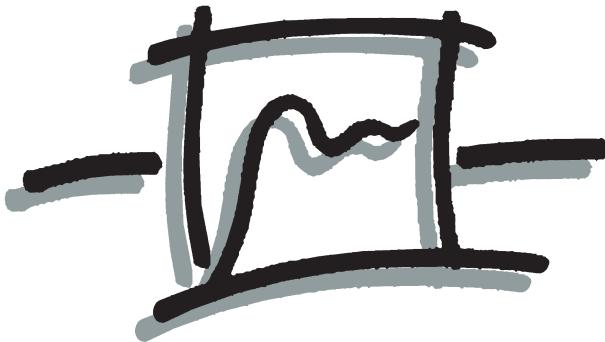


Lutz
Wendt



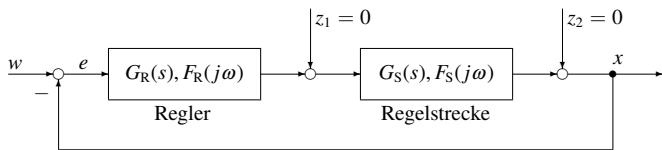
TASCHENBUCH DER REGELUNGSTECHNIK

mit MATLAB und Simulink

Edition
Harri
Deutsch



Gleichungen für das Führungsübertragungsverhalten



Gleichungen für die Berechnung mit Übertragungsfunktionen

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

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

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

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

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

Gleichungen für die Berechnung mit Frequenzgangfunktionen

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

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

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

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

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

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

1	Einführung in die Regelungstechnik.....	23	⇒
2	Darstellung von regelungstechnischen Strukturen.....	29	⇒
3	Berechnungsmethoden für Regelkreise	45	⇒
4	Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken	117	⇒
5	Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen.....	219	⇒
6	Stabilität von Regelkreisen	235	⇒
7	BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen	291	⇒
8	Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern.....	323	⇒
9	Mathematische Modelle für die Regelungstechnik	357	⇒
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise.....	457	⇒
11	Digitale Regelungssysteme	547	⇒
12	Zustandsregelungen.....	729	⇒
13	Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik	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 graduierter Ingenieur Studium der Elektrotechnik und Regelungstechnik an der TU Berlin zum Dipl.-Ing., Berufstätigkeit, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin im Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Promotion über die Steuerung und Regelung der Bewegungssachsen 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.



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 Olivotto 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 Programm Paket 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 Programm Pakets 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
Düsselberger 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/tem/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 Signalflusspläne	29
2.2	Elemente des Wirkungs- oder Signalflussplans	29
2.2.1	Übertragungsblock und Wirkungslinie	29
2.2.2	Verknüpfungselemente	31
2.3	Einfache Signalflussstrukturen und Vereinfachungsregeln	33
2.3.1	Anwendung der Wirkungs- oder Signalflusspläne	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 Signalflussplänen	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	Differenzierungs- und Integrationsatz	70
3.5.4.6	Faltungssatz	72
3.5.4.7	Grenzwertsätze	72
3.5.4.8	LAPLACE-Transformation von periodischen Funktionen	74
3.5.4.9	Lösung von linearen Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten mithilfe der LAPLACE-Transformation	75
3.5.5	Übertragungsfunktionen von Übertragungselementen	77
3.5.6	Partialbruchzerlegung	78
3.5.6.1	Allgemeines	78
3.5.6.2	Einfache reelle Polstellen	78
3.5.6.3	Mehrreelle 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 _i -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 _t -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 _T -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	Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern	323
8.1	Prinzipieller Aufbau	323
8.1.1	Aufgaben von Regeleinrichtungen	323
8.1.2	Kenngrößen von Operationsverstärkern	323
8.1.2.1	Stationäre Kenngrößen	323
8.1.2.2	Dynamische Kenngrößen	324
8.1.2.3	Zusammenfassung	327
8.2	Grundschaltungen 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 Überschwingen und ohne periodisches Schwingen	368
9.3.2.5	Sprungantwortverlauf mit Über- und Unterschwingen ohne periodisches Schwingen	369
9.3.2.6	Sprungantwortverläufe mit periodischem Schwingen	371
9.3.2.6.1	Identifikationsmerkmale von PT 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 Überschwingen	381
9.3.3.1	Prinzip des Wendetangentenverfahrens	381
9.3.3.2	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten	383
9.3.3.3	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit gleichen Zeitkonstanten	387
9.3.3.4	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit mehreren Zeitkonstanten	390
9.3.3.5	Zusammenfassung des Wendetangentenverfahrens	394
9.3.3.6	Zeitprozentkennwertmethode	395
9.3.4	Sprungantwortverläufe von Integral-Elementen	400
9.3.4.1	Eigenschaften von Integral-Elementen	400
9.3.4.2	Identifikation von reinen Integral-Elementen	400
9.3.4.3	Identifikation von Integral-Elementen mit Verzögerung	402
9.3.4.4	Identifikation von Integral-Elementen mit Totzeit	405
9.4	Sprungantworten und Identifizierungsgleichungen	407
9.4.1	Einleitung	407
9.4.2	Zusammenstellung von Sprungantwortfunktionen und mathematischen Modellen von Übertragungselementen	407
9.4.3	Zusammenfassung	433

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

10.5.3	Anwendung des Verfahrens bei integralen Regelstrecken mit Verzögerung höherer Ordnung	524
10.5.4	Anwendung des Verfahrens bei proportionalen Regelstrecken mit Verzögerungen höherer Ordnung	525
10.5.4.1	PT_n -Regelstrecken mit einer großen Zeitkonstanten	525
10.5.4.2	PT_n -Regelstrecken mit zwei großen Zeitkonstanten	525
10.5.5	Einstellregeln für das Symmetrische Optimum	526
10.5.6	Zusammenfassung zur Optimierung im Frequenzbereich	528
10.6	Erweiterte Regelkreisstrukturen	529
10.6.1	Einleitung	529
10.6.2	Regelungen mit Störgrößenaufschaltung	529
10.6.2.1	Anwendungsbeispiele	529
10.6.2.2	Störgrößenaufschaltung auf den Regelstreckeneingang	530
10.6.2.3	Störgrößenaufschaltung auf den Reglereingang	535
10.6.3	Regelstrecken mit Totzeit (SMITH-Regler, SMITH-Prädiktor)	541
11	Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)	547
11.1	Prinzipielle Arbeitsweise von digitalen Regelkreisen	547
11.1.1	Einleitung	547
11.1.2	Kontinuierliche und diskrete Signale in digitalen Regelungssystemen	547
11.1.3	Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	548
11.2	Basialgorithmen für digitale Regelungen	549
11.2.1	Einleitung	549
11.2.2	Proportionalalgorithmus	550
11.2.3	Approximation von Integration und Differenziation durch diskrete Operationen	550
11.2.3.1	Integralalgorithmen mit Rechtecknäherung	550
11.2.3.2	Integralalgorithmus mit Trapeznäherung	555
11.2.3.3	Einfache Differenzialalgorithmen	556
11.2.3.4	Differenzialalgorithmen mit Verzögerung I. Ordnung (Filterung)	558
11.2.3.5	Differenzialalgorithmen mit Mittelwertbildung	559
11.2.4	Regelalgorithmen für Standardregler	560
11.2.4.1	PID-Stellungsalgorithmus	560
11.2.4.2	PID-Geschwindigkeitsalgorithmus, Regler mit Pulsweitenmodulation	561
11.2.4.3	Differenzengleichungen von Basis- und Standardregelalgorithmen	567
11.2.4.4	PID-Regelalgorithmus mit modifiziertem Differenzial-Anteil	580
11.3	Einstellregeln für digitale Regelkreise	581
11.3.1	Quasikontinuierliche digitale Regelkreise	581
11.3.2	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen der Regelstrecke	581
11.3.3	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen des Regelkreises	583
11.3.4	Einstellregeln mit Berücksichtigung der Abtastzeit	587
11.4	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Zeitbereich	589
11.4.1	Allgemeines	589
11.4.2	Differenzengleichungen	589
11.4.3	Lösung von Differenzengleichungen	590
11.4.3.1	Ermittlung der Lösung durch Rekursion	590
11.4.3.2	Lösung mit homogenem und partikulärem Ansatz	592
11.4.4	Stabilität von Abtastsystemen im Zeitbereich	595
11.5	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Frequenzbereich	596
11.5.1	Technische und mathematische Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	596
11.5.1.1	Allgemeines	596

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

11.8	Diskretisierung von kontinuierlichen Übertragungsfunktionen	715
11.8.1	Anwendung von Diskretisierungsverfahren	715
11.8.2	Substitutionsverfahren	716
11.8.3	Stabilität der Verfahren	723
11.8.4	Systemantwortinvariante Transformationen	726
11.8.4.1	Invariante Systemreaktionen im Zeitbereich	726
11.8.4.2	Impulsinvariante Transformation	727
11.8.4.3	Sprunginvariante Transformation	727
12	Zustandsregelungen	729
12.1	Allgemeines	729
12.2	Mathematische Methoden zur Berechnung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	730
12.2.1	Beschreibung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	730
12.2.1.1	Allgemeine Form des Gleichungssystems	730
12.2.1.2	Beschreibung linearer Mehrgrößensysteme mit Zustandsvariablen	731
12.2.1.3	Beschreibung linearer Eingrößensysteme mit Zustandsvariablen	735
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich	737
12.2.2.1	Berechnung der Matrix-e-Funktion	737
12.2.2.2	Differenzierung 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 unterlagerter Momentenregelung	824
13.5.2.2.1	Berechnung des Drehzahlreglers	824
13.5.2.2.2	Führungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagerter Momentenregelung	825
13.5.2.3	Lageregelung mit unterlagerter Drehzahl- und Momentenregelung	827
13.5.2.3.1	Berechnung des Lagereglers	827
13.5.2.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter 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 unterlagerter Momentenregelung	832
13.5.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagerter 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 Grenzschwingungen	962
14.4	Untersuchung der Stabilität nichtlinearer Systeme	966
14.4.1	Methode der Phasenebene (Zustandsebene)	966
14.4.2	Eigenschaften von Zustandskurven in der Phasenebene	967
14.4.3	Berechnung von linearen Systemen II. Ordnung im Zeitbereich und in der Phasenebene	968
14.4.4	Ruhelagen von linearen und nichtlinearen Systemen	972
14.4.5	Stabilität von Ruhelagen	972
14.4.6	Berechnung der Stabilität von Ruhelagen	976
14.4.7	Stabilitätsuntersuchung mit der direkten Methode von LJAPUNOW	980
14.4.7.1	Grundgedanke der direkten Methode	980
14.4.7.2	Stabilitätsuntersuchung mit der LJAPUNOW-Funktion	982
14.4.8	Stabilitätskriterium von POPOW	984
14.4.8.1	Absolute Stabilität	984
14.4.8.2	Numerische Form des POPOW-Kriteriums	985
14.4.8.3	Ortskurvenform des POPOW-Kriteriums	988
14.5	Regelkreise mit schaltenden Reglern	990
14.5.1	Anwendung von schaltenden Reglern	990
14.5.2	Regelkreise mit Zweipunktreglern	992
14.5.2.1	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und proportionalen Regelstrecken	992
14.5.2.2	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken mit Totzeit	996
14.5.2.3	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken ohne Totzeit	1004
14.5.2.4	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und Regelstrecken mit Integral-Anteil	1005
14.5.3	Berechnung von Regelkreisen mit Dreipunktreglern	1010
14.5.4	Schaltende Regler mit Rückführung	1013
14.5.4.1	Eigenschaften von quasistetigen Reglern	1013
14.5.4.2	Einfluss der Rückführung bei schaltenden Reglern	1014
14.5.4.3	Quasistetige Standardregler (Regler mit Rückführung)	1017
15	Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	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	Anwendungsbereiche 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 Regelungnormalform	1253
16.8.6.2	Transformation auf Beobachtungnormalform	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 Linearchaese	1291
17.3.6	Streckensteuerung für eine Linearchaese 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, Datensenken, 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 .

