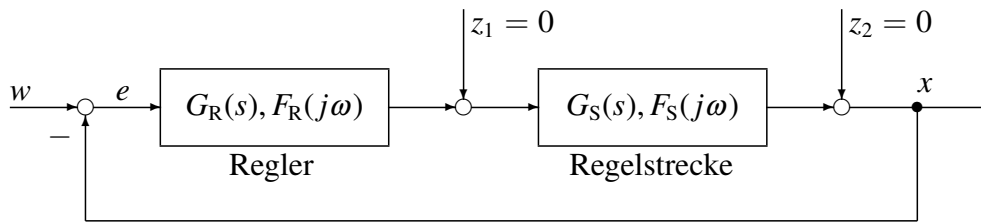


Gleichungen für das Führungsübertragungsverhalten



Gleichungen für die Berechnung mit Übertragungsfunktionen

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

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

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

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

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

Gleichungen für die Berechnung mit Frequenzgangfunktionen

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

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

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

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

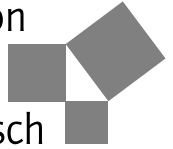
Bei Sprungaufschaltung $w(t) = w_0 \cdot E(t)$ gilt:

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

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

Taschenbuch der Regelungstechnik

mit MATLAB und Simulink



Taschenbuch der Regelungstechnik

mit MATLAB und Simulink

von

Prof. Dr.-Ing. Holger Lutz

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wendt

12., ergänzte Auflage

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

Europa-Nr.: 56788

Autoren:

Dr.-Ing. Holger Lutz, geb. Sinning, Elektromechanikerlehre in einer Firma für Steuer- und Regelungsanlagen, Studium an der Ingenieurschule Kassel zum Ing. grad., nach Berufstätigkeit als graduerter Ingenieur Studium der Elektrotechnik und Regelungstechnik an der TU Berlin zum Dipl.-Ing., Berufstätigkeit, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin im Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Promotion über die Steuerung und Regelung der Bewegungsachsen von Industrierobotern. Mitinhaber eines Ingenieurbüros, danach Professor an der University of Applied Sciences Technische Hochschule Mittelhessen für das Fachgebiet Steuer- und Regelungstechnik im Fachbereich Informationstechnik – Elektrotechnik – Mechatronik.



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

Professor Dr.-Ing. Holger Lutz
Technische Hochschule Mittelhessen
61169 Friedberg

Dr.-Ing. Wolfgang Wendt, Elektromechanikerlehre in einer Firma für steuerungs- und regelungstechnische Geräte, Studium an der Fachhochschule Darmstadt zum Ing. grad., danach Studium der Elektrotechnik an der TU Berlin zum Dipl.-Ing., wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin im Fachbereich Konstruktion und Fertigung, Promotion über die Regelung von bahngesteuerten Arbeitsmaschinen, Mitarbeiter an einem staatlichen Forschungsinstitut, danach Professor an der University of Applied Sciences Hochschule Esslingen für das Fachgebiet Steuer- und Regelungstechnik in der Fakultät Maschinenbau.



Professor Dr.-Ing. Wolfgang Wendt
Hochschule Esslingen
73728 Esslingen am Neckar

12., ergänzte Auflage 2021

Druck 5 4 3 2 1

ISBN 978-3-8085-5870-6

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

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

Satz: Satzherstellung Dr. Naake, 09212 Limbach-Oberfrohna
Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Druck: Legatoria Editoriale Giovanni 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 Programmpaket Simulink[®], mit dem dynamische Systeme modelliert, simuliert und analysiert werden können. Zwei Abschnitte befassen sich daher mit der Anwendung des Programmsystems MATLAB, Simulink auf Problemstellungen der Regelungstechnik.¹ Die Beschreibungen der regelungstechnischen Verfahren und Methoden werden durch überschaubare Beispiele ergänzt. Zu vielen Beispielen sind m-Files und Simulink-Modelle für das Programmsystem MATLAB, Simulink angegeben², die mit den aktuellen Software-Versionen erstellt worden sind.

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

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

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

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

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

<https://www.thm.de/iem/fachbereich/team/ehemalige/content/979-holger-lutz-17/280-downloadbereich-lutz.html>

Autoren und Verlag Europa-Lehrmittel

Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG

Düsselderger Str. 23

42781 Haan-Gruiten

lektorat@europa-lehrmittel.de

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

E-Mail: holger.lutz@iem.thm.de

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

E-Mail: wolfgang.wendt@hs-esslingen.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Regelungstechnik	23
1.1	Steuerungen und Regelungen	23
1.2	Begriffe der Regelungstechnik	24
2	Hilfsmittel zur Darstellung von regelungstechnischen Strukturen	29
2.1	Wirkungs- oder 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	Differenziations- und Integrationssatz	70
3.5.4.6	Faltungssatz	72
3.5.4.7	Grenzwertsätze	72
3.5.4.8	LAPLACE-Transformation von periodischen Funktionen	74
3.5.4.9	Lösung von linearen Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten mithilfe der LAPLACE-Transformation	75
3.5.5	Übertragungsfunktionen von Übertragungselementen	77
3.5.6	Partialbruchzerlegung	78
3.5.6.1	Allgemeines	78
3.5.6.2	Einfache reelle Polstellen	78
3.5.6.3	Mehrfache reelle Polstellen	79
3.5.6.4	Einfache komplexe Polstellen	80
3.5.7	Charakteristische Gleichung und Pol-Nullstellenplan	80
3.5.8	Tabellen für die LAPLACE-Transformation	83
3.6	Frequenzgang von Übertragungselementen	107
3.6.1	Dynamisches Verhalten im Frequenzbereich	107
3.6.2	Frequenzgang	107
3.6.3	Berechnung des Frequenzgangs aus der Differenzialgleichung des Übertragungselements	110
3.6.4	Frequenzgang und Übertragungsfunktion	112
3.6.5	Frequenzgang und Ortskurve	113
3.6.6	Frequenzgang und BODE-Diagramm	114
3.6.7	Frequenzgang und Sprungantwort	116
4	Elemente von Regleinrichtungen 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 _t -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	222
5.1.4	Gleichungen für das Störungsübertragungsverhalten von Laststörgrößen	222
5.1.5	Berechnungsbeispiel	223
5.1.6	Gleichungen für das Stellgrößenverhalten	225
5.2	Ausregelbarkeit von Störungen	228
5.3	Gleichungen für Regelkreise mit indirekter Gegenkopplung	229
5.4	Stationäre Regelfehler höherer Ordnung	232
6	Stabilität von Regelkreisen	235
6.1	Entstehung des Stabilitätsproblems bei Regelkreisen	235
6.2	Definition der Stabilität	236
6.3	Verfahren zur Stabilitätsbestimmung	239
6.3.1	Algebraische und geometrische Stabilitätskriterien	239
6.3.2	ROUTH-Kriterium	240
6.3.2.1	Eigenschaften des ROUTH-Verfahrens	240
6.3.2.2	Stabilitätskriterium nach ROUTH	240
6.3.2.3	Abhängigkeit der Stabilität von einem Parameter	242
6.3.3	Kriterium von HURWITZ	243
6.3.3.1	Allgemeines	243
6.3.3.2	Stabilitätskriterium nach HURWITZ	243
6.3.4	NYQUIST-Kriterium	245
6.3.4.1	Eigenschaften des NYQUIST-Kriteriums	245
6.3.4.2	Vereinfachtes Stabilitätskriterium nach NYQUIST	245
6.3.4.3	Beispiele zum vereinfachten NYQUIST-Kriterium	247
6.3.4.4	Vollständiges NYQUIST-Kriterium	248

6.3.4.5	Beispiele zum vollständigen NYQUIST-Kriterium	250
6.3.4.6	Stabilität von Regelungssystemen mit Totzeit	251
6.4	Wurzelortskurven	253
6.4.1	Einleitung	253
6.4.2	Kriterium für das Wurzelortskurven-Verfahren (WOK-Verfahren)	255
6.4.3	Regeln für die Konstruktion von Wurzelortskurven	261
6.4.3.1	Allgemeines	261
6.4.3.2	Prinzipieller Verlauf der WOK (Regel 1)	262
6.4.3.3	WOK auf der reellen Achse (Regel 2)	262
6.4.3.4	Schnittpunkt der Asymptoten (Regel 3)	263
6.4.3.5	Anstiegswinkel der Asymptoten (Regel 4)	263
6.4.3.6	Verzweigungspunkte (Regel 5)	263
6.4.3.7	Schnittwinkel der WOK-Zweige in Verzweigungspunkten (Regel 6)	266
6.4.3.8	Schnittpunkte der WOK mit der imaginären Achse (Regel 7)	268
6.4.3.9	Austrittswinkel der WOK aus Polstellen, Eintrittswinkel in Nullstellen (Regel 8)	269
6.4.3.10	Skalierung der WOK mit dem Kurvenparameter (Regel 9)	271
6.4.3.11	Tabelle der Schritte des WOK-Verfahrens	273
6.4.3.12	Anwendung des WOK-Verfahrens	274
6.4.3.13	Tabelle mit WOK für Regelungssysteme bis IV. Ordnung	279
6.4.4	Erweiterung der Anwendung des WOK-Verfahrens	283
6.4.4.1	WOK-Verfahren für andere Regelkreisparameter	283
6.4.4.2	WOK für mehrere Kurvenparameter (WOK-Kontur)	285
6.4.5	Zusammenfassung	289
7	BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen	291
7.1	Einleitung	291
7.2	BODE-Diagramme	291
7.2.1	BODE-Diagramm des offenen Regelkreises	291
7.2.2	BODE-Diagramme der wichtigsten Übertragungselemente	292
7.2.2.1	Einleitung	292
7.2.2.2	Proportional-Element (P-Element)	292
7.2.2.3	Integral-Element (I-Element)	293
7.2.2.4	Differenzial-Element (D-Element)	293
7.2.2.5	Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung (PT ₁ -Element)	294
7.2.2.6	Proportional-Differenzial-Element (PD-Element)	295
7.2.2.7	Totzeit-Element (PT _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 phasenanhobenden Netzwerken	306
7.4.5	Absenkung des Amplitudengangs	309
7.4.6	Anwendung von amplitudenabsenkenden Netzwerken	310
7.4.7	Zusammenfassung	313

7.5	Zusammenhang zwischen Kenngrößen von Zeit- und Frequenzbereich	314
7.5.1	Anforderungen an das Zeitverhalten von Regelungssystemen	314
7.5.2	Zusammenhang für das Übertragungselement II. Ordnung	314
7.5.2.1	Kenngrößen für das Übertragungselement II. Ordnung	314
7.5.2.2	Berechnungsformeln	316
7.5.2.3	Erweiterung der Anwendung	320
8	Regelrichtungen mit Operationsverstärkern	323
8.1	Prinzipieller Aufbau	323
8.1.1	Aufgaben von Regelrichtungen	323
8.1.2	Kenngrößen von Operationsverstärkern	323
8.1.2.1	Stationäre Kenngrößen	323
8.1.2.2	Dynamische Kenngrößen	324
8.1.2.3	Zusammenfassung	327
8.2	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 Überspringen und ohne periodisches Schwingen	368
9.3.2.5	Sprungantwortverlauf mit Über- und Unterschwingen ohne periodisches Schwingen	369
9.3.2.6	Sprungantwortverläufe mit periodischem Schwingen	371
9.3.2.6.1	Identifikationsmerkmale von PT ₂ -Elementen	371
9.3.2.6.2	PT ₂ -Elemente mit Vorhalt- oder Verzögerungselement	377
9.3.2.7	Sprungantwortverläufe von Elementen mit Totzeit	380
9.3.3	Sprungantwortverläufe mit Wendepunkt und ohne Überspringen	381
9.3.3.1	Prinzip des Wendetangentenverfahrens	381
9.3.3.2	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten	383
9.3.3.3	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit gleichen Zeitkonstanten	387
9.3.3.4	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit mehreren Zeitkonstanten	390
9.3.3.5	Zusammenfassung des Wendetangentenverfahrens	394
9.3.3.6	Zeitprozentkennwertmethode	395
9.3.4	Sprungantwortverläufe von Integral-Elementen	400
9.3.4.1	Eigenschaften von Integral-Elementen	400
9.3.4.2	Identifikation von reinen Integral-Elementen	400
9.3.4.3	Identifikation von Integral-Elementen mit Verzögerung	402
9.3.4.4	Identifikation von Integral-Elementen mit Totzeit	405
9.4	Sprungantworten und Identifizierungsgleichungen	407
9.4.1	Einleitung	407
9.4.2	Zusammenstellung von Sprungantwortfunktionen und mathematischen Modellen von Übertragungselementen	407
9.4.3	Zusammenfassung	433

