966
 - Phasengang 114, 292
 - Phasenminimumsystem 148
 - Phasenportrait 966
 - Phasenrand 301
 - Phasenreserve 301, 315, 1205
 - Phasenschnittkreisfrequenz 1205
 - pi 1168
 - PID Controller 1357
 - PID Controller (2DOF) 1359
 - PID-Geschwindigkeitsalgorithmus 561, 1117
 - PID/PIDT₁-Regler 354
 - , additive Form 341
 - , multiplikative Form 342
 - PID-Regelalgorithmus 560
 - , modifiziert 580
 - PID-Regler 182, 1117
 - , additive Form 195
 - , multiplikative Form 195
 - , zwei Freiheitsgrade 202
 - PID-Reglerstrukturen 195
 - PID-Standardregler 1357, 1376
 - PID-Stellungsalgorithmus 560, 1117, 1131
 - PID-Stellungsregler 1117
 - PIDT₁-Regler, additive Form 196
 - , multiplikative Form 196
 - pie 1170
 - PI-Element 430
 - PI-Geschwindigkeitsalgorithmus 1130
 - pinv 456, 1167
 - PI-Regler 178
 - PI-Stellungsalgorithmus 837, 1127
 - PI-Zustandsregelung 797
 - PI-Zustandsregler 787
 - place 1260, 1262
 - plot 1153, 1170
 - plot3 1158, 1170
 - ploty 1170
 - polar 1157, 1170
 - pole 1195, 1214, 1242, 1262
 - Pol-Nullstellenform der Übertragungsfunktion 1172
 - Pol-Nullstellenmodell 1173
 - Pol-Nullstellenplan 80 f.
 - Polstellen, Übertragungsfunktion 81
 - Polvorgabe 780, 845, 856
 - poly 1146, 1167
 - polyder 1167
 - polyfit 1167
 - Polynomform der Übertragungsfunktion 1172
 - Polynomial 1410
 - polyval 1146, 1167
 - POPOW, Kriterium von 984
 - POPOW-Gerade 988
 - POPOW-Ortskurve 988
 - Positionsregelung 811
 - positiv definite Funktion 981
 - Potenz-Element 901
 - Potenzreihenentwicklung 641
 - PPT₁-Element 161, 163
 - Prämisse 1033, 1066, 1104
 - Prämissenauswertung 1080, 1105
 - P-Regelstrecke 121
 - P-Regler 120
 - mit Spannungsvergleichsstelle 351
 - mit Stromvergleichsstelle 351
 - Prelookup 1400
 - pretty 1235
 - Prinzip der gleitenden Mittelwerte 435
 - Probe 1440
 - prod 1167
 - PROD-Methode 1081, 1085
 - PROD-Operation 1064
 - Product 1410
 - Product of Elements 1410
 - Produkt, algebraisches 1048, 1051
 - , drastisches 1048, 1051
 - , EINSTEIN- 1048
 - , HAMACHER- 1048, 1051
 - , HAMACHER-, parametrisiertes 1051
 - , kartesisches 1056
 - 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
PT₁-Element 410
PT₂-Element 127, 418, 420
PT_n-Element 422
PT_i-Element 416
Pulsbreitenmodulation 564
Pulse Generator 1459
Pulsweite 564
Pulsweitenmodulation 561, 564
PWM 566
pzmap 1192, 1214, 1230

Q

Quadrier-Element 903
Quantisierung 549
Quantizer 1371
quasianaloge Regelung 547
quasistetiger Regler 1017
quit 1141, 1166