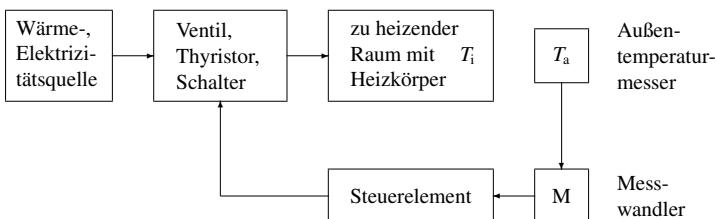


Bild 1.1-1: Technologieschema einer Temperatursteuerung

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.

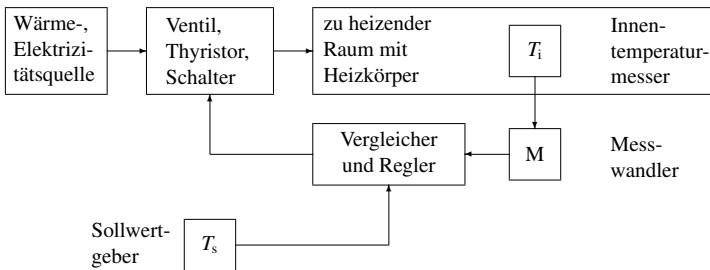


Bild 1.1-2: Technologieschema einer Temperaturregelung

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 angreifen.	Reagiert nur auf Störungen, die gemessen und in der Steuerung verarbeitet werden.
Reaktion auf Störungen (zeitlich):	Reagiert erst dann, wenn die Differenz von Soll- und Istwert sich ändert.	Reagiert schnell, da die Störung direkt gemessen wird.
Technischer Aufwand:	Geringer Aufwand: Messung der zu regelnden Größe, Soll-Istwert-Vergleich, Leistungsverstärkung.	Hoher Aufwand, wenn viele Störungen berücksichtigt werden müssen, geringer Aufwand, wenn keine Störungen auftreten.
Verhalten bei instabilen Systemen:	Bei instabilen Systemen müssen Regelungen eingesetzt werden.	Steuerungen sind bei instabilen Systemen unbrauchbar.

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

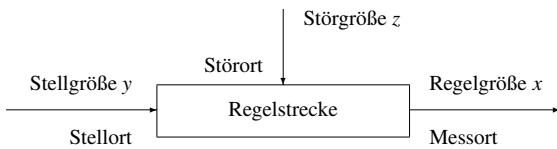


Bild 1.2-1: Regelstrecke mit Ein- und AusgangsgröÙen

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, Vergleicher, 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.

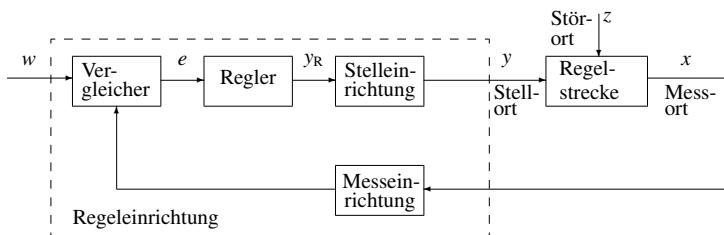


Bild 1.2-2: Regelungstechnische Elemente und Begriffe

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 Vergleicher 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.

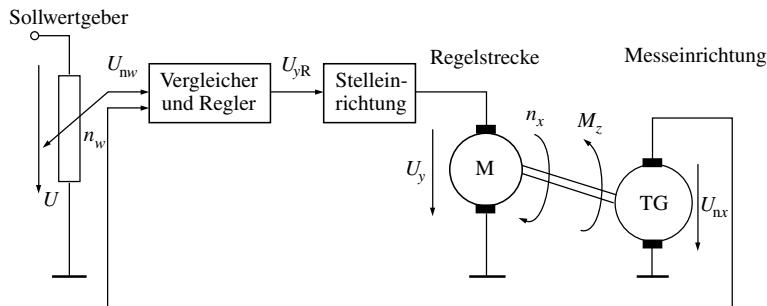


Bild 1.2-3: Technologieschema einer Drehzahlregelung

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 (Solldrehzahl) n_w . Der Vergleicher 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 $U_{nw} \rightarrow$ 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:

$$\begin{aligned} x_a(z) \cdot [a_3 \cdot z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0] &= x_e(z) \cdot [b_2 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_0], \\ G(z) = \frac{x_a(z)}{x_e(z)} &= \frac{Z(z)}{N(z)} = \frac{b_2 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_0}{a_3 \cdot z^3 + a_2 \cdot z^2 + a_1 \cdot z + a_0}. \end{aligned}$$

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)	$s \rightarrow \frac{1-z^{-1}}{T} = \frac{z-1}{T \cdot z}$,	$G(z) = G(s) _{s \rightarrow \frac{z-1}{T \cdot z}}$
Trapeznaheung (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:

Rechtecknaheung mit der linken Intervallgrenze (Integration Forward Euler)	$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T}{z-1}$,
Rechtecknaheung mit der rechten Intervallgrenze (Integration Backward Euler)	$\frac{1}{s} \rightarrow \frac{T \cdot z}{z-1}$,
Trapeznaheung (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:

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

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 Vorhaltezeitkonstanten T_{Vm} des PIDT₁-Reglers werden die Verzögerungszeitkonstanten T_{S1} , T_{S2} der Regelstrecke $G_S(s)$ kompensiert. Die Überschwingweite \bar{u} bei Sprungaufschaltung soll $\bar{u} \leq 5\%$ 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 $K_S = 5, T_{S1} = 20 \text{ s}, T_{S2} = 4 \text{ s}$,

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

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

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

kompenziert:

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

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

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

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: $T = 0.01 \cdot T_1 = 0.01 \text{ s}$. Mit den Werten $K_{Rm} = 2.0997, T_{Nm} = 20 \text{ s}, T_{Vm} = 4 \text{ s}, T_1 = 1 \text{ s}, T = 0.01 \text{ s}$ 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:

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

(2) Geschlossene Darstellung nach Tabelle 11.5-10:

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

$$\underbrace{\frac{z^2 - \frac{2 \cdot T_1 - T}{T_1} \cdot z + \frac{T_1 - T}{T_1}}{-a_1 \quad -a_2}}_{G_R(z)} \cdot e(z)$$

$$= G_R(z) \cdot e(z) = \frac{b_0 \cdot z^2 + b_1 \cdot z + b_2}{z^2 - a_1 \cdot z - a_2} \cdot e(z).$$

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.

$$G_R(z) = \frac{y(z)}{e(z)}$$

$$= K_{Rm} \cdot \underbrace{\frac{T_{Nm} + T_{Vm} - T_1}{T_{Nm}}}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Rm} \cdot \frac{T}{z-1}}{T_{Nm}}}_{\text{I-Anteil}}$$

$$+ \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T_1) \cdot (T_{Vm} - T_1)}{T_{Nm}} \cdot \frac{z-1}{T_1 \cdot z - (T_1 - T)}}_{\text{DT1-Anteil}}$$

$$= \underbrace{K_{Ra}}_{\text{P-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Ra} \cdot \frac{T}{z-1}}{T_{Na}}}_{\text{I-Anteil}} + \underbrace{K_{Ra} \cdot T_{Va} \cdot \frac{z-1}{T_1 \cdot z - (T_1 - T)}}_{\text{DT1-Anteil}}$$

$$= \underbrace{2.415}_{P=K_p=K_{Ra}} + \underbrace{0.105}_{I=K_I=K_{Ra}/T_{Na}} \cdot \frac{T}{z-1} + \underbrace{5.984}_{D=K_D=K_{Ra} \cdot T_{Va}} \cdot \frac{z-1}{T_1 \cdot z - (T_1 - T)}.$$