9.5	Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren	434
9.5.1	Stochastische Prozesse, Modellbegriffe	434
9.5.2	MA-Modell (moving-average model)	434
9.5.3	AR-Modell (auto-regressive model)	436
9.5.4	ARMA-Modell (auto-regressive moving-average model)	437
9.5.5	Modelle mit zusätzlicher deterministischer Eingangsgröße	438
9.5.5.1	Allgemeine Modellstruktur	438
9.5.5.2	Modellarten mit deterministischer und stochastischer Eingangsgröße	440
9.5.6	Parameterschätzung von ARX-Modellen	440
9.5.6.1	Prinzip der Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren (experimentelle Identifikation)	440
9.5.6.2	Fehlerarten für die Anwendung von Parameterschätzverfahren	441
9.5.6.3	Modellbestimmung bei Prozessen mit vernachlässigbaren Störgrößen	443
9.5.6.4	Modellbestimmung mit der Methode der kleinsten Quadrate	449
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise, erweiterte Regelkreisstrukturen	457
10.1	Einleitung	457
10.2	Parameteroptimierung im Zeitbereich	458
10.2.1	Begriff der Regelfläche	458
10.2.2	Integralkriterien im Zeitbereich, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	459
10.2.2.1	Integralkriterium der Linearen Regelfläche, IE-Kriterium (Integrated Error criterion)	459
10.2.2.2	Integralkriterien der Betragsregelfläche, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	461
10.2.2.3	Integralkriterien der Quadratischen Regelfläche	486
10.2.3	Berechnung der Integralkriterien für Standardregelkreise II. Ordnung	490
10.3	Einstellregeln für Regelkreise	493
10.3.1	Anwendung der Einstellregeln	493
10.3.2	Einstellregeln von ZIEGLER und NICHOLS	494
10.3.3	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK	495
10.3.4	Regler-Einstellung nach der T-Summen-Regel	497
10.3.4.1	Summenzeitkonstante einer Regelstrecke	497
10.3.4.2	Experimentelle Bestimmung der Summenzeitkonstanten	499
10.3.4.3	T-Summen-Regel für PI- und PID-Regler	499
10.3.4.4	Anwendung der T-Summen-Regel	501
10.4	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Betragsoptimum	504
10.4.1	Prinzip der Optimierung im Frequenzbereich	504
10.4.2	Einstellung von Regelkreisen nach dem Betragsoptimum	504
10.4.3	Anwendung des Verfahrens	508
10.4.3.1	Vereinfachung von Streckenübertragungsfunktionen	508
10.4.3.2	Satz von der Summe der kleinen Zeitkonstanten	508
10.4.3.3	Vereinfachung von Totzeitelementen	509
10.4.4	Anwendung des Betragsoptimums bei Regelstrecken höherer Ordnung	509
10.4.4.1	Kompensation einer großen Zeitkonstanten	509
10.4.4.2	Kompensation von zwei großen Zeitkonstanten	510
10.4.5	Einstellregeln für das Betragsoptimum	515
10.5	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Symmetrisches Optimum	516
10.5.1	Prinzip des Verfahrens und Anwendung bei IT ₁ -Regelstrecken	516
10.5.2	Standardeinstellung des Symmetrischen Optimums	521

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

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

11.8	Diskretisierung von kontinuierlichen Übertragungsfunktionen	715
11.8.1	Anwendung von Diskretisierungsverfahren	715
11.8.2	Substitutionsverfahren	716
11.8.3	Stabilität der Verfahren	723
11.8.4	Systemantwortinvariante Transformationen	726
11.8.4.1	Invariante Systemreaktionen im Zeitbereich	726
11.8.4.2	Impulsinvariante Transformation	727
11.8.4.3	Sprunginvariante Transformation	727
12	Zustandsregelungen	729
12.1	Allgemeines	729
12.2	Mathematische Methoden zur Berechnung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	730
12.2.1	Beschreibung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	730
12.2.1.1	Allgemeine Form des Gleichungssystems	730
12.2.1.2	Beschreibung linearer Mehrgrößensysteme mit Zustandsvariablen	731
12.2.1.3	Beschreibung linearer Eingrößensysteme mit Zustandsvariablen	735
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich	737
12.2.2.1	Berechnung der Matrix-e-Funktion	737
12.2.2.2	Differenziation der Matrix-e-Funktion	738
12.2.2.3	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	738
12.2.2.4	Transitionsmatrix	739
12.2.3	Lösung der Zustandsgleichung im Frequenzbereich	743
12.2.4	Normalformen von Übertragungssystemen	745
12.2.4.1	Allgemeines	745
12.2.4.2	Regelungsnormalform	745
12.2.4.3	Beobachtungsnormalform	750
12.2.4.4	Zusammenfassung	755
12.2.5	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit von Übertragungssystemen	755
12.2.5.1	Steuerbarkeit	755
12.2.5.2	Beobachtbarkeit	757
12.2.5.3	Untersuchung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit eines Regelungssystems	759
12.2.6	Transformation auf Regelungs- und Beobachtungsnormalform	761
12.2.6.1	Allgemeine Form der Transformationsgleichungen	761
12.2.6.2	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Regelungsnormalform	762
12.2.6.3	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Beobachtungsnormalform	764
12.3	Regelung durch Zustandsrückführung	766
12.3.1	Allgemeines	766
12.3.2	Berechnung von Zustandsregelungen	767
12.3.2.1	Ermittlung von Zustandsreglern durch Polvorgabe	767
12.3.2.2	Berechnung von Vorfilter und Zustandsregler	770
12.3.2.3	Berechnung von Zustandsreglern mit der Formel von ACKERMANN	779
12.3.3	Zustandsregelung mit Beobachter	786
12.3.3.1	Prinzipielle Arbeitsweise von Beobachtern	786
12.3.3.2	Ermittlung von Zustandsbeobachtern durch Polvorgabe	789
12.3.4	Systematische Vorgehensweise bei der Berechnung von Zustandsreglern und Zustandsbeobachtern	795
12.3.5	Zusammenfassung	796

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

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

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

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

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

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

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

17.2.2.2	Editieren von Blöcken	1300
17.2.2.3	Wirkungslinien editieren	1301
17.2.2.4	Kommentar einfügen	1304
17.3	Simulation zeitkontinuierlicher Regelungen	1305
17.3.1	Allgemeines	1305
17.3.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Continuous Block Library	1305
17.3.2.1	Sprungantwort mit Step-, Integrator-, Mux- und Scope-Block	1305
17.3.2.2	Anstiegsantwort mit Ramp-, Derivative- und Scope-Block	1307
17.3.2.3	Impulsantwort mit Step-, Sum-, Transfer Fcn-, Mux- und Scope-Block	1309
17.3.2.4	Anstiegsantwort mit Ramp-, Transport Delay-, Zero-Pole-, Mux- und Scope-Block	1310
17.3.2.5	Regelkreis mit Gain-, State-Space- und Floating Scope-Block	1310
17.3.3	Geschwindigkeitsregelung mit trapezförmigem Führungsgrößenprofil	1312
17.3.4	Ermittlung eines Zustandsmodells mit der Funktion linmod	1314
17.3.5	Streckensteuerung für eine Linearachse	1315
17.3.6	Streckensteuerung für eine Linearachse mit Führungsgrößenvorsteuerung	1318
17.3.7	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben	1319
17.3.8	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben und Führungsgrößenvorsteuerung	1324
17.4	Simulation und Programmierung mit Simulink	1325
17.4.1	Ablauf einer Simulation	1325
17.4.2	Algebraische Schleifen	1326
17.4.3	Numerische Lösungsverfahren und Simulations-Parameter für Simulink-Modelle	1328
17.4.3.1	Numerische Lösungsverfahren	1328
17.4.3.2	Simulations-Parameter	1329
17.4.3.3	Simulation einer Lageregelung mit Zerspanungsprozess (steifes System)	1331
17.4.4	Start der Simulation von der MATLAB-Umgebung	1336
17.4.4.1	Allgemeines	1336
17.4.4.2	Simulation eines Gleichstrommotors mit Getriebe	1336
17.4.4.3	Setzen und Abfragen der Simulationsparameter mit simset und simget	1339
17.4.5	Simulink-Subsysteme (Untersysteme, hierarchische Modelle)	1340
17.4.5.1	Allgemeines	1340
17.4.5.2	Strukturierung von Simulink-Modellen durch Untersysteme	1340
17.4.5.3	Strukturierung von Simulink-Modellen mit Subsystem-Blöcken	1342
17.5	Simulation digitaler Regelungen	1344
17.5.1	Allgemeines	1344
17.5.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Discrete Block Library	1344
17.5.2.1	Sprungantwortfolge einer zeitdiskreten PT ₁ -Regelstrecke mit Unit Delay-Block	1344
17.5.2.2	Sprungantwortfolge mit Discrete-Time Integrator-Block	1346
17.5.2.3	Sprungverhalten einer I ₂ -Regelstrecke mit Halteglied	1348
17.5.2.4	Einschleifiger digitaler Regelkreis mit Zero-Order Hold-Block	1350
17.5.3	Digitale Kaskadenregelung mit unterschiedlichen Abtastzeiten	1351
17.5.4	Digitale Zustandsregelungen	1354
17.5.4.1	Diskretisierung einer Zustandsregelung	1354
17.5.4.2	Zustands-Drehzahlregelung mit zeitdiskretem Streckenmodell	1358
17.5.4.3	Zustands-Drehzahlregelung mit Zustandsbeobachter	1359
17.5.5	Lösungsverfahren für digitale Regelungen	1360
17.6	Simulation nichtlinearer und zeitvarianter Systeme	1360
17.6.1	Allgemeines	1360