R

Ramp 1459
Rampenfunktion 1030
rand 1167
randn 1167
Random Number 1459
rank 1167, 1262
Rate Limiter 1371
Rate Limiter Dynamic 1371
Rate Transition 1440
RC-Netzwerk zur Amplitudenabsenkung 309
RC-Netzwerk zur Phasenanhebung 304
real 1140, 1168
Real-Imag to Complex 1410
realmax 1168
realmin 1168
Realteil 108
Rechenregeln, LAPLACE-Transformation 84
–, z-Transformation 612
Rechteckfunktion 1030
Rechtecknäherung 550
Rechts-Max-Methode 1087
Rechtsverschiebung 608
Reciprocal Sqrt 1411, 1413
Regel, unscharfe 1059
Regelabweichung, mittlere 995
Regelaktivierung 1081, 1105
Regelalgorithmus 548
Regelbasis 1076, 1105
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 995
–, Minimalwert der 995
Regelkreis 23
–, aufgeschnittener 219
–, quasikontinuierlicher digitaler 581
Regelkreisgleichung 37, 220
Regelkreisstruktur, Gegenkopplung, indirekte 37
Regelstrecke 24
Regeltabelle 1076
Regelung 23
–, digitale 549
–, quasianaloge 547
Regelungsnormalform 746, 1253, 1485
Regler, auf endliche Einstellzeit 711
–, Integral- 176
–, Proportional-Integral- 178
–, Proportional-Integral-Differenzial- 182
–, quasistetiger 1017
–, schaltender 990
Reglerfrequenzgangfunktion 219
Reglerübertragungsfunktion 219
Reglerverstärkung 120
Reibungsmoment 814
Relation, scharfe 1055 f.
–, unscharfe 1055, 1057 f.
Relational Operator 1398
Relationsmatrix 1056
Relay 1372
rem 1168
Repeating Sequence 1459
Repeating Sequence Interpolated 1460
Repeating Sequence Stair 1460
Reset 1432
Reset Function 1466
Resettable Delay 1373, 1389
Resettable Subsystem 1432
Reshape 1411
residue 1167, 1195, 1214
Residuensatz 66
Residuum 66

Resonanzkreisfrequenz 134, 314
 Resonanzwert 134
 RESWICK 495
 return 1169
 rlocfind 1197f., 1214, 1232
 rlocus 1176, 1197, 1214, 1232
 roots 1146, 1167, 1195
 rotate3d 1164, 1170
 round 1168
 Rounding Function 1411
 ROUTH-Kriterium 240, 689
 ROUTH-Schema 240
 ROUTH-Verfahren 240
 Ruckfehler 233
 Rücktransformation, LAPLACE- 66
 Rückwärtsdifferenz 609, 725
 Rückwärtsdifferenzen, Methode der 719
 Ruhelage 236, 968, 972
 RUNGE-KUTTA-Verfahren 1473, 1481

S

Sättigungselement 879
 Sättigungskennlinie 880
 Sättigungsverhalten 880
 Saturation 1372
 Saturation Dynamic 1372
 Saturn-V-Rakete 1348
 save 1141, 1166
 Scan String 1469
 schaltender Regler 990
 Schaltfunktion 62
 Schleppfehler 830
 Schließen, approximatives 1066
 –, unscharfes 1066
 Schlussfolgerung, unscharfe 1066
 Schlussfolgerungsteil 1066
 Schnittpunkt, der Asymptoten 263
 Schnittwinkel, der WOK-Zweige in Verzweigungs-
 punkten 266
 Schwerpunktmethod 1084, 1089
 –, vereinfachte 1089
 Schwerpunktsummenmethod 1089
 Schwerpunktsummen-Verfahren 1092
 –, Dreiecksfunktionen 1096
 –, Trapezfunktionen 1096
 Schwerpunktverfahren 1089, 1100
 –, für erweiterte Zugehörigkeitsfunktionen 1102
 –, vereinfachtes 1092
 Schwingfall 58
 –, grenzstabiler 129
 –, instabiler 129
 –, stabiler 129
 Scope 1455
 Script-File 1147f.
 sec 1169
 secd 1169
 sech 1169
 Second-Order Integrator 1364
 Second-Order Integrator Limited 1364
 Selector 1450
 semilogx 1156, 1170, 1214
 semilogy 1156, 1170
 Separationstheorem 782
 set 1174, 1179
 S-Function 1467
 S-Function Builder 1467
 sgrid 1170, 1192, 1214
 sign 1151, 1168
 Sign 1411
 Signal, fuzzifiziertes 1074
 –, nichtperiodisches 362
 –, periodisches 362
 Signal Builder 1460
 Signal Conversion 1441
 Signal Generator 1460
 Signal Specification 1441
 Signalfussplan 29
 Signed Sqrt 1412f.
 simple 1212
 simget 1315
 Simulink Function 1467
 sin 1140, 1169
 sind 1169
 Sine 1401
 Sine Wave 1460
 Sine Wave Function 1412
 Singleton 1026, 1069, 1100
 sinh 1169
 Sinusantwort 63
 Sinusfunktion 63
 size 1167
 Slider Gain 1412
 SMITH-Prädiktor 542
 SMITH-Regler 542
 s-Norm 1044
 sort 1167
 Spannungsfolger 350
 Spannungsvergleichsstelle 331
 SPC-Regelung 549
 Speicherung 548
 Spiel 906
 Sprungantwort 62, 116, 363, 1187
 –, normierte 62
 –, Steigung 365