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

$$G_R(z) = P + I \cdot T \cdot \frac{1}{z-1} + D \cdot \frac{N}{1 + N \cdot T \cdot \frac{1}{z-1}}$$

$$= P + I \cdot \frac{T}{z-1} + D \cdot \frac{z-1}{(1/N) \cdot z - (1/N - T)}$$

$$= \underbrace{K_{Ra}}_P + \underbrace{\frac{K_{Ra}}{T_{Na}} \cdot \frac{T}{z-1}}_I + \underbrace{\frac{K_{Ra} \cdot T_{Va}}{D} \cdot \frac{z-1}{\underbrace{T_1 \cdot z - \left(\frac{T_1}{1/N} - T\right)}_{1/N}}}_D,$$

$$P = K_p = K_{Ra} = 2.415, \quad I = K_I = \frac{K_{Ra}}{T_{Na}} = \frac{K_{Rm}}{T_{Nm}} = 0.105 \text{ s}^{-1}, \quad D = K_D = K_{Ra} \cdot T_{Va} = 5.984 \text{ s},$$

$$N = 1/T_1 = 1 \text{ s}^{-1}, \quad T = 0.01 \text{ s}.$$

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

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

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 yI1k yDT1k
%PIDT1-Regelalgorithmus (Positions-Regler, Stellungs-Regler)
%Initialisierung: yI1k, yDT1k, ek_1 für den ersten Aufruf
if isempty(ek_1) ek_1 = 0.0; end
if isempty(yI1k) yI1k = 0.0; end
if isempty(yDT1k) yDT1k = 0.0; end
yPk = KRa*ek; %P-Anteil
%I-Anteil: yI1k = yI1k_1 + KRa*...
yI1k = yI1k + KRa*(T/TNa)*ek_1;
%DT1-Anteil: yDT1k = ((T1-T)/T1)*yDT1k_1 + KRa*(ek-ek_1);
yDT1k = ((T1-T)/T1)*yDT1k + KRa*(TVa/T1)*(ek-ek_1);
yk = yPk + yI1k + yDT1k; %Stellgröße yk;
ek_1 = ek; %rekursiven Wert übernehmen
```

Durch die Deklaration `persistent` werden `ek_1`, `yI1k`, `yDT1k` zu statischen Variablen, die gespeicherten Werte stehen bei erneutem Aufruf des MATLAB Function-Blocks wieder zur Verfügung.

(6) Der zeitkontinuierliche PIDT₁-Regler, multiplikative Form, wird in der ausmultiplizierten Form simuliert (Bild 11.5-16, (6)):

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

In Bild 11.5-16 sind die digitalen Regler mit dem Abtastzeitintervall $T = 0.01$ s simuliert, die vorgegebene Überschwingweite $\bar{u} \leq 5\%$ 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 $\bar{u} = 5.178\%$, 5.018% , 5.002% .

Bei der Anwendung des PIDT₁-Geschwindigkeitsalgorithmus wird das Integral-Element (inkrementaler Stellmotor, z. B. Schrittmotor) der Regelstrecke zugeordnet. Der PIDT₁-Geschwindigkeitsalgorithmus kann mit folgenden Realisierungsmöglichkeiten (Bild 11.5-17) implementiert werden:

(1) Differenzengleichung nach Tabelle 11.2-3:

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

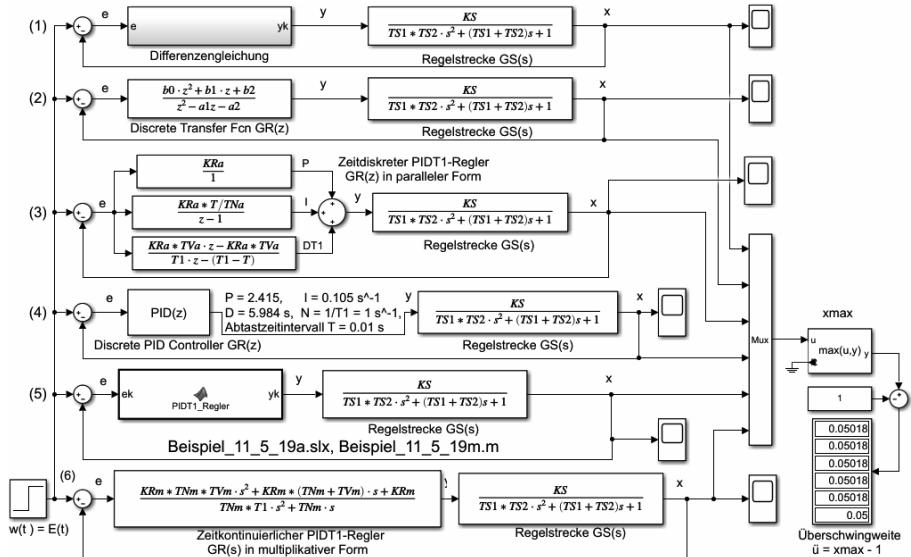
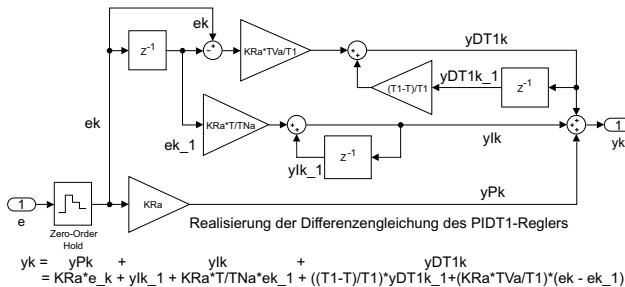


Bild 11.5-16: Realisierung von zeitdiskreten PIDT₁-Reglern (Abtastzeitintervall $T = 0.01 \text{ s}$)

(2) Geschlossene Darstellung nach Tabelle 11.5-10:

$$\Delta y(z) = \frac{K_{\text{Rn}} \cdot \frac{T_{\text{Vm}}}{T_1} \cdot z^2 - K_{\text{Rm}} \cdot \underbrace{\frac{2 \cdot T_{\text{Nm}} \cdot T_{\text{Vm}} - T \cdot (T_{\text{Nm}} + T_{\text{Vm}})}{T_{\text{Nm}} \cdot T_1}}_{b_1} \cdot z + K_{\text{Rm}} \cdot \underbrace{\frac{(T_{\text{Nm}} - T) \cdot (T_{\text{Vm}} - T)}{T_{\text{Nm}} \cdot T_1}}_{b_2}}{z^2 - \underbrace{\frac{T_1 - T}{T_1}}_{-a_1} \cdot z} \cdot e(z)$$

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

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 DT_1 -Komponenten ist einfacher zu implementieren (Bild 11.5-17, (3)). Für den zeitdiskreten PID T_1 -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.

$$\begin{aligned}
 G_{\Delta R}(z) &= \frac{\Delta y(z)}{e(z)} \\
 &= \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{T_{Nm} + T_{Vm} - T_1}{T_{Nm}} \cdot \frac{z-1}{z}}_{\Delta P\text{-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Rm}}{T_{Nm}} \cdot \frac{T}{z}}_{\Delta I\text{-Anteil}} \\
 &\quad + \underbrace{K_{Rm} \cdot \frac{(T_{Nm} - T_1) \cdot (T_{Vm} - T_1)}{T_{Nm}} \cdot \frac{(z-1)^2}{T_1 \cdot z^2 - (T_1 - T) \cdot z}}_{\Delta DT_1\text{-Anteil}} \\
 &= \underbrace{K_{Ra} \cdot \frac{z-1}{z}}_{\Delta P\text{-Anteil}} + \underbrace{\frac{K_{Ra}}{T_{Na}} \cdot \frac{T}{z}}_{\Delta I\text{-Anteil}} + \underbrace{K_{Ra} \cdot T_{Va} \cdot \frac{(z-1)^2}{T_1 \cdot z^2 - (T_1 - T) \cdot z}}_{\Delta DT_1\text{-Anteil}} \\
 &= \underbrace{2.415 \cdot \frac{z-1}{z}}_{K_P = K_{Ra}} + \underbrace{0.105 \cdot \frac{T}{z}}_{K_I = K_{Ra} \cdot T_{Na}} + \underbrace{5.984 \cdot \frac{(z-1)^2}{T_1 \cdot z^2 - (T_1 - T) \cdot z}}_{K_D = K_{Ra} \cdot T_{Va}}.
 \end{aligned}$$

(4) Der PID T_1 -Geschwindigkeitsalgorithmus lässt sich in Simulink auch als MATLAB Function realisieren. Die zeitdiskrete Gleichung in Komponentenform ist in Tabelle 11.2-3 angegeben:

$$\begin{aligned}
 \Delta y_{DT1_1,k} &= \frac{T_1 - T}{T_1} \cdot \Delta y_{DT1_1,k-1} + K_{Rm} \cdot \underbrace{\frac{(T_{Nm} - T_1) \cdot (T_{Vm} - T_1)}{T_{Nm} \cdot T_1} \cdot (e_k - 2 \cdot e_{k-1} + e_{k-2})}_{K_{Ra} \cdot T_{Va} / T_1}, \\
 \Delta y_k &= K_{Rm} \cdot \underbrace{\frac{T_{Nm} + T_{Vm} - T_1}{T_{Nm}} \cdot (e_k - e_{k-1})}_{K_{Ra}} + \underbrace{\frac{K_{Rm}}{T_{Nm}} \cdot T \cdot e_{k-1} + \Delta y_{DT1_1,k}}_{K_{Ra} \cdot T_{Na}}
 \end{aligned}$$

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)

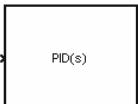
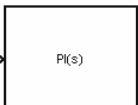
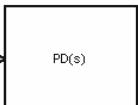
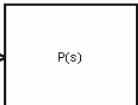
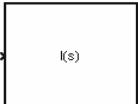
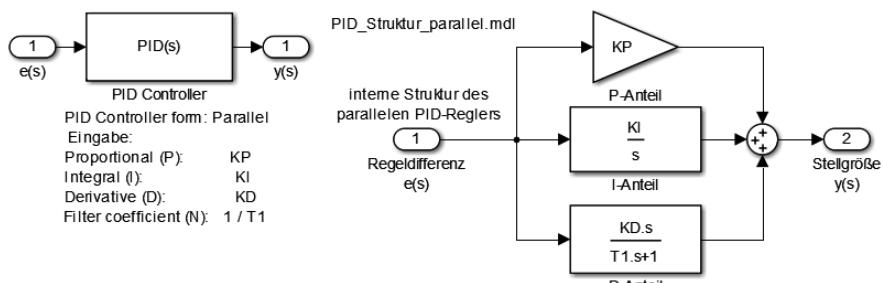
Blocksymbole	Beschreibung
	PID Controller, zeitkontinuierlicher PID-Standardregler in additiver Form (Abschnitt 4.5.3.5), der Block kann auch als PI-, PD-, P- oder I-Regler implementiert werden. Blockparameter: Reglerart: PID-Regler, (PI-, PD-, P- oder I-Regler), Reglerform: parallel oder ideal (standardisiert), Reglerparameter: Proportional-, Integrier-, 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>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>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>	

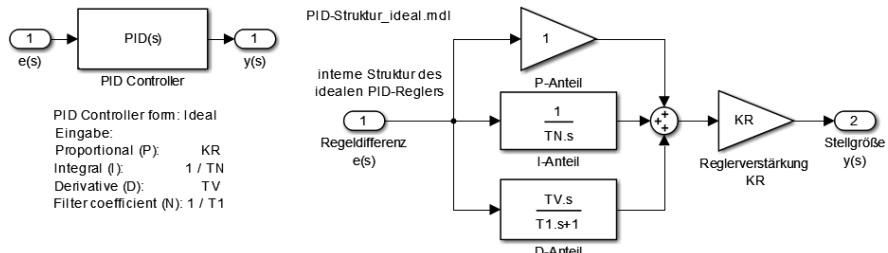
Tabelle 17.7-2: Continuous Block Library,
Modellblöcke für zeitkontinuierliche lineare Systeme (Fortsetzung)

Beschreibung

Die Reglerübertragungsfunktion in der idealen Form ist

$$\begin{aligned}
 G_R(s) &= \frac{y(s)}{e(s)} = P \cdot \left(1 + \frac{I}{s} + D \cdot \frac{N \cdot s}{s + N} \right) = K_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + \frac{T_V \cdot s}{T_1 \cdot s + 1} \right) \\
 &= \frac{K_R \cdot T_N \cdot (T_1 + T_V) \cdot s^2 + K_R \cdot (T_N + T_1) \cdot s + K_R}{T_N \cdot T_1 \cdot s^2 + T_N \cdot s} \\
 &= 2 \cdot \left(1 + \frac{1}{8 \cdot s} + \frac{0.25 \cdot s}{0.125 \cdot s + 1} \right) = \frac{6 \cdot s^2 + 16.25 \cdot s + 2}{s^2 + 8 \cdot s}.
 \end{aligned}$$

Reglerstruktur für den idealen PID-Regler:



Mit den berechneten Werten ist das Zeitverhalten der Regler gleich,

$$G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = \underbrace{K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D \cdot s}{T_1 \cdot s + 1}}_{\text{PID-Regler parallel}} = \underbrace{K_R \cdot \left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s} + \frac{T_V \cdot s}{T_1 \cdot s + 1} \right)}_{\text{PID-Regler ideal}},$$

$$K_R = K_P, \quad T_N = \frac{K_P}{K_I}, \quad T_V = \frac{K_D}{K_P}, \quad T_1 = \frac{1}{N},$$

die Sprungantwort ist angegeben.

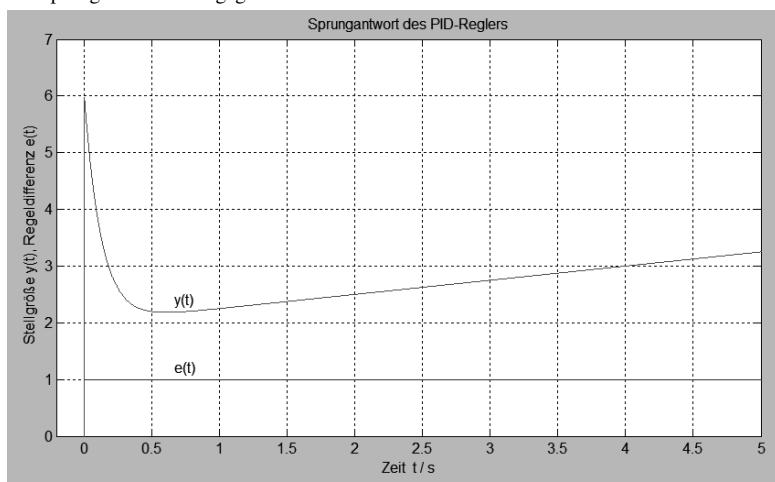


Tabelle 17.7-2: Continuous Block Library,
Modellblöcke für zeitkontinuierliche lineare Systeme (Fortsetzung)

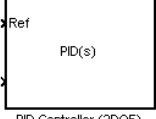
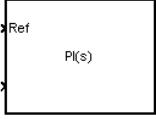
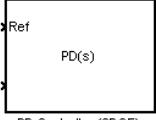
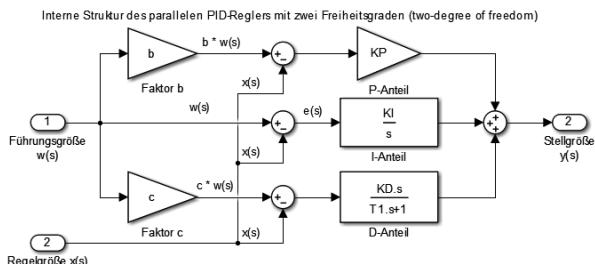
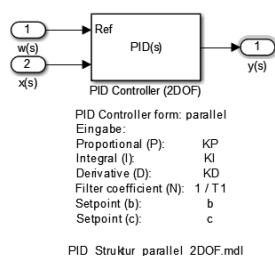
Beschreibung	
Für die weiteren implementierten Regler gelten folgende Zusammenhänge:	
PI-Regler:	
$G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = \underbrace{K_P + \frac{K_I}{s}}_{\text{PI-Regler parallel}} = K_R \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{1}{T_N \cdot s}\right)}_{\text{PI-Regler ideal}}, \quad K_R = K_P, \quad \frac{K_R}{T_N} = K_I.$	
PD-Regler:	
$G_R(s) = \frac{y(s)}{e(s)} = K_P + \underbrace{\frac{K_D \cdot s}{T_1 \cdot s + 1}}_{\text{PD-Regler parallel}} = K_R \cdot \underbrace{\left(1 + \frac{T_V \cdot s}{T_1 \cdot s + 1}\right)}_{\text{PD-Regler ideal}}, \quad K_R = K_P, \quad K_R \cdot T_V = K_D, \quad T_1 = \frac{1}{N}.$	
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
 PID Controller (2DOF)	<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 $T_1 = 1/N$ 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>
 PI Controller (2DOF)	
 PD Controller (2DOF)	

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

Beschreibung

Parallele (additive) Form des PID-Reglers mit zwei Freiheitsgraden: Bei der parallelen Form des PID-Reglers werden getrennte Verstärkungsfaktoren $P = K_P$, $I = K_I$, $D = K_D$ für die P-, I- und D-Anteile verwendet, die Führungsgröße $w(t)$ wird mit den Faktoren b (P-Anteil) und c (D-Anteil) gewichtetet, die Verzögerungszeitkonstante des D-Anteils ist $T_1 = 1/N$.

Reglerstruktur:



Reglergleichung:

$$\begin{aligned}
 y(s) &= P \cdot (b \cdot w(s) - x(s)) + \frac{I}{s} \cdot (w(s) - x(s)) + D \cdot \frac{N \cdot s}{s + N} \cdot (c \cdot w(s) - x(s)) \\
 &= \left(b \cdot P + \frac{I}{s} + \frac{c \cdot D \cdot s}{N \cdot s + 1} \right) \cdot w(s) - \left(P + \frac{I}{s} + \frac{D \cdot s}{N} \right) \cdot x(s) \\
 &= K_P \cdot (b \cdot w(s) - x(s)) + \frac{K_I}{s} \cdot (w(s) - x(s)) + \frac{K_D \cdot s}{1 + T_1 \cdot s} \cdot (c \cdot w(s) - x(s)) \\
 &= \left(b \cdot K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{c \cdot K_D \cdot s}{T_1 \cdot s + 1} \right) \cdot w(s) - \left(K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D \cdot s}{T_1 \cdot s + 1} \right) \cdot x(s) \\
 &= G_F(s) \cdot w(s) - G_R(s) \cdot x(s).
 \end{aligned}$$

Reglerübertragungsfunktionen:

$$\begin{aligned}
 G_F(s) &= \frac{(b \cdot P + c \cdot D \cdot N) \cdot s^2 + (b \cdot P \cdot N + I) \cdot s + I \cdot N}{(P + D \cdot N) \cdot s^2 + (P \cdot N + I) \cdot s + I \cdot N} \\
 &= \frac{(b \cdot K_P \cdot T_1 + c \cdot K_D) \cdot s^2 + (b \cdot K_P + K_I \cdot T_1) \cdot s + K_I}{(K_P \cdot T_1 + K_D) \cdot s^2 + (K_P + K_I \cdot T_1) \cdot s + K_I} = \frac{Z_F(s)}{N_F(s)}, \\
 G_R(s) &= \frac{(P + D \cdot N) \cdot s^2 + (P \cdot N + I) \cdot s + I \cdot N}{s^2 + N \cdot s} \\
 &= \frac{(K_P \cdot T_1 + K_D) \cdot s^2 + (K_P + K_I \cdot T_1) \cdot s + K_I}{T_1 \cdot s^2 + s} = \frac{Z_R(s)}{N_R(s)}, \quad N_F(s) = Z_R(s).
 \end{aligned}$$

20 Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik, regelungstechnische Begriffe

20.1 Deutschsprachige Fachliteratur

ADAMY, J.: Nichtlineare Systeme und Regelungen.
3. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, 2018.

ANGERMANN, A.; BEUSCHEL, M.; RAU, M.; WOHLFARTH, U.: MATLAB – Simulink – Stateflow: Grundlagen, Toolboxen, 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 kurzorientierte 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.

JUNGLAS, 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
A btast	
– 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
A btaster	sampling element, sampler
A bweichung	offset, deviation
a daptive Regelung	adaptive control system
a daptives Regelungssystem	adaptive control system
A dditionsstelle	summing point
Ä hnlichkeitstransformation	similarity transformation
A lgorithmus	algorithm
A llpass	all-pass
A mpplitude	magnitude
A mpitoden	
– gang	amplitude response, magnitude plot
– reserve	gain margin
a nalog	analog, analogue
A nalog-Digital-Wandler	analog-to-digital converter
a naloge Größe	analog variable, quantity
a naloger Regler	analog controller
a naloges Signal	analog signal
A nfangs	initial
– wert	– value
– wertsatz	– -value theorem
– zustand	– state
A nregelzeit	control rise time
A nstiegs	ramp
– antwort	– response
– funktion	– function
– zeit	rise time
A ntwortfunktion	
– der homogenen Zustandsgleichung	zero-input response
– der inhomogenen Zustandsgleichung	zero-state response
a periodisch	aperiodic, overdamped, $D > 1$
a periodische Dämpfung	aperiodic damping
a periodischer Grenzfall	critically damped, $D = 1$
AR -Modell	AR model, auto-regressive model
A rbeitspunkt	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
– größe	– 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	
– Regelabweichung	steady-state error
– Regeldifferenz	steady-state error
Block	functional block
Blockdiagramm	block diagram
BODE-Diagramm	BODE plot, BODE diagram
BOX-JENKINS-Modell	BOX-JENKINS model, BJ model
C harakteristische Gleichung	characteristic equation
charakteristisches Polynom	characteristic polynomial
D -Element	D (derivative)-element
D-Regler	derivative controller
D-Verhalten	rate action, derivative action

Dämpfung	damping, attenuation
–, aperiodische	–, aperiodic
Dämpfungs	damping
– faktor	– factor
– koefizient	– coefficient
– konstante	– constant
– verhältnis	– ratio
Dead-Beat-Regelung	deadbeat control
Dead-Beat-Sprungantwort	deadbeat step response
Desibel (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
Dreipunkt-Regelung	relay with dead zone
Dreipunkt-Regler	three-step control
DT ₁ -Element	three-step controller, three-position controller
Durchgangs	derivative element with first order lag
– matrix	feedthrough
– vektor	– matrix
– faktor	– vector
– faktor	– factor
Durchtrittsfrequenz	crossover frequency
Durchtrittskreisfrequenz	crossover angular frequency
dynamische Kompensation	dynamic compensation
dynamisches	
– Verhalten	dynamic behaviour
– System	dynamic system

Eck

– frequenz	corner
– kreisfrequenz	– frequency, break point
Eigen	– angular frequency
– kreisfrequenz	
– wert	
Eingangs	damped natural angular frequency
– größe	eigenvalue
– matrix	input

– variable	corner
– matrix	– frequency, break point
	– angular frequency
	damped natural angular frequency
	eigenvalue
	input

– signal	– signal
– vektor	– vector
eingeschwungener Zustand	steady state
Eingrößensystem	single-input single output (SISO) system
Einheitsanstiegs	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 altungs	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
Gegenkopplung
Gesamtübertragungsfunktion
Geschwindigkeits
– fehler
– Regelung
geschlossener
– Wirkungsablauf
– Wirkungsweg
Gewichtsfunktion
gewöhnliche Differenzialgleichung
Gleichungsfehler
gleitende Mittelwertbildung
Grenzfall, aperiodischer
Grenzzyklus
Gütfunktional
Gütekriterium

damped oscillation
negative feedback
overall transfer function
velocity
– (ramp) error
– control system

Halteglied nullter Ordnung
Handregelung
homogene Differenzialgleichung
– I. Ordnung
– II. Ordnung
HURWITZ-Kriterium
Hysterese

zero-order hold element (ZOH)
manual control
homogeneous differential equation
–, first order
–, second order
HURWITZ's stability criterion
hysteresis

I-Element
I-Regler
I-Verhalten
I-Zustandsregelung
Identifikation eines Systems
imaginäre Polstellen
Imaginärteil
Impuls
– antwort
– folgefunktion
– funktion
instabiles System
Integrier
– beiwert
– sättigung
– zeitkonstante
integrierendes Verhalten
Inverse einer Matrix
inverse LAPLACE-Transformation

I (integral)-element
integral controller
integral action
I (integral)-control with state feedback
system identification
imaginary poles
imaginary part
impulse
– response
– -function sequence, pulse-function sequence
– function
unstable system

integration constant
reset windup, integral windup
integral time constant, constant of integrator
integral action
inverse matrix
inverse LAPLACE transform

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
– verstrkung	– gain, closed loop gain
kritische Dämpfung (PT ₂ -Element mit $D = 1$)	critical damping
kritisch gedmpftes System (PT ₂ -Element mit $D = 1$)	critically damped system

L ageregelung	position control system
LAPLACE	LAPLACE
– -Transformierte	– transform
– -Transformationspaar	– transform pair
– -Ubertragungsfunktion	continuous-time transfer function
– -Variable	– variable
Leistungsverstärker	power amplifier
lineare	linear
– Regelungssystem	– control system
– zeitinvariantes Regelungssystem	– time-invariant (LTI) control system
Linearisierung	linearization
Linearität	linearity
linke s -Halbebene	left half s -plane (LHP)
LJAPUNOW	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

M A-Modell	MA model, moving-average model
mathematische Modellbildung	mathematical modeling
mathematisches Modell	– model
Matrix-e-Funktion	matrix exponential
Mehrgrssensystem	multivariable system,
Mehrpunktglied	multiple-input multiple-output (MIMO) system multi-position element

Mess

- einrichtung
- wandler

Methode der Beschreibungsfunktion

Methode der kleinsten Quadrate

Minimalphasensystem

Mitkopplung

Mittelwertbildung, gleitende

Modell

- , autoregressives
- , autoregressives, mit gleitender Mittelwertbildung mit externer Variablen
- , autoregressives, mit externer Variablen
- mit gleitender Mittelwertbildung
- , parametrisches
- , selbstbezügliches

MOORE-PENROSE-Inverse

- measuring device
- transducer

describing function method

least squares method, LS

minimum-phase system

positive feedback

moving-average

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 pseudoinverse

Nachstellzeit

Nachstellzeitkonstante

Nennerpolynom

nichtlineare Differentialgleichung

nichtlineares

- Element
- Regelungssystem
- System

Nichtlinearität

- als prinzipielle Eigenschaft
- absichtlich eingeführte

nichtsteuerbares System

Normalform (kanonische Form)

normierte Dämpfung

Nullstelle

NYQUIST-Kriterium

reset time

reset time constant

denominator polynomial

nonlinear differential equation

nonlinear

- element
- feedback control system
- system

nonlinearity

- , inherent
- , intentional

uncontrollable system

normal form

damping ratio

zero

NYQUIST stability criterion

Operationsverstärker

Optimale Regelung

Optimierung

Ortskurve der Frequenzgangfunktion

OUTPUT-ERROR-Modell

operational amplifier

optimal control

optimization

NYQUIST plot, NYQUIST diagram,

polar plot