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

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

1 Einführung in die Regelungstechnik

1.1 Steuerungen und Regelungen

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

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

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

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

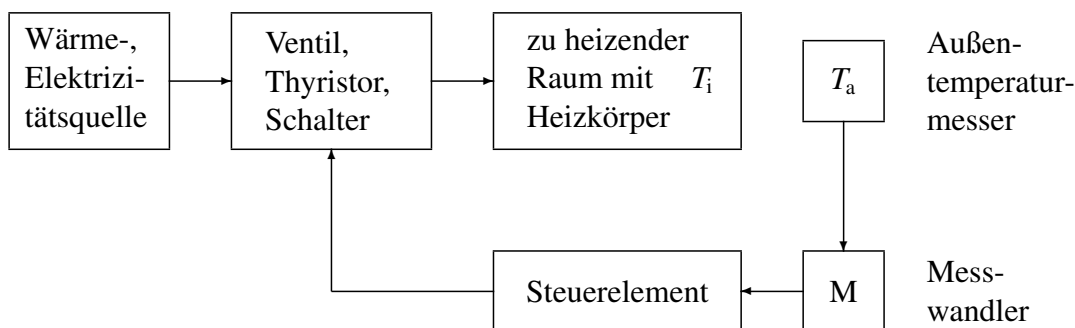


Bild 1.1-1: Technologieschema einer Temperatursteuerung

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

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

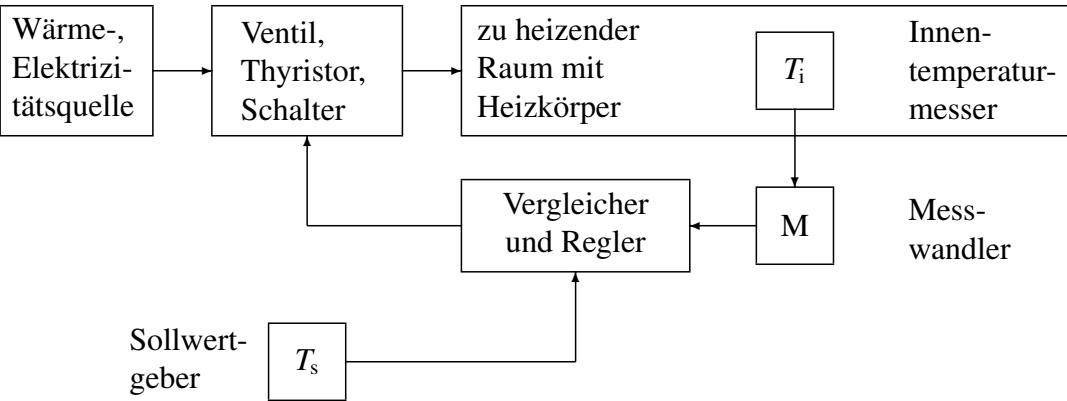


Bild 1.1-2: Technologieschema einer Temperaturregelung

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

Tabelle 1.1-1: Merkmale von Regelungen und Steuerungen

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

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

1.2 Begriffe der Regelungstechnik

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

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

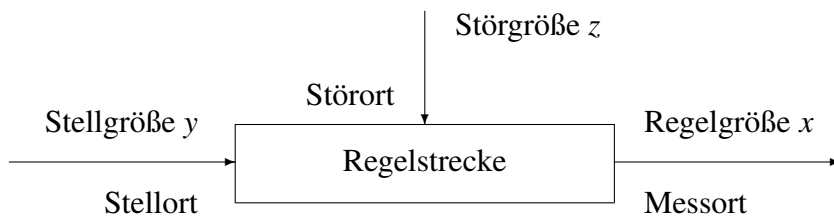


Bild 1.2-1: Regelstrecke mit Ein- und Ausgangsgrößen

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

$$e = w - x$$

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

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

Zwischen Messort und Stellort liegt die **Regeleinrichtung**. Die Regeleinrichtung besteht aus Messeinrichtung, Vergleich, 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.

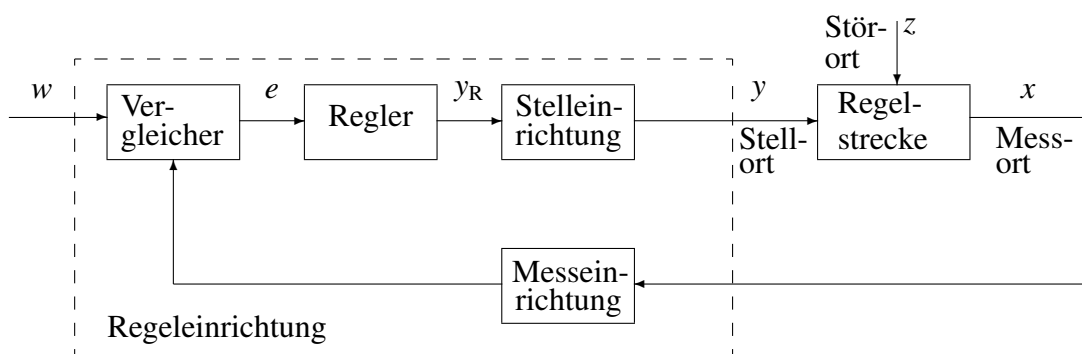


Bild 1.2-2: Regelungstechnische Elemente und Begriffe

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 Vergleichler zugeführt. Die Führungsgröße (Solltemperatur) kann mit einem Spannungsteiler eingestellt werden.

Beispiel 1.2-1: Wirkungsweise einer Drehzahlregelung

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

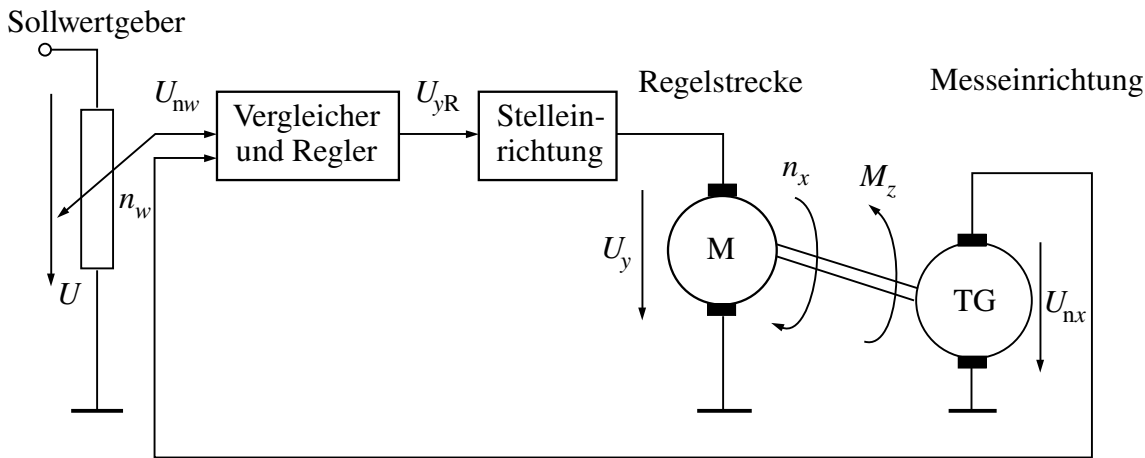


Bild 1.2-3: Technologieschema einer Drehzahlregelung

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

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

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

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

die mit der Reglerverstärkung K_R verstärkt wird:

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

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

$$U_y = U_{yR}.$$

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

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

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

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

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

2 Hilfsmittel zur Darstellung von regelungstechnischen Strukturen

2.1 Wirkungs- oder Signalflusspläne

Bei der Entwicklung von Regelungs- und Steuerungssystemen wird zur Beschreibung zunächst ein **Technologieschema** verwendet. Das Technologieschema zeigt nur die **prinzipielle Wirkungsweise** der Systeme. Zur Berechnung ist es nötig, die physikalischen Vorgänge in Geräten und Anlagen der Regelungstechnik mathematisch zu formulieren, ein **mathematisches Modell** zu bilden.

Ein Hilfsmittel zur Darstellung sind **Wirkungs- oder Signalflusspläne**. Dabei geht man von einem Übertragungssystem aus, das schematisch als Übertragungsblock dargestellt wird.

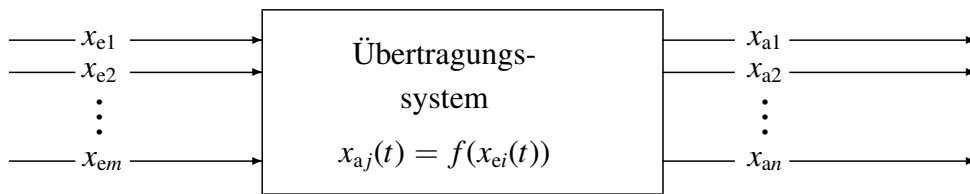


Bild 2.1-1: Übertragungssystem

Hierbei sind x_{ei} ($i = 1, \dots, m$) Eingangsgrößen und x_{aj} ($j = 1, \dots, n$) Ausgangsgrößen. Die Ein- und Ausgangsgrößen können sein

- Zeitfunktionen $x_e(t), x_a(t)$,
- harmonische Funktionen (Frequenzgangfunktionen) $x_e(j\omega), x_a(j\omega)$,
- LAPLACE-transformierte Zeitfunktionen $x_e(s), x_a(s)$,
- z-transformierte Zeitfunktionen $x_e(z), x_a(z)$.

Systeme mit mehreren Ein- und Ausgangssignalen werden als **Mehrfachsysteme** bezeichnet. Zur Analyse und Berechnung werden die Mehrfachsysteme zerlegt in

- **Einfachsysteme oder Übertragungsblöcke** (Systeme mit einer Ein- und einer Ausgangsgröße) und
- **Verknüpfungselemente**, die mehrere Größen (Signale) zusammenfassen.

Mit den Übertragungsblöcken, für Elemente des Regelkreises gibt es Übertragungssymbole, werden die **Kausalzusammenhänge** durch Verknüpfung der Eingangs- und Ausgangsgrößen dargestellt. Die dabei entstehende Darstellung wird **Wirkungs- oder Signalflussplan** genannt.

2.2 Elemente des Wirkungs- oder Signalflussplans

2.2.1 Übertragungsblock und Wirkungslinie

Die wirkungsmäßige (kausale) Abhängigkeit der Ausgangsgröße von der Eingangsgröße wird durch einen **Übertragungsblock** (Rechteck) gekennzeichnet. An den Übertragungsblock wird für jedes Signal eine Wirkungslinie gezeichnet, wobei die Pfeilspitze die Wirkungsrichtung angibt:

- hinweisender Pfeil: Eingangsgröße,
- wegweisender Pfeil: Ausgangsgröße.

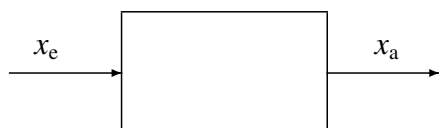


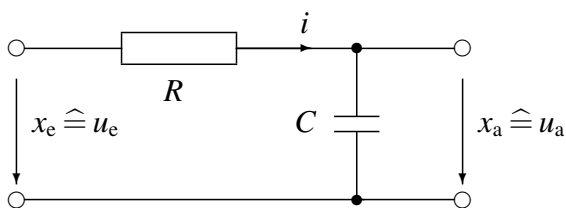
Bild 2.2-1: Übertragungsblock

Das Verhalten eines Übertragungsblocks wird angegeben mit der

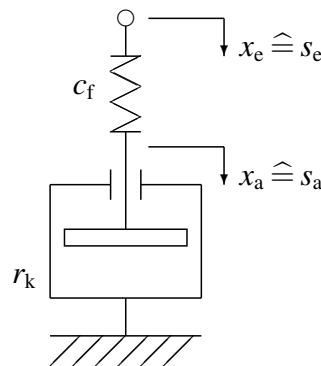
- Differenzialgleichung für das allgemeine Zeitverhalten des Übertragungssystems,
- Sprungantwort: Reaktion des Systems bei plötzlicher Änderung der Eingangsgröße,
- Frequenzgangfunktion: Übertragungsfunktion des Systems bei harmonischen Eingangsfunktionen,
- Übertragungsfunktion für LAPLACE-transformierte Eingangsgrößen,
- Übertragungsfunktion für z -transformierte Eingangsgrößen.