- Sprungantwortfolge 1222
- Sprungantwortfunktion, Anfangswert 365
- Sprungfunktion 62
- sqrt 1140, 1168
- Sqrt 1413
- Squeeze 1413
- ss 1172, 1175, 1179, 1248
- ss2ss 1254, 1262
- ssdata 1179, 1248
- Störgrößenaufschaltung 530
- stabiler Schwingfall 129
- Stabilität 235, 237, 686, 972
 - , absolute 984
 - einer Differenzengleichung 595
 - von Abtastsystemen 595
 - von Grenzwahlungen 962
- Stabilitätsbereich 686
- Stabilitätsgrenze 242, 299, 588, 686
- Stabilitätsgüte 302
- Stabilitätskriterium 239, 688
 - von JURY 695
- Stabilitätstest, JURY- 696
- stairs 1170, 1218, 1242
- standardisierte Parameter 205
- standardisierte Zeitkonstante 211
- Standardregelalgorithmus 567
- State Reader 1451
- State Writer 1452
- State-Space 1365
- stationärer Betriebszustand 236
- stationärer Regelfehler 232
- stationärer Zustand 972
- statischer Operator 876
- statisches Element 873
- std 1167 f.
- Steifigkeitskraft 814
- Stelleinrichtung 25
- Stellgrößenübertragungsfunktion 225
- Stellgröße 24, 219, 225
- Stellgrößenfolge 549
- Stellgrößenfrequenzgangfunktion 226
- Stellgrößenverhalten 219, 225
- Stellort 25
- Stellungsalgorithmus 561
- stem 1170, 1242
- stem3 1170
- step 1176, 1187, 1191, 1224, 1242, 1262
- Step 1460
- Steuerbarkeit 755, 801
 - , Prüfung 759
- Steuerbarkeitsmatrix 756
- Steuerkette 23
- Steuerung 23
 - , Punkt-zu-Punkt- 820
- Steuerungsnormalform 747
- Stop Simulation 1455
- Störgröße, Versorgungs- 38
- Störgröße, Last- 38
- Störgrößenaufschaltung 529 f., 855, 857, 860 f.
- Störgrößenbeobachter 852
- Störort 25
- Störübertragungsverhalten 38
- Störung 25
- Störungsübertragungsverhalten 222, 680
- Störungsverhalten 219
- Streckenfrequenzgangfunktion 219
- Streckenübertragungsfunktion 219
- String Compare 1469
- String Concatenate 1470
- String Constant 1470
- String Length 1470
- String to Enum 1471
- String to Single 1471
- Stromrichter 512
- Stromrichterantrieb 512
- Stromvergleichsstelle 332
- Struktur, Gegenkopplung, direkte 37
 - , Gegenkopplung, indirekte 36
- Strukturermittlung 358
- Strukturoptimierung 457
- stückweise lineare Funktion 886
- Stützmenge 1029
- subnormal 1029
- subplot 1156, 1170
- subs 1212
- Substitutionsverfahren 716, 723
- Substring 1472
- Subsystem 1433
- Subtract 1414
- SUGENO-Regler, nullter Ordnung 1104
- sum 1167
- Sum 1414
- Sum of Elements 1414
- Summation 610
- Summationselement 32
- Summe, algebraische 1048, 1052
 - , begrenzte 1048
 - , drastische 1048, 1052
 - , EINSTEIN- 1048
 - , HAMACHER- 1048
 - , HAMACHER-, parametrisierte 1052
- Summenzeitkonstante 497, 499
- SUM-MIN-Inferenz 1082, 1092
- SUM-MIN-Verfahren 1086

