

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung in die Regelungstechnik</b>	<b>23</b>
1.1	Steuerungen und Regelungen	23
1.2	Begriffe der Regelungstechnik	24
<b>2</b>	<b>Hilfsmittel zur Darstellung von regelungstechnischen Strukturen</b>	<b>29</b>
2.1	Wirkungs- oder 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
<b>3</b>	<b>Mathematische Methoden zur Berechnung von Regelkreisen</b>	<b>45</b>
3.1	Normierung von Gleichungen	45
3.2	Linearisierung von Regelkreiselementen	46
3.2.1	Definition der Linearität	46
3.2.2	Linearisierung mit grafischen Verfahren	47
3.2.3	Linearisierung mit analytischen Verfahren	48
3.2.4	Linearisierung bei mehreren Variablen	50
3.3	Berechnung von Differenzialgleichungen für Regelkreise	52
3.3.1	Differenzialgleichungen von physikalischen Systemen	52
3.3.2	Lösung von linearen Differenzialgleichungen	52
3.3.2.1	Überlagerung von Teillösungen	52
3.3.2.2	Lösung einer homogenen Differenzialgleichung	52
3.3.2.3	Partikuläre Lösung einer Differenzialgleichung	54
3.4	Testfunktionen	61
3.4.1	Vergleich mit Testfunktionen	61
3.4.2	Impulsfunktion	61
3.4.3	Sprungfunktion	62
3.4.4	Anstiegsfunktion	63
3.4.5	Harmonische Funktion	63
3.5	LAPLACE-Transformation	63
3.5.1	Einleitung	63
3.5.2	Mathematische Transformationen	64
3.5.2.1	Rechenvereinfachungen durch Transformationen	64
3.5.2.2	Original- und Bildbereich der LAPLACE-Transformation	64
3.5.3	LAPLACE-Transformation und LAPLACE-Rücktransformation	65

3.5.4	Anwendung der LAPLACE-Transformation	67
3.5.4.1	Allgemeines	67
3.5.4.2	Linearität	67
3.5.4.3	Verschiebungssätze	68
3.5.4.4	Ähnlichkeitsatz	69
3.5.4.5	Differenziations- und Integrationsatz	70
3.5.4.6	Faltungssatz	72
3.5.4.7	Grenzwertsätze	72
3.5.4.8	LAPLACE-Transformation von periodischen Funktionen	74
3.5.4.9	Lösung von linearen Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten mithilfe der LAPLACE-Transformation	75
3.5.5	Übertragungsfunktionen von Übertragungselementen	77
3.5.6	Partialbruchzerlegung	78
3.5.6.1	Allgemeines	78
3.5.6.2	Einfache reelle Polstellen	78
3.5.6.3	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
<b>4</b>	<b>Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken</b>	<b>117</b>
4.1	Einteilung und Darstellung der Regelkreiselemente	117
4.2	Proportional-Element ohne Verzögerung	117
4.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	117
4.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	119
4.2.3	Proportional-Regler (P-Regler)	120
4.2.4	Proportionale Regelstrecken	121
4.2.4.1	Allgemeines	121
4.2.4.2	Proportional-Regelstrecke (P-Regelstrecke)	121
4.3	Proportional-Elemente mit Verzögerung	122
4.3.1	Allgemeines	122
4.3.2	$PT_1$ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung	122
4.3.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	122
4.3.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	123
4.3.3	$PT_2$ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung	127
4.3.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	127
4.3.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	130
4.3.4	Totzeit-Element ( $PT_1$ -Element)	138
4.3.4.1	Beschreibung im Zeitbereich	138
4.3.4.2	Beschreibung im Frequenzbereich	139

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

	4.5.3.7	PID-Reglerstrukturen, Umrechnung zwischen additiven und multiplikativen Formen	195
	4.5.3.8	PID-Regler mit zwei Freiheitsgraden	201
4.6		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
<b>5</b>		<b>Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen für Führungs- und Störverhalten</b>	<b>219</b>
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
<b>6</b>		<b>Stabilität von Regelkreisen</b>	<b>235</b>
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
<b>7</b>		<b>BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen</b>	<b>291</b>
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 <sub>1</sub> -Element)	294
	7.2.2.6	Proportional-Differenzial-Element (PD-Element)	295
	7.2.2.7	Totzeit-Element (PT <sub>1</sub> -Element)	296
	7.2.2.8	Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung (PT <sub>2</sub> -Element)	296
7.3		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 phasenanehebenden Netzwerken	306
	7.4.5	Absenkung des Amplitudengangs	309
	7.4.6	Anwendung von Amplitudenabsenkenden Netzwerken	310
	7.4.7	Zusammenfassung	313