Beispiel 2.2-1: Elektrisches und mechanisches Verzögerungselement

Widerstand-Kondensator-Schaltung
(RC-Element)



Feder-Dämpfer-Element



Die Spannung wird von $u_e = 0$ auf u_{e0} erhöht:

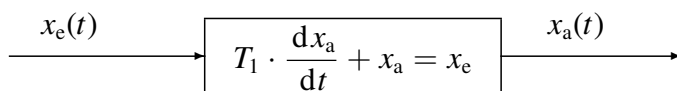
$$\begin{aligned} u_e(t) &= R \cdot i(t) + u_a(t), \\ i(t) &= C \cdot \frac{du_a(t)}{dt}, \\ T_1 &= R \cdot C, \\ T_1 \cdot \frac{du_a(t)}{dt} + u_a(t) &= u_e(t). \end{aligned}$$

Die Position wird von $s_e = 0$ auf s_{e0} verändert:

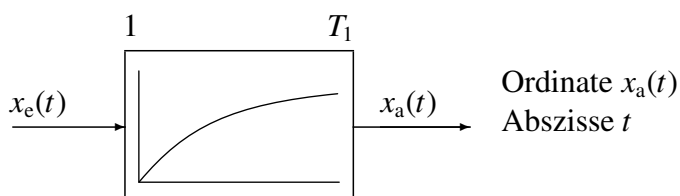
$$\begin{aligned} r_k \cdot \frac{ds_a(t)}{dt} &= c_f \cdot (s_e(t) - s_a(t)), \\ r_k \cdot \frac{ds_a(t)}{dt} + c_f \cdot s_a(t) &= c_f \cdot s_e(t), \\ T_1 &= r_k / c_f, \\ T_1 \cdot \frac{ds_a(t)}{dt} + s_a(t) &= s_e(t). \end{aligned}$$

Differenzialgleichung, Sprungantwortfunktion, Frequenzgang- und Übertragungsfunktion der Elemente haben gleiche Struktur (siehe Kapitel 3):

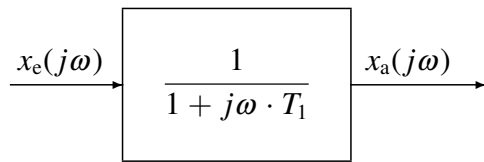
Differenzialgleichung



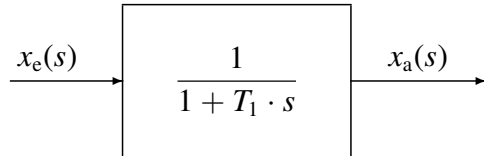
Sprungantwortfunktion



Frequenzgangfunktion



LAPLACE-Übertragungsfunktion

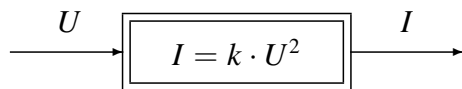


Die Sprungantwortfunktion gibt den Verlauf der Ausgangsgröße $x_a(t)$ bei sprungförmiger Veränderung der Eingangsgröße $x_e(t)$ an. Für das hier angegebene Element mit der Differenzialgleichung I. Ordnung lautet sie:

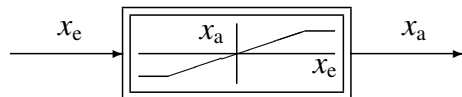
$$x_a(t) = x_{e0} \cdot (1 - e^{-t/T_1}), \quad x_e(t) = x_{e0} \quad \text{für} \quad t > 0.$$

Nichtlineare Systeme können ebenfalls in Signalflussplänen dargestellt werden.

Steuergleichung



stationäre Kennlinie

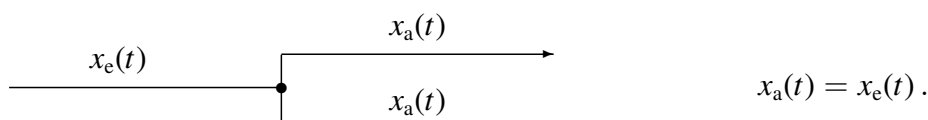


Mit der obenstehenden Kennlinie wird das stationäre Verhalten eines Verstärkers mit Begrenzung beschrieben.

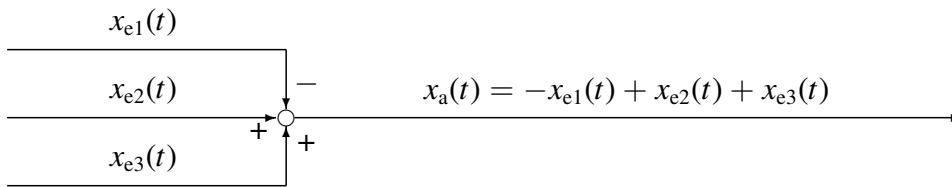
2.2.2 Verknüpfungselemente

Mit Verknüpfungselementen werden Übertragungsblöcke verbunden. Folgende Verknüpfungen sind gebräuchlich:

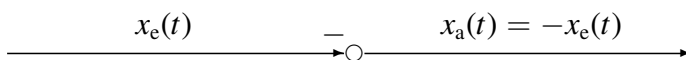
- Verzweigung,
- Summation, Inversion,
- Multiplikation,
- Division.
- **Verzweigungselement:** Das Signal verzweigt sich. Jede der Ausgangsgrößen ist gleich der Eingangsgröße.



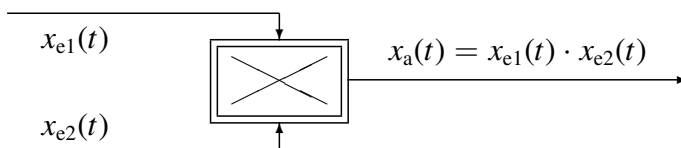
- **Summationselement:** Die ankommenden Größen werden unter Berücksichtigung der Vorzeichen zu einer abgehenden Größe zusammengefasst. Pluszeichen können weggelassen werden, das Minuszeichen ist anzugeben.



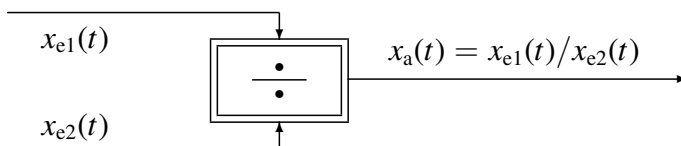
- **Inversionsstelle:**



- **Multiplikationsstelle:**



- **Divisionsstelle:**

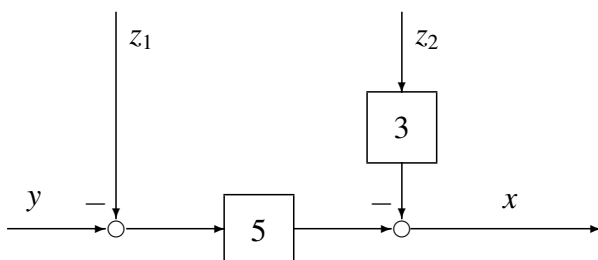


Die Wirkungslinien sind stets gerichtet. Es gibt keine Rückwirkungen über die Wirkungslinien, ebenso werden die Übertragungsblöcke rückwirkungsfrei angenommen. Vorhandene Rückwirkungen müssen durch Wirkungslinien dargestellt werden.

Beispiel 2.2-2: Folgende Gleichungen sind durch Signalflusspläne darzustellen.

- a) Regelstreckengleichung mit zwei Störgrößen z_1, z_2 . Die Versorgungsstörgröße z_1 vermindert die Eingangsleistung der Regelstrecke, z_2 als Laststörgröße verringert direkt die Regelgröße x .

$$x = 5 \cdot (y - z_1) - 3 \cdot z_2$$



- b) Integrierende und differenzierende Elemente:

$$x_a(t) = \frac{1}{T_I} \cdot \int x_e(t) \, dt$$



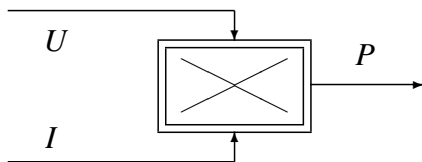
$$x_a(t) = T_D \cdot \frac{dx_e(t)}{dt}$$



Gleichungen, die Integrationen oder Differenziationen enthalten, werden im Allgemeinen durch Sprungantwort, Frequenzgangfunktion oder Übertragungsfunktion dargestellt (Kapitel 3).

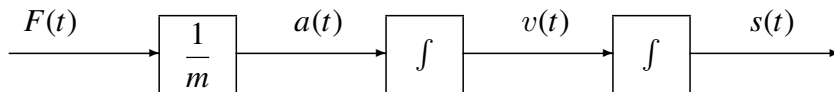
c) Gleichung für die elektrische Leistung P :

$$P = U \cdot I.$$



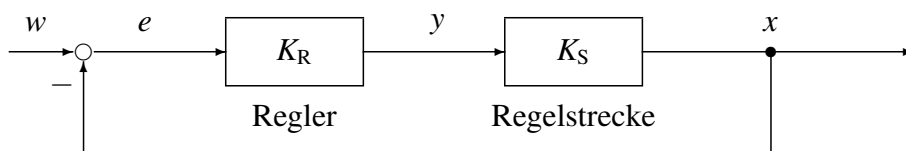
d) Zusammenhang zwischen Kraft F , Beschleunigung a und Weg s bei einer Masse m :

$$a(t) = \frac{F(t)}{m}, \quad v(t) = \int a(t) dt, \quad s(t) = \int v(t) dt.$$



e) Gleichungen eines Regelkreises mit Proportional-Elementen:

$$e = w - x, \quad y = K_R \cdot e, \quad x = K_S \cdot y.$$



Bei den Gleichungen für die Übertragungselemente der Regelungstechnik gilt folgende Vereinbarung: Links steht die Ausgangsgröße des Elements, rechts stehen die Eingangsgrößen.

2.3 Einfache Signalflussstrukturen und Vereinfachungsregeln

2.3.1 Anwendung der Wirkungs- oder Signalflusspläne

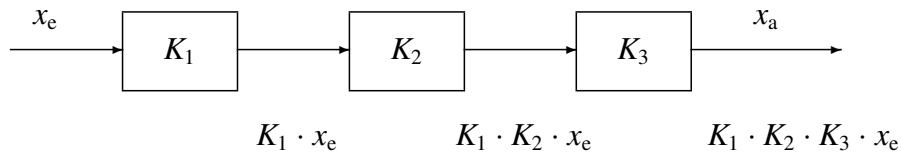
Die im Folgenden angegebenen Vereinfachungs- und Umformungsregeln für Signalflussstrukturen gelten für Regelkreise, die mit

- Proportional-Elementen,
- Frequenzgangfunktionen,
- LAPLACE-Übertragungsfunktionen,
- z-Übertragungsfunktionen

dargestellt werden können. Der wichtigste Vorteil ist dabei, dass sich die Ausgangsgröße durch **Multiplikation** mit der Eingangsgröße ergibt. Die Vereinfachungs- und Umformungsregeln werden in den folgenden Beispielen auf Proportional-Elemente ohne Verzögerung angewendet.

2.3.2 Kettenstruktur

Die Reihenschaltung von mehreren Übertragungsblöcken lässt sich durch einen Übertragungsblock darstellen.

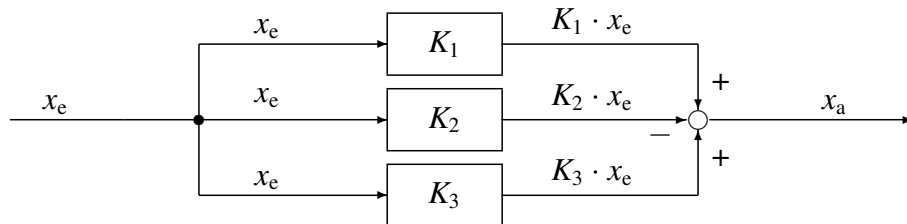


Der resultierende Übertragungsfaktor einer **Kettenstruktur** ergibt sich durch Multiplikation der einzelnen Übertragungsfaktoren.

$$x_a = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot x_e = K \cdot x_e, \quad K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3.$$

2.3.3 Parallelstruktur

Die Parallelschaltung mehrerer Blöcke kann durch einen Übertragungsblock ersetzt werden.