SUM-Operator 1082
 SUM-PROD-Inferenz 1082, 1092
 SUM-PROD-Verfahren 1086
 Superpositionsprinzip 46
 Support 1029
 surf 1158, 1170
 surfc 1170
 switch 1152, 1169
 Switch 1452
 Switch Case 1433
 Switch Case Action Subsystem 1434
 sym2poly 1239
 Symbolic Math Toolbox 1209, 1234
 Symmetrisches Optimum 516
 syms 1209, 1234
 System, bilineares 886
 –, nichtlineares 873
 systemantwortinvariante Transformation 726
 Systemmatrix 732, 735, 1173, 1485

T

Tachokonstante 812
 TAKAHASHI 587
 tan 1169
 tand 1169
 tanh 1169
 Tapped Delay 1390
 TAYLOR-Entwicklung 892
 TAYLOR-Reihe 892
 Technologieschema 26, 29
 Terminate Function 1468
 Terminator 1455
 Testfunktion 61, 362
 text 1156, 1170
 tf 1172f., 1176, 1179
 tfdata 1174, 1179
 Tiefpass 355
 Time-Based Linearization 1419
 title 1170
t-Konorm 1044, 1048
 –, parametrisierbare 1044
 –, parametrisierte 1051
 t_{\max} -Zeit 315
t-Norm 1044, 1048
 –, parametrisierte 1051
 To String 1472
 Toleranz 1029
 Toolbox 1137
 Totzeit 138, 251, 380
 Totzeitelement 251
 Totzeit-Element 138, 416
 Totzone 889

trace 1167
 Träger 1029
 Trajektorie 966
 Transfer Fcn 1365
 Transfer Fcn First Order 1391
 Transfer Fcn Lead or Lag 1391
 Transfer Fcn Real Zero 1392
 Transformation 63
 –, impulsinvariante 727
 –, LAPLACE- 63f.
 –, sprunginvariante 727
 –, systemantwortinvariante 726
 Transformationsmatrix 762
 Transitionsmatrix 739, 744, 1246
 Transitkreisfrequenz 325
 Transponierung 1142
 Transport Delay 1365
 transpose 1167
 Trapezfunktion 1030, 1073
 Trapeznäherung 555, 718
 –, Methode der 720
 Trapezoidal 717, 720, 1376, 1380
 Treppenfunktion 548, 602, 1224
 Trigger 1435
 Trigger-Based Linearization 1419
 Triggered Subsystem 1435
 Trigonometric Function 1414
 T-Summen-Einstellung nach KUHN 497
 T-Summen-Regel 499
 – von KUHN 501
 TUSTIN-Formel 718
 two-degree of freedom 1380
 type 1153, 1166
 tzero 1195, 1214, 1242, 1262

U

Überdeckung, optimale 1075
 Übergangsfunktion 62
 Überlagerungsprinzip 46, 67, 874
 Überlappung, optimale 1112
 Überschwingweite 128, 314f., 373
 Übertragungsblock 29
 Übertragungsfunktion 78, 80, 1172
 –, Frequenzgangmodell 1172
 –, LAPLACE- 78
 –, Nullstellen 81
 –, Pol-Nullstellenform 1172
 –, Polstellen 81
 –, Polynomform 1172
 Übertragungssymbol 212
 Übertragungsverhalten, Führungs- 39
 –, Stör- 38

Umformungsregel 33, 40
 –, Signalflossstrukturen 33
 –, z-Transformation 675
 Umkehrspanne 887
 unbestimmte Koeffizienten 54
 UND-Verknüpfung, unscharfe 1041
 Unit Conversion 1441
 Unit Delay 1393
 Unit System Configuration 1435

V

var 1167
 Variable and Resettable Delay 1373
 Variable Integer Delay 1373, 1393
 Variable Time Delay 1365
 Variable Transport Delay 1365
 Variant Sink 1452
 Variant Subsystem 1436
 Vector Concatenate 1415, 1453
 verallgemeinerter Fehler 442
 Vereinfachungsregel 33
 Vereinigung 1041 f., 1048
 Vergleichsschaltung 329
 Vergrößerung 1035
 Verhalten, differenzierendes 363
 –, integrierendes 363
 –, proportionales 363
 Verkettung 1062
 Verkleinerung 1035
 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, 874
 Verzögerungselement 379
 Verzögerungszeit 581
 Verzögerungszeitkonstante 123, 334
 Verzugszeit 381, 384, 581
 Verzweigungselement 31
 view 1162, 1170
 Vorfilter 523, 774, 795, 847
 Vorhaltzeit 183
 Vorhaltzeitkonstante 166, 334
 Vorspannung 889
 Vorwärtsdifferenz 610, 724
 Vorwärtsdifferenzen, Methode der 719
 vpa 1240