OUTPUT-ERROR model, OE model

P-

- -Element
- -Regelung
- -Regler
- -Verhalten

P (proportional)

- 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
– nacheilung	– lag
– portrait	– portrait
– rand	– margin
– reserve	– margin
– schnittkreisfrequenz	– crossover angular frequency
– verschiebung	– shift
– voreilung	– lead
– winkel	– angle
PI-Regler	PI (proportional-plus-integral) controller, two-term controller
PI-Zustandsregelung	PI (proportional-plus-integral) control with state feedback
PID-Regler	PID (proportional-plus-integral-plus-derivative) controller, three-term controller
pneumatischer Regler	pneumatic controller
Pol-Nullstellenplan	pole-zero plot, pole-zero diagram, pole-zero map
Polstelle	pole
Polvorgabe	pole placement
POPOW, Stabilitätskriterium von	POPOV stability criterion
POPOW-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

Qquare, Methode der kleinsten quadratische Regelfläche

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

Rang einer Matrix

Realteil

rechte s -Halbebene

Regel

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

Regelgenauigkeit im Beharrungszustand

Regelung

- mit Störgrößenaufschaltung

Regelungs

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

Regler

Reihenschaltung

Reihenstruktur

Resonanz

- kreisfrequenz
- wert des Amplitudengangs
(PT_2 -Element)

reziproke Übertragungsfunktion

Robuste Regelung

ROUTH-Kriterium

ROUTH-Tafel

Rückführung

Rückführgröße

Rückführungsschleife

rückgeführtes Signal

Rückkopplung

rank of matrix

real part

right half s -plane (RHP)

control

- 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

plant

steady-state control accuracy

closed-loop control, feedback control

feedforward control

control accuracy

controllable canonical form

automatic feedback control system, control system

adaptive control system

unity-feedback control system

control system technology, control engineering

control action, controller action

control action, controller action

compensator, controller, automatic controller, governor

series connection

chain structure

resonant

- angular frequency

- peak magnitude

inverse transfer function

robust control system

ROUTH's stability criterion

ROUTH array

feedback

- variable

control loop, feedback loop

feedback signal

feedback

Rückwärtsdifferenz	backward difference
Ruhelage	equilibrium point, equilibrium state
RUNGE-KUTTA-Verfahren	RUNGE-KUTTA method
S -Ebene	<i>s</i> -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
– grösse	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
- mit offenem Wirkungskreis
- mit offener Wirkungskette

feedback control
feedforward control
feedforward control
control

Steuerungs

- technik
- verhalten
- wirkung

– engineering
– action
– action

stochastische Variable**stochastischer Prozess****Stör**

- Größe
- Größenaufschaltung
- signal
- Übertragungsfunktion
- unterdrückung
- verhalten

disturbance input
feedforward control
disturbance signal
disturbance transfer function
disturbance rejection
disturbance response
controlled system

Strecke

- mit Ausgleich
- ohne Ausgleich

– with self-regulation
– without self-regulation

Strudelpunkt**Summationselement****Superpositions (Überlagerungs)-prinzip****Symmetrisches Optimum****System**

- dynamisches
- Identifikation
- mit geschlossener Schleife

symmetrical optimum

Systemmatrix

dynamical system
system identification
closed loop system
system matrix

TAYLOR-Reihe**Teilzustandsrückführung,****Ausgangsrückführung****Testeingangssignal** **t_{\max} -Zeit****Totzeit****Totzeitelement****Totzone (Lose, Dreipunktregler, Verstärker)**

TAYLOR-series

output feedback

test input signal

peak time

dead time, time delay, transport lag

dead-time element, transport-lag element

dead zone (relay, on-off-controller, amplifier), dead band (backlash nonlinearity)

trajectory

transition matrix

transpose of a matrix

trapezoidal approximation of integral

dead-time element, transport-lag element

TUSTIN's method

Trajektorie**Transitionsmatrix, Zustandsübergangsmatrix****Transponierte einer Matrix****Trapez Näherung** **T_i -Element****TUSTIN-Formel**

overfitting

unit-step response

transient behavior, transient response

principle of superposition

maximum overshoot, overshoot, peak overshoot

Überanpassung**Übergangsfunktion****Übergangsverhalten****Überlagerungsprinzip, Superpositionsprinzip****Überschwingweite**

Übertragungs

- block
 - element
 - funktion
 - funktion des geschlossenen Regelkreises
 - funktion des offenen Regelkreises
 - funktion, reziproke
 - matrix
 - verzögerung
- ungedämpfte Frequenz
- Unterschwingen

- block, functional block
- transfer element
- transfer function
- closed-loop transfer function
- open-loop transfer function
- inverse transfer function
- transfer matrix
- transfer lag
- natural frequency
- undershoot

Variable

variable Größe

Vergleicher

Verhalten

- , differenzierendes
- im Beharrungszustand
- , integrierendes

Verschiebungsprinzip

Verstärker

Verstärkung

Verzögerung

Verzögerungselement I. Ordnung

Verzögerungszeit

Verzugszeit

Verzweigung

Verzweigungslement

viskose Reibung

viskoser Reibungskoeffizient

Vorhaltverstärkung

Voreilung

Vorfilter

Vorhalt

- -Element
- zeit
- zeitkonstante

Vorwärtsdifferenz

variable

variable, quantity

comparator

action, behaviour, performance

rate action

steady-state response

integral action

principle of shifting

amplifier

gain, gain factor

lag, delay

lag element

time constant

delay time, equivalent dead-time

branching

branch point

viscous friction

viscous friction coefficient

derivative action gain

lead

prefilter

derivative action

lead element

rate time

rate time constant

forward difference

Wasserstandsregelung

Wirbelpunkt

Wirkung

Wirkungsablauf

Wirkungskette

- , Steuerung mit offener

Wirkungskreis

- , Steuerung mit geschlossenem

- , Steuerung mit offenem

- mit offener Wirkungskette

Wirkungslinie

water-level control

center

action

action

feedforward control

feedback control

feedforward control

feedforward control

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 squared error (ITSE)
Quadratische Regelfläche	integral of squared time multiplied by squared error (ISTSE)
Zeitquadratgewichtete	time-varying system
Quadratische Regelfläche	time response
zeitvariantes System	random variable, random quantity
Zeitverhalten	stochastic process
Zufallsgröße	steady state
Zufallsprozess	state
Zustand, eingeschwungener	– observer
Zustands	– observation
– beobachter	– differential equation
– beobachtung	– equations
– differenzialgleichung	– variable
– gleichungen	– space
–größe	– control
– raum	– feedback
– regelung	– transition matrix
– rückführung	– variable
– übergangsmatrix	– vector
– variable	
– vektor	

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

action

action line

actual value

actuating

- signal
- variable

actuator

adaptive control system

algorithm

all-pass

amplifier

amplitude

- optimum
- response

analog, analogue

analog

- controller
- quantity
- signal
- variable

analog-to-digital converter

aperiodic

aperiodic damping

AR model

ARMA model

ARMAX model

ARX model

asymptotic behavior

attenuation

auto-regressive model

auto-regressive model with extra (exogenous) variable

auto-regressive moving-average model

auto-regressive moving-average model with extra (exogenous) variable

Verhalten, Wirkung, Wirkungsablauf

Wirkungslinie

Istwert

Stellgröße

Stellgröße

Stelleinrichtung, Stellglied

adaptive Regelung, adaptives Regelungssystem

Algorithmus

Allpass

Verstärker

Betragsoptimum

Amplitudengang

analog

analoger Regler

analoge Größe

analoges Signal

analoge Größe

Analog-Digital-Wandler

aperiodisch, aperiodisch gedämpft, $D > 1$

aperiodische Dämpfung

AR-Modell, autoregressives Modell, selbstbezügliches Modell

ARMA-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung

ARMAX-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung mit externer Variablen

ARX-Modell, autoregressives Modell mit externer Variablen

asymptotisches Verhalten

Abschwächung, Dämpfung

AR-Modell, autoregressives Modell, selbstbezügliches Modell

ARX-Modell, autoregressives Modell mit externer Variablen

ARMA-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung

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,
– algorithm	Steuerungsverhalten, -wirkung
– area	Regelalgorithmus
– engineering	Regelfläche
– equipment	Regelungs-, Steuerungstechnik
– error	Regeleinrichtung
– factor	Regelabweichung, Regeldifferenz
– loop	Regelfaktor
– range	Regelkreis, Rückführungsschleife
– rate	Regelbereich
– rise time	Regelgeschwindigkeit
– signal	Anregelzeit
– system	Stellgröße
– transfer function	Regelkreis, Regelungssystem
controllability matrix	Führungsübertragungsfunktion
controllable	Steuerbarkeitsmatrix
– canonical form	Regelungsnormalform
– system	steuerbares System