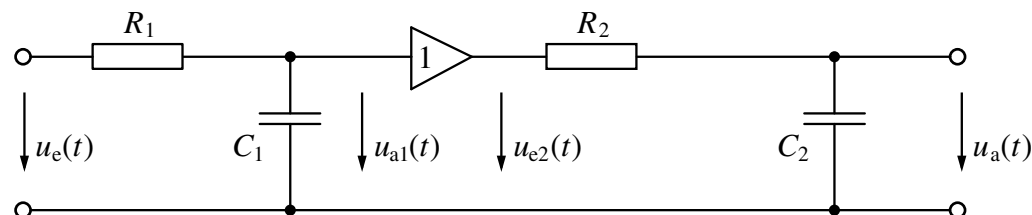


Der resultierende Übertragungsfaktor einer **Parallelstruktur** ergibt sich aus der Summation der einzelnen Übertragungsfaktoren, wobei die Vorzeichen der einzelnen Eingangsgrößen am Summationspunkt berücksichtigt werden müssen.

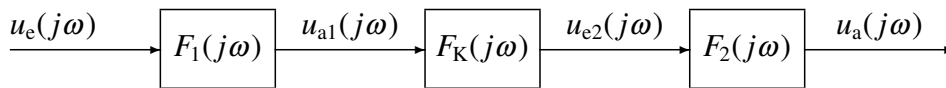
$$x_a = (K_1 - K_2 + K_3) \cdot x_e, \quad x_a = K \cdot x_e, \quad K = K_1 - K_2 + K_3.$$

Beispiel 2.3-1: Beispiel aus der Elektrotechnik

Berechnung des Frequenzgangs einer Reihenschaltung von zwei rückwirkungsfreien (entkoppelten) Verzögerungselementen. Rückwirkungsfrei heißt, dass eine Belastungsänderung des Ausgangs keine Rückwirkung auf das vorige Übertragungselement hat. In dem Beispiel wird bei Belastungsänderung, zum Beispiel Kurzschluss der Ausgangsspannung u_a , die Spannung u_{a1} nicht verändert.



Der Verstärker soll näherungsweise ideal sein: Eingangswiderstand $R_i \rightarrow \infty$, Ausgangswiderstand $R_a \rightarrow 0$, Verstärkung $K = 1$. Die Ausgangsgröße des Systems erhält man durch Lösen einer Differenzialgleichung oder durch **Multiplikation** der transformierten Eingangsgröße mit der Frequenzgang- oder LAPLACE-Übertragungsfunktion. Die einzelnen Übertragungsblöcke werden hier mit Frequenzgangfunktionen im Signalflussplan dargestellt.



Die Frequenzgangfunktion ist der Quotient von Ausgangsgröße durch Eingangsgröße bei einer harmonischen Eingangsgröße. Mit der Spannungsteilerregel ergibt sich:

$$F_1(j\omega) = \frac{u_{a1}(j\omega)}{u_e(j\omega)} = \frac{1/j\omega C_1}{R_1 + 1/j\omega C_1} = \frac{1}{1 + j\omega R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{1 + j\omega T_1},$$

$$F_2(j\omega) = \frac{u_a(j\omega)}{u_{e2}(j\omega)} = \frac{1/j\omega C_2}{R_2 + 1/j\omega C_2} = \frac{1}{1 + j\omega R_2 \cdot C_2} = \frac{1}{1 + j\omega T_2},$$

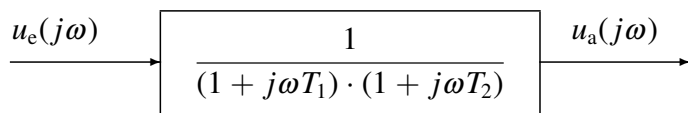
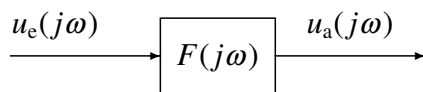
mit den Zeitkonstanten $T_1 = R_1 \cdot C_1$, $T_2 = R_2 \cdot C_2$. Für den Verstärker ist:

$$F_K(j\omega) = \frac{u_{e2}(j\omega)}{u_{a1}(j\omega)} = 1.$$

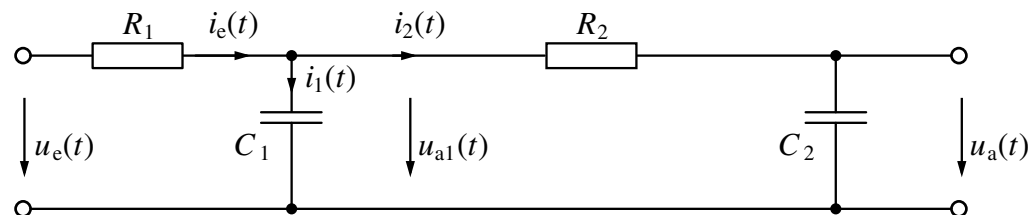
Die Reihenschaltung von mehreren Übertragungsblöcken lässt sich durch einen Übertragungsblock ersetzen:

$$\begin{aligned} F(j\omega) &= \frac{u_a(j\omega)}{u_e(j\omega)} = F_1(j\omega) \cdot F_K(j\omega) \cdot F_2(j\omega) \\ &= \frac{1}{(1 + j\omega T_1) \cdot (1 + j\omega T_2)} = \frac{1}{1 + j\omega \cdot (T_1 + T_2) + (j\omega)^2 \cdot T_1 \cdot T_2}. \end{aligned}$$

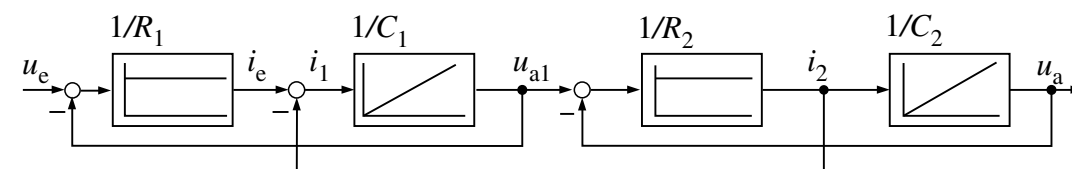
Folgende Wirkungspläne sind mit der Reihenschaltung der drei Elemente gleichwertig:



Bei folgendem Beispiel ist die Rückwirkungsfreiheit nicht gegeben. Eine Änderung der Belastung und damit von u_a wirkt auf u_{a1} zurück. Der Frequenzgang des Systems kann daher nicht aus zwei Einzelfrequenzgängen zusammengesetzt werden.



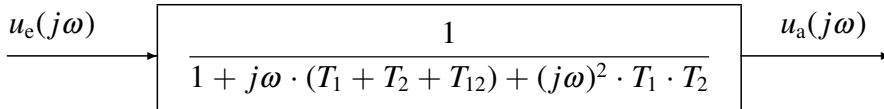
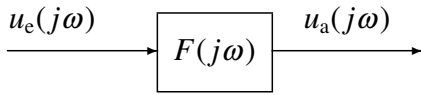
Mit den KIRCHHOFFSchen Sätzen lässt sich das folgende Signalflussbild entwickeln, in das die Rückwirkungen eingezeichnet sind.



Die Berechnung der Frequenzgangfunktion ergibt hier:

$$F(j\omega) = \frac{u_a(j\omega)}{u_e(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega \cdot (T_1 + T_2 + T_{12}) + (j\omega)^2 \cdot T_1 \cdot T_2},$$

mit den Zeitkonstanten $T_1 = R_1 \cdot C_1$, $T_2 = R_2 \cdot C_2$ und der Kopplungszeitkonstanten $T_{12} = R_1 \cdot C_2$. Folgende Wirkungspläne sind gleichwertig:



Beispiel 2.3-2: Beispiel aus der Verfahrenstechnik

Das Zwei-Speicher-Drucksystem hat das gleiche Verhalten wie die oben dargestellte Reihenschaltung von zwei RC-Elementen.

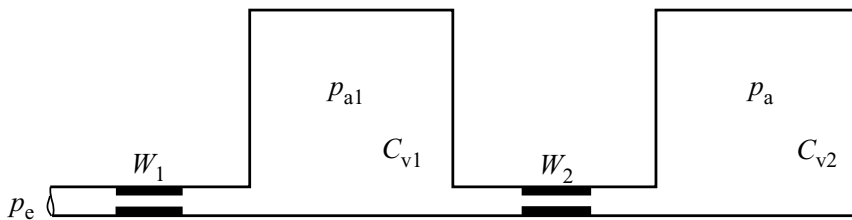


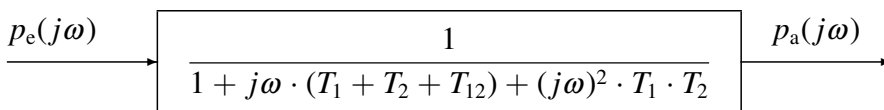
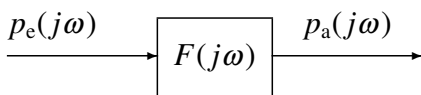
Bild 2.3-1:
Zwei-Speicher-Drucksystem

Die Rohrleitungen bilden die Strömungswiderstände W_1 , W_2 , die unter anderem von den Abmessungen der Leitungen abhängen. Die Speicherkapazitäten C_{v1} und C_{v2} werden im Wesentlichen durch die Volumen der Druckbehälter bestimmt. In beide Kenngrößen gehen zusätzlich die Eigenschaften des Gases ein. Die Berechnungen ergeben ähnliche Frequenzgangfunktionen:

$$F(j\omega) = \frac{p_a(j\omega)}{p_e(j\omega)} = \frac{1}{1 + j\omega \cdot (T_1 + T_2 + T_{12}) + (j\omega)^2 \cdot T_1 \cdot T_2},$$

mit den Zeitkonstanten $T_1 = W_1 \cdot C_{v1}$, $T_2 = W_2 \cdot C_{v2}$ und der Kopplungszeitkonstanten $T_{12} = W_1 \cdot C_{v2}$.

Die Wirkungspläne entsprechen sich.



2.3.4 Kreisstrukturen

2.3.4.1 Struktur mit indirekter Gegenkopplung

Im Rückführzweig des Signalflussplans liegt ein Übertragungsblock mit dem Faktor K_M , die Führungsgröße w wird direkt mit dem Signal $x \cdot K_M$ verglichen. Eine solche Struktur tritt beispielsweise bei X-Y-Schreibern zur Aufzeichnung von Spannungsverläufen auf. Führungsgröße w (Spannung) und Regelgröße x (Position des Schreibstiftes) haben nicht dieselbe Einheit.

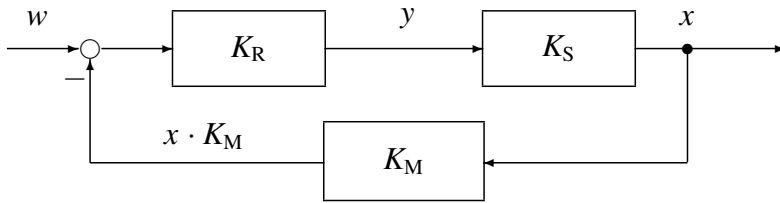
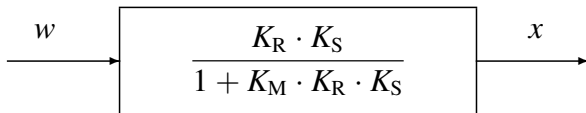


Bild 2.3-2: Regelkreisstruktur (indirekte Gegenkopplung)

K_R , K_S , K_M sind Übertragungsfaktoren von Regler, Regelstrecke und Messeinrichtung. Die Berechnung des Übertragungsverhaltens gliedert sich in folgende Schritte: Die **Regelkreisgleichung** wird gebildet, indem ein Umlauf im Regelkreis durchgeführt wird. Dabei entsteht die Regelkreisgleichung, deren Variablen separiert werden. Dann lässt sich die Übertragungs- oder Frequenzgangfunktion bilden.

$$x = K_R \cdot K_S \cdot (w - x \cdot K_M), \quad x \cdot (1 + K_M \cdot K_R \cdot K_S) = w \cdot K_R \cdot K_S$$

$$x = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_M \cdot K_R \cdot K_S} \cdot w = K \cdot w, \quad K = \frac{x}{w} = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_M \cdot K_R \cdot K_S}.$$



2.3.4.2 Struktur mit direkter Gegenkopplung

Die meisten einschleifigen Regelkreise lassen sich mit der Regelkreisstruktur mit direkter Gegenkopplung darstellen.