7.5	Zusammenhang zwischen Kenngrößen von Zeit- und Frequenzbereich .....	314
7.5.1	Anforderungen an das Zeitverhalten von Regelungssystemen .....	314
7.5.2	Zusammenhang für das Übertragungselement II. Ordnung .....	314
7.5.2.1	Kenngrößen für das Übertragungselement II. Ordnung .....	314
7.5.2.2	Berechnungsformeln .....	316
7.5.2.3	Erweiterung der Anwendung .....	320
<b>8</b>	<b>Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern</b> .....	<b>323</b>
8.1	Prinzipieller Aufbau .....	323
8.1.1	Aufgaben von Regeleinrichtungen .....	323
8.1.2	Kenngrößen von Operationsverstärkern .....	323
8.1.2.1	Stationäre Kenngrößen .....	323
8.1.2.2	Dynamische Kenngrößen .....	324
8.1.2.3	Zusammenfassung .....	327
8.2	Grundsaltungen mit Operationsverstärkern .....	327
8.2.1	Allgemeines .....	327
8.2.2	Allgemeine Schaltung eines Operationsverstärkers .....	328
8.2.3	Invertierende Schaltung .....	329
8.2.4	Nichtinvertierende Schaltung .....	329
8.3	Schaltungen zur Bildung der Regeldifferenz .....	331
8.3.1	Schaltung mit Spannungsvergleichsstelle .....	331
8.3.2	Schaltung mit Stromvergleichsstelle .....	332
8.4	Schaltungen zur Bildung der Stellgröße .....	332
8.4.1	Allgemeines .....	332
8.4.2	Proportional-Regler (P-Regler) .....	333
8.4.2.1	Invertierender Proportional-Regler .....	333
8.4.2.2	Nichtinvertierender Proportional-Regler .....	333
8.4.3	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler), Proportional-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PDT <sub>1</sub> -Regler) .....	334
8.4.3.1	Invertierender PD/PDT <sub>1</sub> -Regler .....	334
8.4.3.2	Nichtinvertierender PD/PDT <sub>1</sub> -Regler .....	334
8.4.3.3	PD/PDT <sub>1</sub> -Regler mit getrennt einstellbaren Parametern .....	335
8.4.4	Integral-Regler (I-Regler) .....	337
8.4.4.1	Invertierender Integral-Regler .....	337
8.4.4.2	Nichtinvertierender Integral-Regler .....	338
8.4.5	Proportional-Integral-Regler (PI-Regler) .....	339
8.4.5.1	Invertierender PI-Regler .....	339
8.4.5.2	Nichtinvertierender PI-Regler .....	339
8.4.5.3	PI-Regler mit unabhängig einstellbaren Parametern .....	340
8.4.6	Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID-Regler), Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PIDT <sub>1</sub> -Regler) .....	341
8.4.6.1	PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in additiver (paralleler) Form mit unabhängig voneinander einstellbaren Parametern .....	341
8.4.6.2	Invertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit einem Verstärker .....	342
8.4.6.3	Invertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit zwei Verstärkern .....	343
8.4.6.4	Invertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit Entkopplung .....	344
8.4.6.5	Nichtinvertierender PID/PIDT <sub>1</sub> -Regler in multiplikativer (serieller) Form .....	345

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

9.5	Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren	434
9.5.1	Stochastische Prozesse, Modellbegriffe	434
9.5.2	MA-Modell (moving-average model)	434
9.5.3	AR-Modell (auto-regressive model)	436
9.5.4	ARMA-Modell (auto-regressive moving-average model)	437
9.5.5	Modelle mit zusätzlicher deterministischer Eingangsgröße	438
9.5.5.1	Allgemeine Modellstruktur	438
9.5.5.2	Modellarten mit deterministischer und stochastischer Eingangsgröße	440
9.5.6	Parameterschätzung von ARX-Modellen	440
9.5.6.1	Prinzip der Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren (experimentelle Identifikation)	440
9.5.6.2	Fehlerarten für die Anwendung von Parameterschätzverfahren	441
9.5.6.3	Modellbestimmung bei Prozessen mit vernachlässigbaren Störgrößen	443
9.5.6.4	Modellbestimmung mit der Methode der kleinsten Quadrate	449
<b>10</b>	<b>Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise, erweiterte Regelkreisstrukturen</b>	<b>457</b>
10.1	Einleitung	457
10.2	Parameteroptimierung im Zeitbereich	458
10.2.1	Begriff der Regelfläche	458
10.2.2	Integralkriterien im Zeitbereich, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	459
10.2.2.1	Integralkriterium der Linearen Regelfläche, IE-Kriterium (Integrated Error criterion)	459
10.2.2.2	Integralkriterien der Betragsregelfläche, Anwendung von Vergleichsübertragungsfunktionen	461
10.2.2.3	Integralkriterien der Quadratischen Regelfläche	486
10.2.3	Berechnung der Integralkriterien für Standardregelkreise II. Ordnung	490
10.3	Einstellregeln für Regelkreise	493
10.3.1	Anwendung der Einstellregeln	493
10.3.2	Einstellregeln von ZIEGLER und NICHOLS	494
10.3.3	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK	495
10.3.4	Regler-Einstellung nach der T-Summen-Regel	497
10.3.4.1	Summenzeitkonstante einer Regelstrecke	497
10.3.4.2	Experimentelle Bestimmung der Summenzeitkonstanten	499
10.3.4.3	T-Summen-Regel für PI- und PID-Regler	499
10.3.4.4	Anwendung der T-Summen-Regel	501
10.4	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Betragsoptimum	504
10.4.1	Prinzip der Optimierung im Frequenzbereich	504
10.4.2	Einstellung von Regelkreisen nach dem Betragsoptimum	504
10.4.3	Anwendung des Verfahrens	508
10.4.3.1	Vereinfachung von Streckenübertragungsfunktionen	508
10.4.3.2	Satz von der Summe der kleinen Zeitkonstanten	508
10.4.3.3	Vereinfachung von Totzeitelementen	509
10.4.4	Anwendung des Betragsoptimums bei Regelstrecken höherer Ordnung	509
10.4.4.1	Kompensation einer großen Zeitkonstanten	509
10.4.4.2	Kompensation von zwei großen Zeitkonstanten	510
10.4.5	Einstellregeln für das Betragsoptimum	515
10.5	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Symmetrisches Optimum	516
10.5.1	Prinzip des Verfahrens und Anwendung bei $IT_1$ -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 <sub>n</sub> -Regelstrecken mit einer großen Zeitkonstanten	525
10.5.4.2	PT <sub>n</sub> -Regelstrecken mit zwei großen Zeitkonstanten	525
10.5.5	Einstellregeln für das Symmetrische Optimum	526
10.5.6	Zusammenfassung zur Optimierung im Frequenzbereich	528
10.6	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
<b>11</b>	<b>Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)</b>	<b>547</b>
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	Differenzgleichungen 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	Differenzgleichungen	589
11.4.3	Lösung von Differenzgleichungen	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	Führungübertragungsverhalten	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 Stellgrößenswerts	710