controlled variable	Regelgröße
controlled system	Strecke
– with self-regulation	– mit Ausgleich
– without self-regulation	– ohne Ausgleich
controller	Regler
– (for closed loop control)	Regelverhalten, -wirkung
– action	Steuergroße
controlling quantity	
convolution	Faltungsintegral
– integral	Faltungssatz
– theorem	Eck
corner	– frequenz
– frequency	– kreisfrequenz
– angular frequency	Gütfunktional
cost function	kritische
critical	– Verstärkung
– gain	– Dämpfung ($D = 1$ eines PT_2 -Elements, aperiodischer Grenzfall)
– damping	aperiodischer Grenzfall, $D = 1$
critically damped	– kritisch gedämpftes System (PT_2 -Element mit $D = 1$)
critically damped system	
crossover	Durchtrittskreisfrequenz
– angular frequency	Durchtrittsfrequenz, Schnittfrequenz
– frequency	
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 Dreipunktregler, 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, Differenzierelement 1. Ordnung
– lead element	
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	
– part	Imaginärteil
– poles	imaginäre Polstellen
impulse	Impuls
– function	– funktion
– function sequence	– folgefunktion
– response	– antwort, Gewichtsfunktion
initial	Anfangs
– state	– zustand
– value	– wert
initial-value theorem	– wertsatz
input	Eingangs
– matrix	– matrix
– signal	– signal
– variable	– größe
	– vektor
integration constant	Integrierbeiwert
integral	
– action	integrierendes Verhalten, I-Verhalten
– controller	I-Regler
– element	I-Element
– of absolute value of error (IAE)	Betragsregelfläche
– of squared error (ISE)	Quadratische Regelfläche
– of squared time multiplied by squared error (ISTSE)	Zeitquadratgewichtete Quadratische Regelfläche
– of time multiplied by absolute value of error (ITAE)	Zeitgewichtete Betragsregelfläche
– of time multiplied by squared error (ITSE)	Zeitlinear gewichtete Quadratische Regelfläche
– time constant	
– windup	Integrierzeitkonstante
inverse	Integriersättigung
– LAPLACE transform	
– matrix	inverse LAPLACE-Transformation
– transfer function	Inverse einer Matrix
	reziproke Übertragungsfunktion
lag	Verzögerung
lag element	
–, first order	PT ₁ -Element
–, second order	PT ₂ -Element
lag-lead compensator	PPT ₁ -PDT ₁ -Element (-Regler)
LAPLACE	LAPLACE
– transform	– -Transformierte
– transform pair	– -Transformationspaar
– variable	– -Variable
lead	Voreilung
lead element	Vorhalt-Element
least squares method	Methode der kleinsten Quadrate
left half s -plane (LHP)	linke s -Halbebene
limit cycle	Grenzzyklus
limiting	Begrenzung

linear	lineares
– control system	– Regelungssystem
– time-invariant (LTI) control system	zeitinvariantes Regelungssystem
linearity	Linearität
linearization	Linearisierung
loop	Kreis
– gain	– verstärkung
– structure	– struktur
LS	Methode der kleinsten Quadrate
LUENBERGER observer	LUENBERGER-Beobachter
LYAPUNOV	LJAPUNOW
–, first method of	–, erste Methode von
– function	– -Funktion
–, second method of	–, zweite Methode von
(direct method of)	(direkte Methode von)
MA model	MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung
magnitude	Amplitude
magnitude plot	Amplitudengang
manipulated variable	Stellgröße
manual control	Handregelung
mathematical	mathematisches Modell
– model	mathematische Modellbildung
– modeling	
matrix	Matrix-e-Funktion
– exponential	Rang einer Matrix
–, rank of	Überschwingweite
maximum overshoot	Messeinrichtung
measuring device	Minimalphasensystem
minimum-phase system	
model	AR-Modell
–, auto-regressive	ARMA-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung
–, auto-regressive moving-average	ARMAX-Modell, autoregressives Modell mit gleitender Mittelwertbildung mit externer Variablen
–, auto-regressive moving-average with extra (exogenous) variable	ARX-Modell, autoregressives Modell mit externer Variablen
–, auto-regressive with extra (exogenous) variable	MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung
–, moving-average	parametrisches Modell
–, parametric	gleitende Mittelwertbildung
moving-average	MA-Modell, Modell mit gleitender Mittelwertbildung
moving-average model	MOORE-PENROSE-Inverse, Pseudoinverse
MOORE-PENROSE pseudoinverse	Mehrpunktglied
multi-position element	Element mit mehrdeutiger Kennlinienfunktion
multivalued nonlinearity	Mehrgrößensystem
multivariable system	
N atural frequency	ungedämpfte Frequenz
negative feedback	Gegenkopplung
node	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	
O bservability	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	Optimierung
ordinary differential equation	gewöhnliche Differenzialgleichung
oscillation	Schwingung
output	Ausgangs
– equation	– gleichung
– feedback	– rückführung, Teilzustandsrückführung
– matrix	– matrix
– quantity	–größe
– variable	–größe
– vector	–vektor
OUTPUT-ERROR model	OUTPUT-ERROR-Modell
overall transfer function	Gesamtübertragungsfunktion
overdamped	aperiodisch, aperiodisch gedämpft, $D > 1$
overdamped system	PT ₂ -Element (mit $D > 1$, Kriechfall)
overfitting	Überanpassung
overshoot	Überschwingweite
P (proportional)-element	P-Element
parallel	Parallel
– connection	– schaltung
– structure	– struktur
parameter	Parameter
– optimization	– optimierung
– sensitivity	– empfindlichkeit
parametric	Parameteridentifikation, Parameterschätzung
– estimation, identification	Parameterschätzverfahren
– estimation method	Parameteridentifikation, Parameterschätzung
– identification	parametrisches Modell
– model	Partialbruchzerlegung
partial-fraction expansion	PD-Regler
PD (proportional-plus-derivative)-controller	Überschwingweite
peak	t_{\max} -Zeit
– overshoot	Verhalten
– time	Gütekriterium
performance	Gütekriterium
– criterion	periodisch
– index	Phasen
periodic	– winkel
phase	– schnittkreisfrequenz
– angle	– nacheilung
– crossover angular frequency	– voreilung
– lag	– reserve, Phasenrand
– lead	– ebene
– margin	–, Methode der -ebene
– plane	– gang
– plane analysis	– portrait
– plot	– gang
– portrait	– verschiebung
– response	
– shift	

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	PI-Zustandsregelung
– with state feedback	Regelstrecke
plant	Stellgröße
– input	Regelgröße
– output	pneumatischer Regler
pneumatic controller	Ortskurve der Frequenzgangfunktion
polar plot	Polstelle
pole	Polvorgabe
– placement	Pol-Nullstellenplan
pole-zero plot, pole-zero diagram,	POPOW-Gerade
pole-zero map	Stabilitätskriterium von POPOW
POPOW line	Lagerregelung
POPOW stability criterion	Mitkopplung
position control system	Leistungsverstärker
positive feedback	Vorfilter
power amplifier	Verstärkungsprinzip
prefilter	Linearitätsprinzip
principle	Verschiebungsprinzip
– of amplification	Superpositions-(Überlagerungs)-prinzip
– of linearity	stochastischer Prozess, Zufallsprozess
– of shifting	
– of superposition	
process, stochastic	
proportional	P-Verhalten, Proportional-Verhalten
– action	Proportionalbeiwert
– constant, – gain	P-Regelung, Proportional-Regelung
– control	P-Regler
– controller	MOORE-PENROSE-Inverse, Pseudoinverse
pseudoinverse	Impulsfolgefunktion
pulse-function sequence	Pulsweitenmodulation
pulse-width modulation	

Quantity

Variable, variable Größe

ramp	Anstiegs
– function	– funktion, Rampenfunktion
– response	– antwort, Rampenantwort
random	Zufalls
– quantity	– größe
– variable	– größe
range	Bereich
rate	D-Verhalten, differenzierendes Verhalten
– action	Vorhaltzeit
– time	Vorhaltzeitkonstante
– time constant	

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	Integriertägigung
– windup	Resonanz
resonant	– kreisfrequenz
– angular frequency	– wert des Amplitudengangs (PT ₂ -Element)
– peak magnitude	Antwortfunktion
response function	rechte s -Halbebene
right half s -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	
S -plane	s -Ebene
saddle point	Sattelpunkt
sample	Abtast
– and-hold element	– halteglied
sampled-data control system	– Regelung
sampled signal	Abtastsignal
sampler	Abtaster, Abtast-Element
sampling	Abtastung
sampling	Abtast
– control	– Regelung
– element	– -Element, Abtaster
– period	– periode, – zeitintervall
– rate	– rate, – frequenz
saturating nonlinearity	Element mit Sättigung

saturation	Sättigung
scalar product	Skalarprodukt
second-order	
– lag element, – system	PT ₂ -Element
sensitivity	Empfindlichkeit
separation principle	Separationsprinzip
series	
– connection	Reihenschaltung
– structure	Kettenstruktur
servo control	Folgeregelung
set value	Sollwert
setpoint	Sollwert
– control	Festwertregelung
settling time	Ausregelzeit, Beruhigungszeit, Einschwingzeit
signum function	Signum-Funktion
similarity transformation	Ähnlichkeitstransformation
single-input single-output (SISO) system	Eingrößensystem
single-loop feedback system	einschleifige Regelung
single-valued nonlinearity	Element mit eindeutiger Kennlinienfunktion
sine	
– function	Sinusfunktion
– response	Sinusantwort
spring-mass-dashpot system	Feder-Masse-Dämpfer-System
stability	Stabilität
–, absolute	–, absolute
–, asymptotic	–, asymptotische
– analysis	Stabilitätsuntersuchung
standard control loop	Standardregelkreis