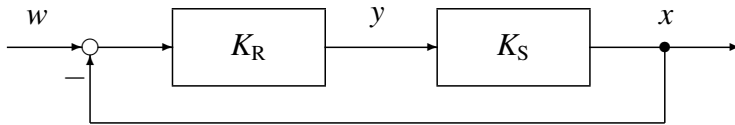
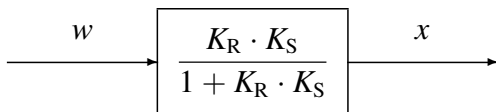


Bild 2.3-3: Regelkreisstruktur (direkte Gegenkopplung)

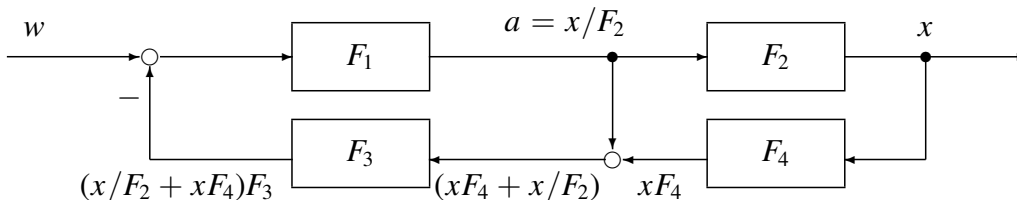
K_R , K_S sind die Übertragungsfaktoren von Regler und Regelstrecke. Das Verhalten des Regelkreises wird mit der Regelkreisgleichung bestimmt.

$$(w - x) \cdot K_R \cdot K_S = x, \quad x \cdot (1 + K_R \cdot K_S) = w \cdot K_R \cdot K_S$$

$$x = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_R \cdot K_S} \cdot w = K \cdot w, \quad K = \frac{x}{w} = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_R \cdot K_S}.$$



Beispiel 2.3-3: Übertragungsverhalten eines Regelkreises mit Rückführung einer Zwischengröße. Der Berechnungsablauf ist anzuwenden, wenn das Übertragungsverhalten der Blöcke durch proportionale Übertragungsfaktoren, Frequenzgang- oder Übertragungsfunktionen angegeben ist.

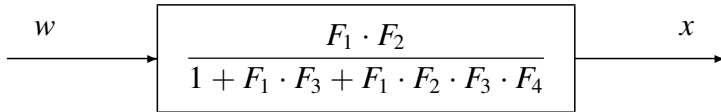


Die Kreisgleichung ist einfacher zu bilden, wenn eine Hilfsgröße a eingeführt wird. Die Hilfsgröße wird aus der Gleichung $a \cdot F_2 = x$ zu $a = x/F_2$ ermittelt. Damit wird

$$\left[w - \left(x \cdot F_4 + \frac{x}{F_2} \right) \cdot F_3 \right] \cdot F_1 \cdot F_2 = x,$$

$$(1 + F_1 \cdot F_3 + F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4) \cdot x = F_1 \cdot F_2 \cdot w,$$

$$F = \frac{x}{w} = \frac{F_1 \cdot F_2}{1 + F_1 \cdot F_3 + F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4}.$$



Die Führungsfrequenzgangfunktion F gibt die Wirkung der Führungsgröße w auf die Regelgröße x an.

2.4 Berechnung von Regelkreisen mit Proportional-Elementen

Es wird ein verzögerungsfreier Regelkreis untersucht. Regler und Regelstrecke sind proportionale Übertragungselemente. Mithilfe des Übertragungsverhaltens soll der **Regelfaktor**, der die Wirkung einer Regelung kennzeichnet, bestimmt werden. Das Übertragungsverhalten ist für den verzögerungsfreien Regelkreis das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsgröße im Zeitbereich.

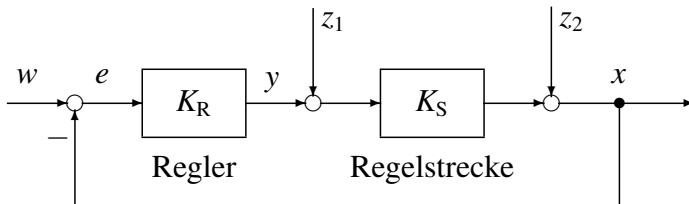


Bild 2.4-1: Regelkreis mit idealen Regelkreiselementen

K_R und K_S sind Übertragungsfaktoren von Regler (Reglerverstärkung) und Regelstrecke (Streckenverstärkung). Zwei Störgrößen sind prinzipiell zu unterscheiden: z_1 am Eingang (Versorgungsstörgröße) und z_2 am Ausgang (Laststörgröße) der Regelstrecke.

Bei technischen Regelkreisen entspricht die Stellgröße y häufig der zugeführten Leistung für die Regelstrecke. Eine **Versorgungsstörgröße** vermindert – wenn sie negativ wirkt – die zugeführte Leistung. Die **Laststörgröße** beeinflusst die Regelgröße direkt. Greift eine Störung innerhalb der Regelstrecke an, so wird sie mit den Umformungsregeln von Abschnitt 2.5 auf den Eingang oder Ausgang der Regelstrecke umgerechnet. Üblicherweise werden die Wirkungen von Störungen und der Führungsgröße auf die Regelgröße getrennt untersucht.

Störübertragungsverhalten $K_{z1} = \frac{x}{z_1}$, $z_1 \neq 0$, $z_2 = 0$, $w = 0$,

$$(-x \cdot K_R + z_1) \cdot K_S = x, \quad x \cdot (1 + K_R \cdot K_S) = K_S \cdot z_1,$$

$$K_{z1} = \frac{x}{z_1} = \frac{K_S}{1 + K_R \cdot K_S}.$$

Störübertragungsfunktion für
Versorgungsstörgrößen

Ohne Regelung, mit $K_R = 0$, ergibt sich $K_{z1} = K_S$.

Störübertragungsverhalten $K_{z2} = \frac{x}{z_2}$, $z_2 \neq 0$, $z_1 = 0$, $w = 0$,

$$-x \cdot K_R \cdot K_S + z_2 = x, \quad x \cdot (1 + K_R \cdot K_S) = z_2,$$

$$K_{z2} = \frac{x}{z_2} = \frac{1}{1 + K_R \cdot K_S}.$$

Störübertragungsfunktion für
Laststörgrößen

Ohne Regelung, mit $K_R = 0$, ergibt sich $K_{z2} = 1$.

Führungsübertragungsverhalten $K = \frac{x}{w}$, $w \neq 0$, $z_1 = 0$, $z_2 = 0$,

$$(w - x) \cdot K_R \cdot K_S = x, \quad x \cdot (1 + K_R \cdot K_S) = K_R \cdot K_S \cdot w$$

$$K = \frac{x}{w} = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_R \cdot K_S}.$$

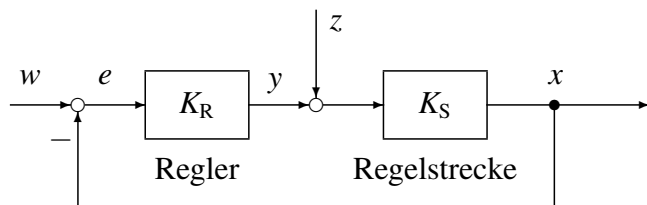
Führungsübertragungsfunktion

Durch eine Regelung wird die Auswirkung von Störungen auf die Regelgröße verringert. Der Regelfaktor r ist ein Maß für die Störungsunterdrückung. Das Verhältnis von Störübertragungsfunktion mit Regelung zu Störübertragungsfunktion ohne Regelung ergibt den Regelfaktor:

$$r = \frac{1}{1 + K_R \cdot K_S} = \frac{K_z \text{ (mit Regelung)}}{K_z \text{ (ohne Regelung)}}.$$

Mit dem Regelfaktor lässt sich das Verhalten verzögerungsfreier Regelkreise berechnen. Bei anderen Regelungen gilt er nur für das stationäre Verhalten. Eine Regelung ist um so besser, je kleiner der Regelfaktor ist.

Beispiel 2.4-1: Ermittlung des Regelfaktors für einen Regelkreis mit Proportional-Elementen. Regler und Regelstrecke sind Proportional-Elemente mit $K_R = 12$, $K_S = 2$. Führungsgröße w und Versorgungsstörgröße z ändern sich jeweils von Null auf Eins. Die Auswirkungen auf die Regelgröße x werden berechnet.



Berechnung des Führungsverhaltens:

$$w(t \leq 0) = 0, \quad w(t > 0) = 1, \quad z(t) = 0,$$

$$x = \frac{K_R \cdot K_S}{1 + K_R \cdot K_S} \cdot w = 0.96 < w.$$

Berechnung des Störungsverhaltens:

$$z(t \leq 0) = 0, \quad z(t > 0) = 1, \quad w(t) = 0,$$

$$x_z = \frac{K_S}{1 + K_R \cdot K_S} \cdot z = 0.08 > 0, \quad r = \frac{1}{1 + K_R \cdot K_S} = 0.04.$$

Ohne Regelung ($K_R = 0$) ist $x_z = K_S \cdot z = 2.0$, mit Regelung ergibt sich $x_z = 0.08$. Die Regelung reduziert die Auswirkung der Störgröße z auf die Regelgröße mit dem Regelfaktor $r = 0.04$.

2.5 Umformung von Wirkungs- und Signalflussplänen

2.5.1 Umformungsregeln

Bei komplizierten Signalflussplänen sind die einfachen Umformungsregeln nicht ausreichend, um weitergehende regelungstechnische Untersuchungen durchführen zu können. Das ist auch dann der Fall, wenn einzelne Schleifen eines Signalflussplans ineinandergreifen. Das wird als Vermaschung bezeichnet.

Für die Bearbeitung von regelungstechnischen Strukturen werden folgende Operationen benötigt:

- Zusammenfassung von in Reihe oder parallel geschalteten Übertragungsblöcken,
- Vereinfachung von rückgekoppelten Strukturen,
- Verlagerung von Übertragungsblöcken und Summations- oder Verzweigungsstellen,
- Verlagerung und Zusammenfassung von Summationsstellen,
- Verlagerung von Summations- und Verzweigungsstellen.

Im Folgenden sind Regeln zusammengestellt, mit denen ein vermaschter Signalflussplan so umgeformt werden kann, dass die Ermittlung des resultierenden Frequenzgangs oder der Übertragungsfunktion ermöglicht wird. Das Übertragungsverhalten der nebeneinanderstehenden Strukturen ist gleich:

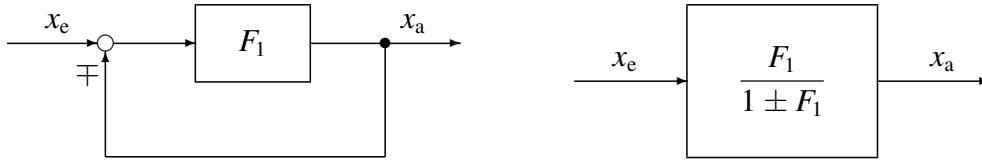
Die Strukturen sind für das Ein-Ausgangsverhalten äquivalent, das heißt, die Gleichungen für die Beziehungen zwischen Ausgangs- und Eingangsgrößen sind identisch.