W

Wahrheitsfunktion 1024
 Wahrheitsgrad 1024
 Waveform Generator 1461
 Weighted Sample Time 1442
 Weighted Sample Time Math 1415
 Wendepunkt 381
 Wendetangentenverfahren 381, 384, 391
 Wendezeit 315
 WENN-DANN-Regel 1066, 1075
 WENN-Teil 1066, 1104
 Wertefolge 603
 what 1153, 1166
 while 1150, 1169
 While Iterator 1437
 While Iterator Subsystem 1437
 while-Schleife 1150
 whitebg 1170
 who 1141, 1166
 whos 1141, 1166
 Width 1442
 Winkelgeschwindigkeit 814
 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 1372
 Wurzel-Element 901
 Wurzelortskurve 253, 1197
 Wurzelschwerpunkt 263

X

xlabel 1170
 XY Graph 1455

Y

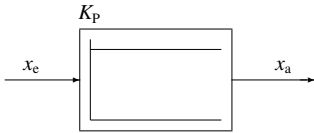
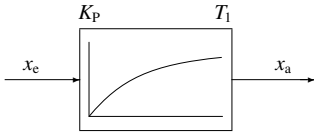
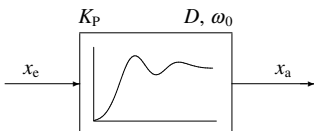
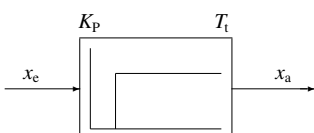
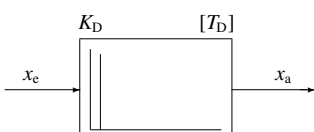
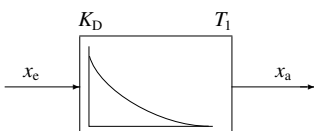
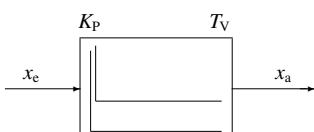
ylabel 1170

Z

Zahl, unscharfe 1029
 Zeitbereich 64
 Zeitkonstante 123, 209
 –, Ersatz- 817
 –, mechanische 816
 Zeitprozentkennwertmethode 395
 Zeitprozentwert 395
 Zeitvariable, diskrete 548
 Zero Order Hold 1393
 Zero-Pole 1368

- zeros 1153, 1167
- zgrid 1170, 1230, 1242
- ZIEGLER 494, 587
- zlabel 1170
- zpk 1172, 1174, 1179
- zpkdata 1179, 1248
- z-Rücktransformation 1234
- ztrans 1234
- z-Transformation 589, 596, 603, 1234
 - , inverse 638 f.
- z-Transformierte 603
- z-Übertragungsfunktion 600, 644
- Zugehörigkeitsaussage 1024
- Zugehörigkeitsfunktion 1023, 1028
 - , binäre 1024
 - , dreieckförmige 1038
 - , quadratische 1038
 - , rechteckförmige 1099
- Zugehörigkeitsgrad 1023 f.
- Zustandsbeobachter 776, 779, 852
- Zustandsbeschreibung 729
- Zustandsdarstellung 736
- Zustandsdifferenzialgleichung 730, 732
- Zustandsebene 966
- Zustandsgleichung 1245
- Zustandskurve 966
- Zustandsmodell 1172 f.
- Zustandsregelung 766, 1256
- Zustandsregler 798, 843
- Zustandsrückführung 766, 855
- Zustandsvariable 730, 736, 1482
- Zustandsvektor 731, 1173
- Zweiortskurvenverfahren 954
- Zweipunkt-Element 898, 904, 921, 924
 - mit Hysterese 911, 927
- Zweipunktregelkreis 992
- Zweipunktregler 992
 - mit nachgebender Rückführung 1017
 - mit verzögert-nachgebender Rückführung 1017

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	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_P \cdot \left[\frac{T_V + T_N}{T_N} \cdot x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt + T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	