state	Zustands
– control	– Regelung
– differential equation	– Differenzialgleichung
– equations	– Gleichungen
– feedback	– Rückführung
– observation	– Beobachtung
– observer	– Beobachter
– space	– Raum
– transition matrix	– Übergangsmatrix, -Transitionsmatrix
– variable	– Größe, – Variable
– vector	– Vektor
state, steady	eingeschwungener Zustand
static behaviour	statisches Verhalten
steady-state	Beharrungszustand, eingeschwungener Zustand
– control error	stationäre Regeldifferenz, bleibende Regelabweichung, bleibende Regeldifferenz
– control accuracy	Regelgenauigkeit im Beharrungszustand
– response	Verhalten im Beharrungszustand
– solution	stationäre Lösung
step	
– function	Sprungfunktion
– response	Sprungantwort

stochastic	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	

TAYLOR series

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

time-invariant system

time-varying system

tracking system

trajectory

transducer

transfer

- element
- function
- -function matrix
- lag

transient

- behavior
- error signal

transport-lag element, dead-time element

transpose of a matrix

trapezoidal approximation of integral

tuning rules

TUSTIN's method

two-position element

two-position control

two-position controller

two-step action element

two-step control

TAYLOR-Reihe

Testeingangssignal

Dreipunkt-Element

Dreipunkt-Element

Dreipunkt-Regelung

Dreipunkt-Regler

PID-Regler

Zeit

– verhalten

– konstante, Verzögerungszeit

– verzögerung, Totzeit

– bereich

– verzögerung

– verhalten

Integrierzeitkonstante

zeitinvariantes System

zeitvariantes System

Folgeregelung

Zustandskurve, Trajektorie

Messwandler

Übertragungs

– element

– funktion

– matrix

– verzögerung

Übergangsverhalten

vorübergehende Regeldifferenz

T_1 -Element, Totzeitelement

Transponierte einer Matrix

Trapeznaheung

Einstellregeln

TUSTIN-Formel

Zweipunkt-Element

Zweipunkt-Regelung

Zweipunkt-Regler

Zweipunkt-Element

Zweipunkt-Regelung

two-step controller	Zweipunkt-Regler
two-term controller	PI-Regler
two-valued nonlinearity	Element mit zweideutiger Kennlinienfunktion
U ncontrollable system	nicht steuerbares System
undamped natural angular frequency	Kennkreisfrequenz
underdamped	periodisch, $0 \leq D < 1$
underdamped system	PT ₂ -Element (mit $D < 1$, Schwingfall)
undershoot	Unterschwingen
unit circle	Einheitskreis
unit-impulse	Einheitsimpuls
– function	– funktion
– response	– antwort
unit matrix	Einheitsmatrix
unit-ramp	Einheitsanstiegs
– function	– funktion
– response	– antwort
unit-step	Einheitssprung
– function	– funktion
– response	– antwort
unit vector	Einheitsvektor
unity-feedback control system	Regelungssystem mit direkter Gegenkopplung
unstable system	instabiles System
V ariable	Variable, Größe
–, random	Zufallsgröße
–, stochastic	stochastische Variable
variation of parameters	Parametervariation
velocity	Geschwindigkeits
– control system	– Regelung
– (ramp) error	– Fehler
viscous	viskose Reibung
– friction	viskoser Dämpfungskoeffizient
– friction coefficient	
W ater-level control	Wasserstandsregelung
weighting function	Gewichtsfunktion
Z -plane	<i>z</i> -Ebene
<i>z</i> -transfer function	<i>z</i> -Übertragungsfunktion
<i>z</i> -transform	<i>z</i> -Transformation
<i>z</i> -transform pair	<i>z</i> -Transformationspaar
zero	Nullstelle
zero-input response	Antwortfunktion der homogenen Zustandsgleichung
zero-order hold element (ZOH)	Halteglied nullter Ordnung
zero-state response	Antwortfunktion der inhomogenen Zustandsgleichung

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

Agggregation

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

aggregation
aggregation operator, aggregator
algebraic sum
algebraic product
crisp output
conclusion

Basisvariable

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

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

Charakteristische Funktion einer Menge

characteristic function

DANN-Teil

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

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

Eingangsgröße, scharfe

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

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

festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Fuzzifizierung

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

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

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

MAMDANI-ImplikationMAX-Average-Produkt
(arithmetischer Mittelwert)

MAX-MIN-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren

MAX-MIN-Komposition
(-Produkt, -Verkettung)

MAX-PROD-Inferenz, unscharfes Schlussfolgerungsverfahren

MAX-PROD-Komposition
(-Produkt, -Verkettung)maximale Höhe,
Methode der, DefuzzifizierungsverfahrenMaximum-Mittelwert-Methode,
DefuzzifizierungsverfahrenMaximum-Operation, t -Konorm

Menge

Menge, scharfe

Menge, unscharfe

Mengenoperator

Methode der maximalen Höhe,
Defuzzifizierungsverfahren

MIN-MAX-Komposition

Minimum-Operation, t -Norm

mittelnder Operator

Mittelwert-Operator

Modifikator

Modifikator, linguistischer

MAMDANI implication

max-average composition

MAMDANI inference, max-min inference

max-min composition

max-dot inference,
max-prod inferencemax-dot composition,
max-prod composition

height defuzzification

mean of maximum (MOM) defuzzification,
middle of maxima defuzzification

maximum function

set

crisp set

fuzzy set

set operator

max-height defuzzification

min-max composition

minimum function

averaging operator

averaging operator

modificator

linguistic hedge

Nahe-Null (ZE)

negativ (NE)

negativ-groß (NG),

negativ-klein (NK)

negativ-mittel (NM)

normalisierte unscharfe Menge

zero (ZO)

negative (N)

negative big (NB)

negative small (NS)

negative medium (NM)

normalized fuzzy set

ODER-Operator, kompensatorischer

ODER-Verknüpfung

ODER-Verknüpfung, unscharfe

Operation zwischen scharfen Mengen

Operator, kompensatorischer

Operator, parametrisierter

Operator, unscharfer

compensatory OR

disjunction

fuzzy OR

binary operation

compensatory operator

parametrized operator

fuzzy operator

Parametrisierter Operator

positiv (PO)

positiv-groß (PG)

positiv-klein (PK)

positiv-mittel (PM)

Prämisse

parametrized operator

positive (P)

positive big (PB)

positive small (PS)

positive medium (PM)

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

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

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

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

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

fuzzy singleton, singleton
 support of membership function
 SUGENO controller
 SUGENO implication
 sum-min 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	support of membership function
trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion	trapezoidal membership function
triangulare Konorm	<i>t</i> -conorm, triangular conorm
triangulare Norm	<i>t</i> -norm, triangular norm
Ü ber-MAX-Operator	over max operator
(alle <i>t</i> -Konormen außer MAX)	
UND-Operator, kompensatorischer	compensatory AND
UND-Verknüpfung	conjunction
UND-Verknüpfung, unscharfe	fuzzy AND
unscharfe Entscheidung	fuzzy decision
unscharfe Information	fuzzy information
unscharfe Logik	fuzzy logic
unscharfe Menge	fuzzy set
unscharfe Menge mit einem Wertepaar	fuzzy singleton, singleton
unscharfe ODER-Verknüpfung	fuzzy OR
unscharfe Regel	fuzzy rule
unscharfe Relation (Beziehung)	fuzzy relation
unscharfe UND-Verknüpfung	fuzzy AND
unscharfe Zahl	fuzzy number
unscharfer Operator	fuzzy operator
unscharfes Schließen	approximate reasoning, fuzzy inference, fuzzy reasoning
unscharfes Schlussfolgerungssystem	fuzzy inference system (FIS)
Unter-MIN-Operator	under min operator
(alle <i>t</i> -Normen außer MIN)	
V ariable, linguistische	linguistic variable
Vereinigungsoperation bei Mengen	union operation
(ODER-Operation)	
Verkettung von unscharfen Relationen	composition
Voraussetzung	premise
W ahrheitstabelle	truth table
WENN-DANN-Regel	IF-THEN-rule
WENN-DANN-Zusammenhang	implication
WENN-Teil	premise
WENN-Teil einer Regel	antecedent part, rule-antecedent part
Wert, scharfer	crisp value
Wertname, linguistischer	linguistic value, linguistic label
Wissensbasis	knowledge base
Z ahl, unscharfe	fuzzy number
Zerlegung (von zusammengesetzten Regeln)	decomposition (of compound rules)
Zugehörigkeit	membership
Zugehörigkeitsgrad	degree of membership
Zugehörigkeitsfunktion	characteristic function, membership function
Zugehörigkeitsfunktion, dreieckförmige	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

a

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

b

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

c

center of area (COA) defuzzification
 center of gravity (COG)
 defuzzification
 center of largest area defuzzification
 center of sums (COS) defuzzification
 centroid defuzzification method
 characteristic function