Die **Umformungsregeln** sind für Frequenzgangfunktionen $F(j\omega)$ und harmonische Funktionen $x_e(j\omega)$, $x_a(j\omega)$, die mit F , x_e , x_a abgekürzt sind, angegeben. Die Regeln gelten auch für Übertragungsfunktionen mit $G(s)$, $x_e(s)$, $x_a(s)$ oder wenn die Übertragungsfaktoren der Elemente konstant sind, K , $x_e(t)$, $x_a(t)$.

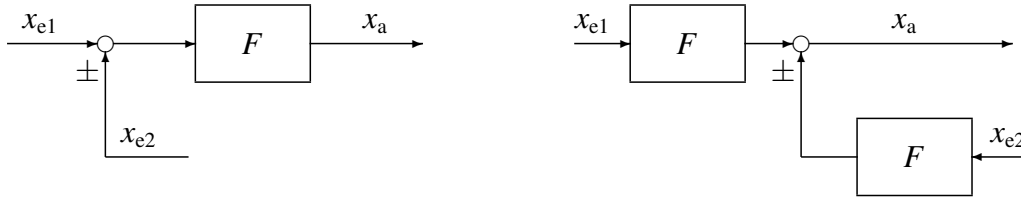
2.5.2 Tabelle der Umformungsregeln für Wirkungspläne

Zusammenfassung von parallel geschalteten Übertragungsblöcken	
Gleichung: $x_a = (F_1 \pm F_2) \cdot x_e$, (Regel 1)	
Zusammenfassung von in Reihe geschalteten Übertragungsblöcken	
Gleichung: $x_a = F_1 \cdot F_2 \cdot x_e$, (Regel 2)	
Kreisstruktur mit indirekter Gegenkopplung	
Gleichung: $x_a = F_1 \cdot (x_e \mp F_2 \cdot x_a)$ (Regel 3)	

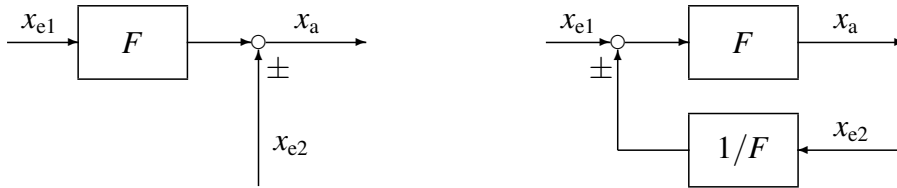
Kreisstruktur mit direkter Gegenkopplung

Gleichung: $x_a = F_1 \cdot (x_e \mp x_a)$, (**Regel 4**)

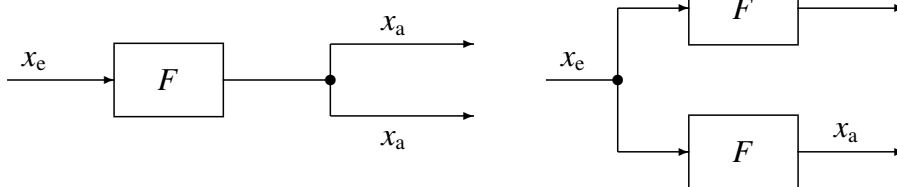
Verlagerung von Summationsstelle und Übertragungsblock

Gleichung: $x_a = F \cdot (x_{e1} \pm x_{e2})$, (**Regel 5**)

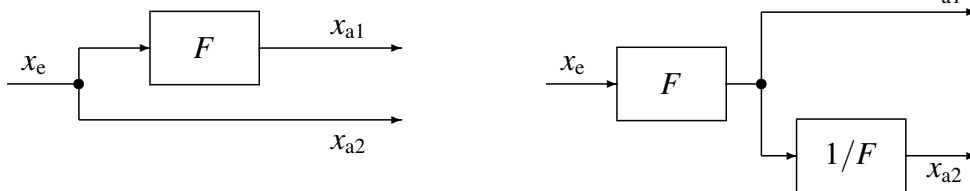
Verlagerung von Summationsstelle und Übertragungsblock

Gleichung: $x_a = F \cdot x_{e1} \pm x_{e2}$, (**Regel 6**)

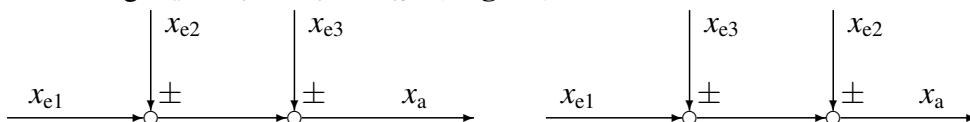
Verlagerung von Verzweigungsstelle und Übertragungsblock

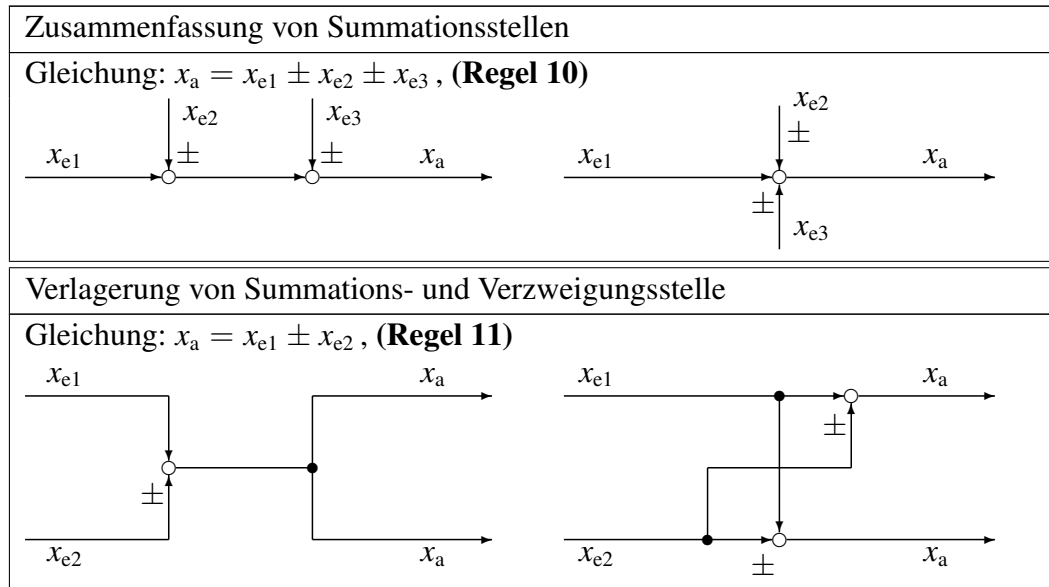
Gleichung: $x_a = F \cdot x_e$, (**Regel 7**)

Verlagerung von Verzweigungsstelle und Übertragungsblock

Gleichungen: $x_{a1} = F \cdot x_e$, $x_{a2} = x_e$, (**Regel 8**)

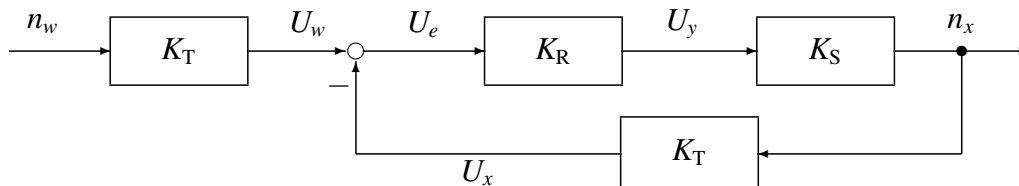
Verlagerung von Summationsstellen

Gleichung: $x_a = x_{e1} \pm x_{e2} \pm x_{e3}$, (**Regel 9**)



2.5.3 Anwendungsbeispiele

Beispiel 2.5-1: In der Regelungstechnik wird häufig die Umformungsregel 5 benötigt. Der Drehzahlregelkreis von Beispiel 1.2-1 wird unter der Annahme, dass Regelstrecke, Regler und Messeinrichtung keine Verzögerungen oder nichtlineare Kennlinien besitzen, dargestellt.



n_w Führungsgröße (Drehzahl), n_x Regelgröße (Drehzahl),

U_y Stellgröße (Ankerspannung),

K_R, K_S Verstärkungsfaktoren von Regler, Regelstrecke,

K_T Tachometerkonstante.

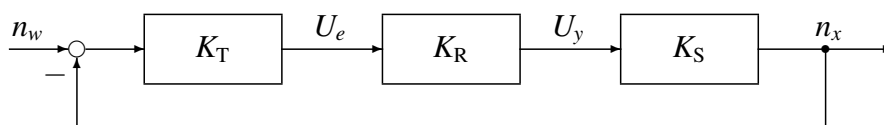
Bei der Führungsgrößenvorgabe muss die Drehzahl n_w mit dem Übertragungselement K_T in eine Spannung U_w umgeformt werden. Ein anderer Faktor an dieser Stelle führt zu einer fehlerhaften Regeldifferenz. Die Regelgröße n_x soll für den Sollwert $n_w = 2000 \text{ min}^{-1}$ berechnet werden. Mit $K_R = 20$, $K_S = 500 \text{ min}^{-1}/\text{V}$, $K_T = 1 \text{ mV}/\text{min}^{-1}$ erhält man

$$U_w = K_T \cdot n_w, \quad U_x = K_T \cdot n_x,$$

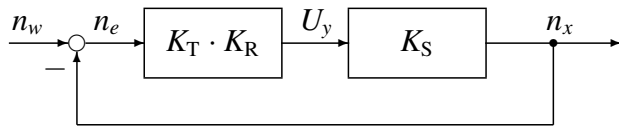
$$U_e = U_w - U_x = K_T \cdot (n_w - n_x),$$

$$U_y = K_R \cdot (U_w - U_x) = K_R \cdot K_T \cdot (n_w - n_x), \quad n_x = K_S \cdot U_y.$$

Nach Umformungsregel 5 von Abschnitt 2.5.2 lässt sich der Übertragungsblock mit K_T verlagern.



Die Blöcke mit K_T und K_R werden zusammengefasst.