11.8	Diskretisierung von kontinuierlichen Übertragungsfunktionen .....	715
11.8.1	Anwendung von Diskretisierungsverfahren .....	715
11.8.2	Substitutionsverfahren .....	716
11.8.3	Stabilität der Verfahren .....	723
11.8.4	Systemantwortinvariante Transformationen .....	726
11.8.4.1	Invariante Systemreaktionen im Zeitbereich .....	726
11.8.4.2	Impulsinvariante Transformation .....	727
11.8.4.3	Sprunginvariante Transformation .....	727
<b>12</b>	<b>Zustandsregelungen</b> .....	<b>729</b>
12.1	Allgemeines .....	729
12.2	Mathematische Methoden zur Berechnung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	730
12.2.1	Beschreibung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen .....	730
12.2.1.1	Allgemeine Form des Gleichungssystems .....	730
12.2.1.2	Beschreibung linearer Mehrgrößensysteme mit Zustandsvariablen .....	731
12.2.1.3	Beschreibung linearer Eingrößensysteme mit Zustandsvariablen .....	735
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich .....	737
12.2.2.1	Berechnung der Matrix-e-Funktion .....	737
12.2.2.2	Differenziation der Matrix-e-Funktion .....	738
12.2.2.3	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung .....	738
12.2.2.4	Transitionsmatrix .....	739
12.2.3	Lösung der Zustandsgleichung im Frequenzbereich .....	743
12.2.4	Normalformen von Übertragungssystemen .....	745
12.2.4.1	Allgemeines .....	745
12.2.4.2	Regelungsnormform .....	745
12.2.4.3	Beobachtungsnormform .....	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 Beobachtungsnormform .....	761
12.2.6.1	Allgemeine Form der Transformationsgleichungen .....	761
12.2.6.2	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Regelungsnormform .....	762
12.2.6.3	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Beobachtungsnormform .....	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
<b>13</b>	<b>Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik</b>	<b>835</b>
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 unterlagertem Momentenregelung . . . . .	848
13.5.2.2.1	Berechnung des Drehzahlreglers . . . . .	848
13.5.2.2.2	Führungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagertem Momentenregelung . . . . .	849
13.5.2.3	Lageregelung mit unterlagertem 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
<b>14</b>	<b>Nichtlineare Regelungen</b>	<b>897</b>
14.1	Einleitung	897
14.1.1	Verfahren zur Untersuchung nichtlinearer Systeme	897

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

14.5.4	Schaltende Regler mit Rückführung . . . . .	1037
14.5.4.1	Eigenschaften von quasistetigen Reglern . . . . .	1037
14.5.4.2	Einfluss der Rückführung bei schaltenden Reglern . . . . .	1038
14.5.4.3	Quasistetige Standardregler (Regler mit Rückführung) . . . . .	1041
<b>15</b>	<b>Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik</b>	<b>1047</b>
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
<b>16</b>	<b>Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB</b> .....	<b>1161</b>
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 <sub>2</sub> -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
<b>17</b>	<b>Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink</b>	<b>1295</b>
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 samget	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
<b>18</b>	<b>Numerische Verfahren für die Regelungstechnik</b>	<b>1501</b>
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
<b>19</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>1517</b>
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
<b>20</b>	<b>Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik, regelungstechnische Begriffe</b>	<b>1533</b>
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
<b>Sachwortverzeichnis</b>		<b>1575</b>