 compensatory AND
 compensatory operator
 compensatory OR
 complement
 composition
 compositional rule of inference
 concentration
 conclusion
 conjunction
 conjunctive rules

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

consequent	DANN-Teil einer Regel
contrast intensification	Kontrast-Intensivierung (Modifikator)
controller	Regler
convexity of fuzzy set (membership function)	Konvexität von Fuzzy-Mengen
core of membership function	Kern, Toleranz einer unscharfen Menge
crisp	scharf
crisp input	scharfe Eingangsgröße
crisp logic	scharfe Logik, Schaltalgebra, BOOLESche Logik
crisp output	scharfe Ausgangsgröße
crisp relation	scharfe Relation (Beziehung)
crisp set	scharfe Menge
crisp value	scharfer Wert

d ecision	Entscheidung
decomposition (of compound rules)	Zerlegung (von zusammengesetzten Regeln)
defuzzification	Defuzzifizierung, Erzeugung eines scharfen Wertes
defuzzification method	Defuzzifizierungsverfahren
degree of membership	Zugehörigkeitsgrad
degree of fulfillment	Erfüllungsgrad einer Regel
dilatation, dilation	Dehnung (Modifikator)
disjunction	ODER-Verknüpfung
disjunctive rules	mit ODER verknüpfte Regeln
drastic product	drastisches Produkt, <i>t</i> -Norm
drastic sum	drastische Summe, <i>t</i> -Konorm

E INSTEIN product	EINSTEIN-Produkt, <i>t</i> -Norm
EINSTEIN sum	EINSTEIN-Summe, <i>t</i> -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)
H AMACHER intersection operator	HAMACHER-Produkt, <i>t</i> -Norm
HAMACHER product	HAMACHER-Produkt, <i>t</i> -Norm
HAMACHER sum	HAMACHER-Summe, <i>t</i> -Konorm
HAMACHER union operator	HAMACHER-Summe, <i>t</i> -Konorm
hedge, linguistic	linguistischer Modifikator
height defuzzification	Methode der maximalen Höhe, Defuzzifizierungsverfahren
height of membership function	Höhe einer Zugehörigkeitsfunktion
I F-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)
k nowledge 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
modificator	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
triangulare Norm, *t*-Norm, Dreiecksnorm
trapezförmige Zugehörigkeitsfunktion
dreieckförmige Zugehörigkeitsfunktion
triangulare Konorm, *t*-Konorm, *s*-Norm
triangulare Norm, *t*-Norm, Dreiecks-Norm
Wahrheitstabelle, Logiktabelle

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
acker 1257, 1262
acos 1168
acosd 1168
acosh 1169
acot 1168
acotd 1168
acoth 1169
acsc 1168
acscc 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

Beschreibfungsfunktion 896

–, Methode der 893

BESSEL-Filter 479

Betrag 108, 291

Betragsoptimum 504, 515

Bewegungssachse 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
ctranspose 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
Differenziationsssatz 70, 606
Differenzierverstärkung 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 verzögterer Rückführung 1020
 dss 1179
 dssdata 1179
 DT_t-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
 Einheitssprungfolge 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
 expr 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
 Führungs frequenzgangfunktion 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
 Gesamtträgheitsmoment 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

Gleichaktverstärkung 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

Grenzschwingung 962

–, Stabilität 962

grenzstabil 973

Grenzwertsatz 72

Grenzwertsätze 362

Grenzzyklus 884, 968

grid 1153 f., 1169

Ground 1459

Grundlast 992

gtext 1156, 1169

H

Haltelement 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

Implikationsprämissen 1067

Impulsantwort 61, 1186

impulse 1176, 1186, 1191, 1222, 1242, 1262

Impulsfolgefunktion 598, 601

Impulsfunktion 61

Impulsübertragung 643

In Bus Element 1428, 1459

InI 1429, 1459

Index Vector 1446

indirekte Gegenkopplung 230

inf 1168

Inferenz 1066, 1105

–, Kompositionssregel 1067, 1082

–, regelbasierte 1071, 1078

Inferenzeinheit 1078

initial 1248, 1262

Initialize Function 1464

Import 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
 IT_t-Element 428
 IT_t-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-Variablen 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 Zustandsdifferenzialgleichung 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
Massenkraft 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 Grundschaltung 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

Outport 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
 Phasenanhebung 304
 Phasenbedingung 256
 Phasenebene 966
 –, Methode der 966
 Phasengang 114, 292
 Phasenminimumssystem 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
 plotyy 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
 positive definite Funktion 981
 Potenz-Element 901
 Potenzreihenentwicklung 641
 PPT₁-Element 161, 163
 Prämissen 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_t-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

realmint 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

-, Rückfehler 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
R
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
 Schwerpunktmethode 1084, 1089
 –, vereinfachte 1089
 Schwerpunktsummenmethode 1089
 Schwerpunktsummen-Verfahren 1092
 –, Dreiecksfunktionen 1096
 –, Trapezfunktionen 1096
 Schwerpunktverfahren 1089, 1100
 –, für erweiterte Zugehörigkeitsfunktionen 1102
 –, vereinfachtes 1092
 Schwingfall 58
 –, grenzstabilier 129
 –, instabiler 129
 –, stabiler 129
- Scope 1455
 Script-File 1147 f.
 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
 Signalflussplan 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
Störgröbenaufschaltung 530
stabiler Schwingfall 129
Stabilität 235, 237, 686, 972
–, absolute 984
– einer Differenzengleichung 595
– von Abtastsystemen 595
– von Grenzschwingungen 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
Stellgröbenertragungsfunktion 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
Störgröbenaufschaltung 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
 surffc 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 1172 f., 1176, 1179
 tfdata 1174, 1179
 Tieppass 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- 63 f.
 –, 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, 314 f., 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

–, Signalflussstrukturen 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

Versorgungsgröße 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

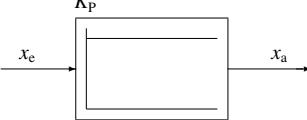
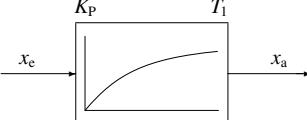
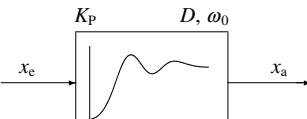
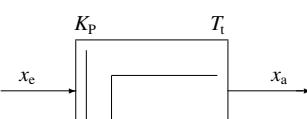
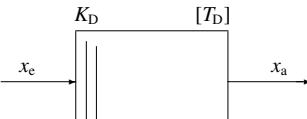
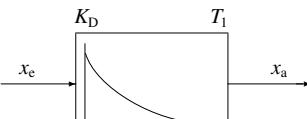
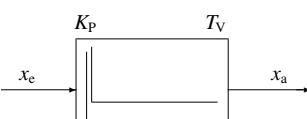
Zeitvariable, diskrete 548

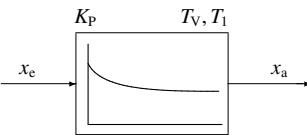
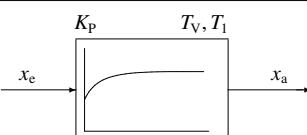
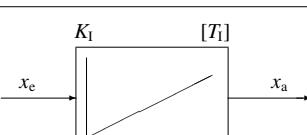
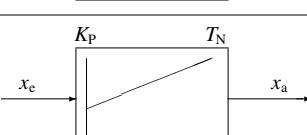
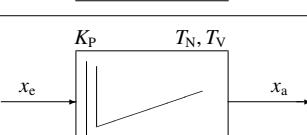
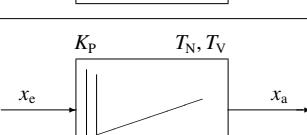
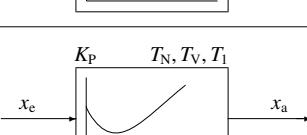
Zero Order Hold 1393

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
Zustandsdifferentialgleichung 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
Zweiorbitalverfahren 954
Zweipunkt-Element 898, 904, 921, 924
- mit Hysterese 911, 927
Zweipunktregekkreis 992
Zweipunktregler 992
- mit nachgebender Rückführung 1017
- mit verzögert-nachgebender Rückführung 1017

Differenzialgleichungen von Regelkreiselementen

Name	Gleichungen im Zeitbereich	Übertragungssymbol
P	$x_a = K_p \cdot x_e$	K_p 
PT ₁	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p \cdot x_e$	K_p T_1 
PT ₂	$\frac{1}{\omega_0^2} \cdot \frac{d^2 x_a}{dt^2} + \frac{2 \cdot D}{\omega_0} \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p \cdot x_e$	K_p D, ω_0 
PT _t	$x_a = K_p \cdot x_e(t - T_t)$	K_p T_t 
D	$x_a = K_D \cdot \frac{dx_e}{dt}, \quad \left[x_a = T_D \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	K_D $[T_D]$ 
DT ₁	$T_1 \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_D \cdot \frac{dx_e}{dt}$	K_D T_1 
PD	$x_a = K_p \cdot \left[T_V \cdot \frac{dx_e}{dt} + x_e \right]$	K_p T_V 

Name	Gleichungen im Zeitbereich	Übertragungssymbol
PDT ₁	$T_l \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p \cdot \left[T_v \cdot \frac{dx_e}{dt} + x_e \right],$ $T_v > T_l$	
PPT ₁	$T_l \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p \cdot \left[T_v \cdot \frac{dx_e}{dt} + x_e \right],$ $T_v < T_l$	
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	$T_l \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p \cdot \left[\frac{T_l + T_N}{T_N} \cdot x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt + (T_l + T_v) \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	
PIDT ₁ multiplikative Form	$T_l \cdot \frac{dx_a}{dt} + x_a = K_p \cdot \left[\frac{T_v + T_N}{T_N} \cdot x_e + \frac{1}{T_N} \int x_e dt + T_v \cdot \frac{dx_e}{dt} \right]$	