Die Regelgröße n_x folgt durch Umstellen der Regelkreisgleichung:

$$(n_w - n_x) \cdot K_T \cdot K_R \cdot K_S = n_x,$$

$$n_x \cdot (1 + K_T \cdot K_R \cdot K_S) = K_T \cdot K_R \cdot K_S \cdot n_w,$$

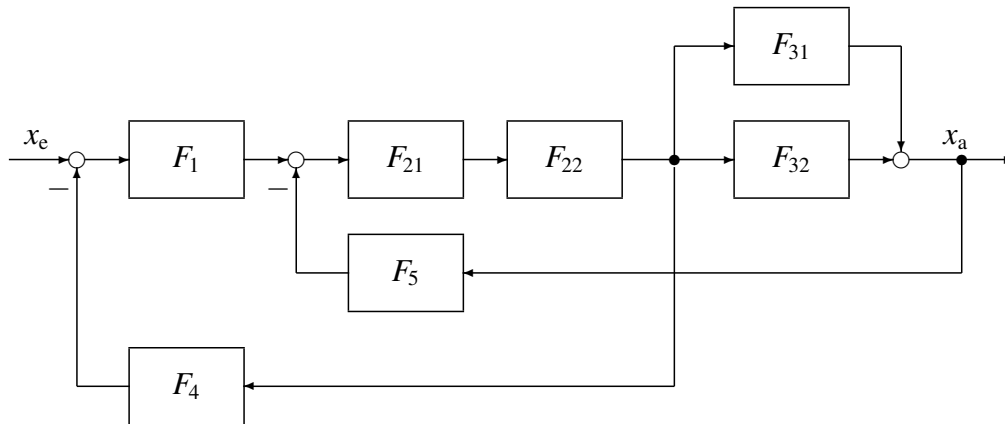
$$n_x = \frac{K_T \cdot K_R \cdot K_S}{1 + K_T \cdot K_R \cdot K_S} \cdot n_w = 1818.2 \text{ min}^{-1}.$$

Der Regelkreis hat eine bleibende Regeldifferenz von

$$n_e = n_w - n_x = 181.8 \text{ min}^{-1}$$

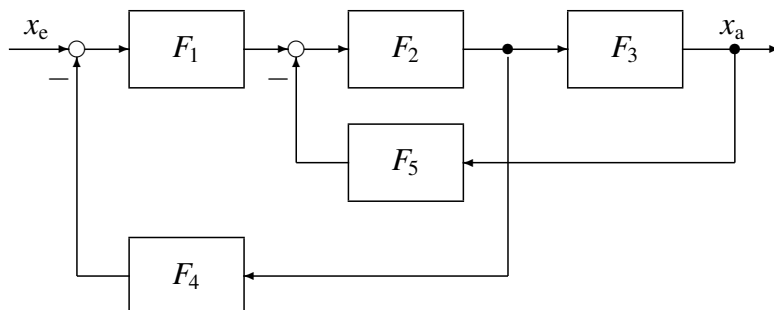
und erreicht damit nur etwa 91 % des vorgegebenen Sollwerts. Die Genauigkeit lässt sich durch Vergrößerung der Reglerverstärkung K_R verbessern, das kann jedoch zur Instabilität des Regelkreises führen, wenn Verzögerungselemente im Regelkreis vorhanden sind.

Beispiel 2.5-2: Der Wirkungsplan soll vereinfacht werden, zu ermitteln ist das Übertragungsverhalten x_a in Abhängigkeit von x_e .

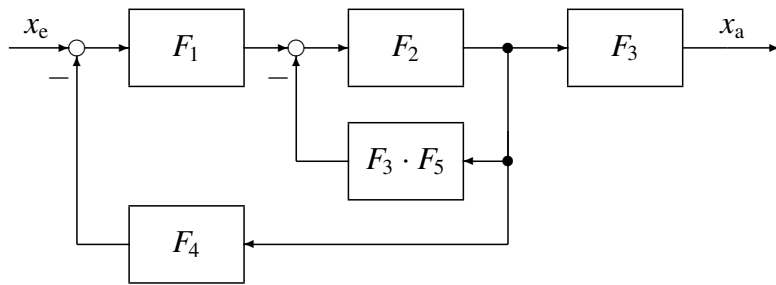


Zuerst werden F_{21}, F_{22} und F_{31}, F_{32} zusammengefasst:

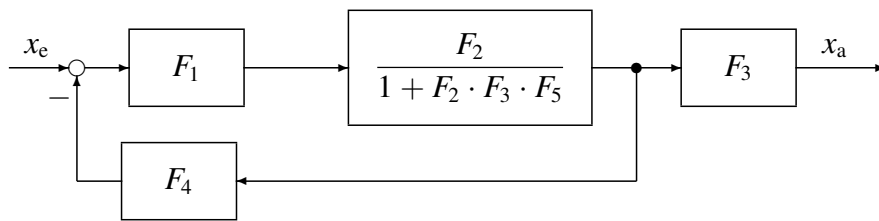
$$F_2 = F_{21} \cdot F_{22}, \quad F_3 = F_{31} + F_{32}.$$



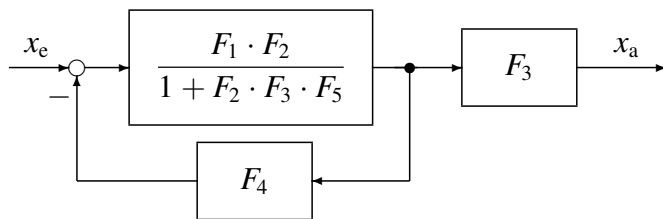
Im zweiten Schritt wird F_5 verschoben:



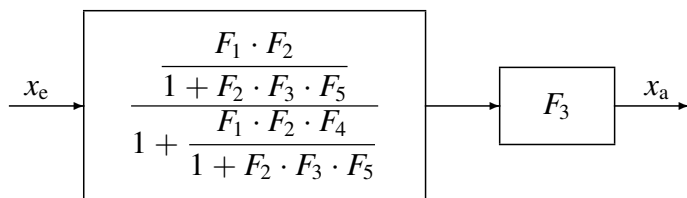
F_2 und $F_3 \cdot F_5$ bilden eine Kreisstruktur.



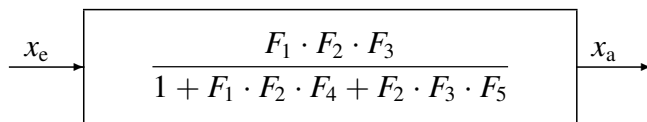
F_1 und $\frac{F_2}{1 + F_2 \cdot F_3 \cdot F_5}$ werden zusammengefasst:



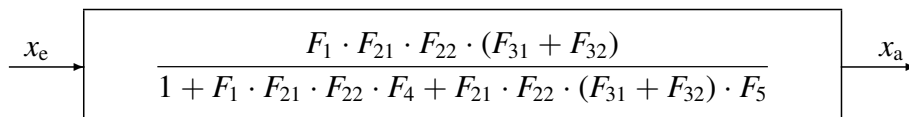
Die Kreisstruktur wird ersetzt



und vereinfacht:



Mit den Werten für F_2 und F_3 erhält man das Ergebnis:



$$x_a = \frac{F_1 \cdot F_{21} \cdot F_{22} \cdot (F_{31} + F_{32})}{1 + F_1 \cdot F_{21} \cdot F_{22} \cdot F_4 + F_{21} \cdot F_{22} \cdot (F_{31} + F_{32}) \cdot F_5} \cdot x_e.$$

3 Mathematische Methoden zur Berechnung von Regelkreisen

3.1 Normierung von Gleichungen

Die Anwendung von regelungstechnischen Verfahren wird durch Einführung von normierten dimensionslosen Größen vereinfacht. Beim **Normieren** werden die Größen des Regelungssystems auf charakteristische Werte bezogen. Die Größen werden durch die charakteristischen Werte dividiert und damit dimensionslos. Dimensionslose Größen haben als Einheit die Zahl Eins. Als charakteristische Größen werden im Allgemeinen die Betriebswerte, die so genannten Nenngrößen oder Größen des Arbeitspunktes, verwendet.

Für eine Regelstrecke gilt folgende lineare Gleichung:

$$x = K_S \cdot f(y).$$

Wenn Regelgröße x und Stellgröße y unterschiedliche Einheiten haben, dann hat der Faktor K_S eine Einheit ungleich Eins. Mit dem Index N für die Nennwerte der Regelstrecke und x' , y' , K'_S für die normierten Größen ergibt sich:

$$\frac{x}{x_N} = K_S \cdot \frac{1}{x_N} \cdot f\left(y_N \cdot \frac{y}{y_N}\right) = x' = K_S \cdot \frac{y_N}{x_N} \cdot f(y') = K'_S \cdot f(y').$$

Die Größen x' , y' , K'_S sind damit dimensionslos. Vorteile der **normierten Darstellung** sind:

- Es ergeben sich einfachere dimensionslose Gleichungen,
- der Wirkplan (Signalflussplan) wird einfacher und übersichtlicher,
- normierte Systeme lassen sich besser vergleichen.

Beispiel 3.1-1: Die Generatorspannung U_x der Lichtmaschine eines Fahrzeugs hängt von der Drehzahl n_y ab. Der Faktor K_S entspricht der Generator- oder Erregerkonstanten, die von der Ausführung des Generators bestimmt wird:

$$U_x = K_S \cdot n_y.$$

Mit der Normierungsgröße Nenndrehzahl n_{yN} ergibt sich die Nennspannung zu

$$U_{xN} = K_S \cdot n_{yN}.$$

Für die normierte Gleichung und die Einheitengleichung der normierten Größen folgt:

$$\frac{U_x}{U_{xN}} = \frac{K_S \cdot n_y}{K_S \cdot n_{yN}} = U'_x = n'_y, \quad [U'_x] = [n'_y] = 1.$$

Beispiel 3.1-2: Die Weggleichung

$$x(t) = \int v(t) dt$$

ist mit den Werten $x_N = 1 \text{ m}$, $v_N = 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ zu normieren:

$$\frac{x(t)}{x_N} = \frac{v_N}{x_N} \int \frac{v(t)}{v_N} dt.$$

Mit der Zeitkonstanten

$$T_I = \frac{x_N}{v_N} = 5 \text{ s}$$

und den normierten Größen $x'(t)$, $v'(t)$ folgt die normierte Gleichung und die Einheitengleichung:

$$x'(t) = \frac{1}{T_I} \int v'(t) dt, \quad 1 = \frac{1}{s} \cdot 1 \cdot s.$$

T_I heißt **Integrierzeitkonstante**, T_I ist die Zeit, nach der die Position x_N erreicht wird, wenn das Objekt mit der Geschwindigkeit v_N bewegt wird.

Beispiel 3.1-3: Die Geschwindigkeitsgleichung

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$$

ist mit den Werten $v_N = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $x_N = 0.5 \text{ m}$ zu normieren:

$$\frac{v(t)}{v_N} = \frac{x_N}{v_N} \cdot \frac{d\left(\frac{x(t)}{x_N}\right)}{dt}.$$

Mit der Zeitkonstanten

$$T_D = \frac{x_N}{v_N} = 0.25 \text{ s}$$

und den normierten Größen $v'(t)$, $x'(t)$ folgt die normierte Gleichung und die Einheitengleichung:

$$v'(t) = T_D \cdot \frac{dx'(t)}{dt}, \quad 1 = s \cdot \frac{1}{s}.$$

T_D heißt **Differenzierzeitkonstante**.

3.2 Linearisierung von Regelkreiselementen

3.2.1 Definition der Linearität

Übertragungselemente sind linear, wenn sie das **Verstärkungsprinzip** und das **Überlagerungs-** oder **Superpositionsprinzip** erfüllen. Ein Übertragungselement, das aus der Eingangsgröße x_e die Ausgangsgröße

$$x_a = f(x_e)$$

erzeugt, erfüllt das Verstärkungsprinzip, wenn auch die Eingangsgröße $k \cdot x_e$ in die Ausgangsgröße $k \cdot x_a$, wie in Bild 3.2-1 dargestellt, überführt wird:

$$k \cdot x_a = f(k \cdot x_e) = k \cdot f(x_e).$$

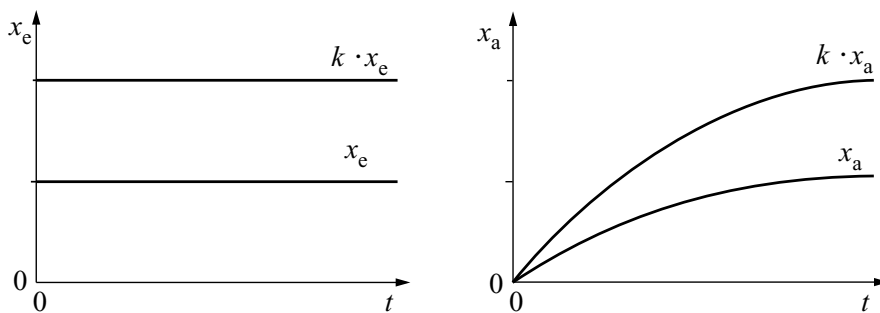


Bild 3.2-1: Verstärkungsprinzip

Ein Übertragungselement, das aus der Eingangsgröße x_{e1} die Ausgangsgröße

$$x_{a1} = f(x_{e1})$$