

Mehr Informationen zum Titel

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	⇒

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 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
4	Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken	117
4.1	Einteilung und Darstellung der Regelkreiselemente	117
4.2	Proportional-Element ohne Verzögerung	117
4.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	117
4.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	119
4.2.3	Proportional-Regler (P-Regler)	120
4.2.4	Proportionale Regelstrecken	121
4.2.4.1	Allgemeines	121
4.2.4.2	Proportional-Regelstrecke (P-Regelstrecke)	121
4.3	Proportional-Elemente mit Verzögerung	122
4.3.1	Allgemeines	122
4.3.2	PT ₁ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung	122
4.3.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	122
4.3.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	123
4.3.3	PT ₂ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung	127
4.3.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	127
4.3.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	130
4.3.4	Totzeit-Element (PT ₁ -Element)	138
4.3.4.1	Beschreibung im Zeitbereich	138
4.3.4.2	Beschreibung im Frequenzbereich	139

4.3.5	Allpass-Elemente	140
4.3.5.1	Beschreibung im Zeitbereich	140
4.3.5.2	Beschreibung im Frequenzbereich	145
4.3.6	Minimal- und nichtminimalphasige Elemente	148
4.4	Differenzierende Übertragungselemente	154
4.4.1	Differenzial-Element ohne Verzögerung (D-Element)	154
4.4.1.1	Beschreibung im Zeitbereich	154
4.4.1.2	Beschreibung im Frequenzbereich	154
4.4.2	Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung (DT ₁ -Element)	156
4.4.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	156
4.4.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	157
4.4.3	Proportional-Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung in multiplikativer Form (PDT ₁ -, PPT ₁ -Element)	161
4.4.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	161
4.4.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	162
4.4.4	Proportional-Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung in additiver Form (PDT ₁ -Element)	165
4.4.5	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler, PDT ₁ -Regler)	166
4.5	Integrierende Elemente	168
4.5.1	Integral-Element (I-Element)	168
4.5.1.1	Beschreibung im Zeitbereich	168
4.5.1.2	Beschreibung im Frequenzbereich	169
4.5.2	Integrale Regelstrecken	171
4.5.2.1	Allgemeines Verhalten	171
4.5.2.2	Integrale Regelstrecke (I-Regelstrecke)	171
4.5.2.3	Integrale Regelstrecke mit Verzögerung (IT ₁ -Regelstrecke)	173
4.5.2.4	Integrale Regelstrecke mit Totzeit (IT _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 phasenhebenden Netzwerken	306
7.4.5	Absenkung des Amplitudengangs	309
7.4.6	Anwendung von amplitudenabsenkenden Netzwerken	310
7.4.7	Zusammenfassung	313

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

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

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

10.5.3	Anwendung des Verfahrens bei integralen Regelstrecken mit Verzögerung höherer Ordnung	524
10.5.4	Anwendung des Verfahrens bei proportionalen Regelstrecken mit Verzögerungen höherer Ordnung	525
10.5.4.1	PT _n -Regelstrecken mit einer großen Zeitkonstanten	525
10.5.4.2	PT _n -Regelstrecken mit zwei großen Zeitkonstanten	525
10.5.5	Einstellregeln für das Symmetrische Optimum	526
10.5.6	Zusammenfassung zur Optimierung im Frequenzbereich	528
10.6	Erweiterte Regelkreisstrukturen	529
10.6.1	Einleitung	529
10.6.2	Regelungen mit Störgrößenaufschaltung	529
10.6.2.1	Anwendungsbeispiele	529
10.6.2.2	Störgrößenaufschaltung auf den Regelstreckeneingang	530
10.6.2.3	Störgrößenaufschaltung auf den Reglereingang	535
10.6.3	Regelstrecken mit Totzeit (SMITH-Regler, SMITH-Prädiktor)	541
11	Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)	547
11.1	Prinzipielle Arbeitsweise von digitalen Regelkreisen	547
11.1.1	Einleitung	547
11.1.2	Kontinuierliche und diskrete Signale in digitalen Regelungssystemen	547
11.1.3	Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	548
11.2	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	Führungsübertragungsverhalten	680
11.5.4.8.3	Störungsübertragungsverhalten (Versorgungsstörgröße)	680
11.5.4.8.4	Störungsübertragungsverhalten (Laststörgröße)	682
11.5.4.8.5	Berechnung von z -Übertragungsfunktionen	683
11.6	Stabilität von digitalen Regelungssystemen	686
11.6.1	Stabilitätsdefinition	686
11.6.2	Verfahren zur Stabilitätsbestimmung	688
11.6.2.1	Stabilitätskriterien	688
11.6.2.2	Anwendung der Bilineartransformation	689
11.6.2.3	Koeffizientenkriterien (Bilineartransformation)	692
11.6.2.4	Stabilitätskriterium von JURY	695
11.7	Kompensationsregler für digitale Regelkreise	697
11.7.1	Prinzip der Kompensation	697
11.7.2	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit (Dead-Beat-Regler)	698
11.7.3	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit mit Vorgabe des ersten Stellgrößenwerts	710

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

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

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

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

14.5.4	Schaltende Regler mit Rückführung	1037
14.5.4.1	Eigenschaften von quasistetigen Reglern	1037
14.5.4.2	Einfluss der Rückführung bei schaltenden Reglern	1038
14.5.4.3	Quasistetige Standardregler (Regler mit Rückführung)	1041
15	Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	1047
15.1	Grundbegriffe der Fuzzy-Logik	1047
15.1.1	Scharfe und unscharfe Mengen, Zugehörigkeitsfunktionen	1047
15.1.2	Beschreibung von scharfen und unscharfen Mengen	1048
15.1.2.1	Beschreibungsformen von scharfen Mengen	1048
15.1.2.2	Beschreibungsformen von unscharfen Mengen	1049
15.1.3	Darstellung von unscharfen Mengen mit Zugehörigkeitsfunktionen	1052
15.1.4	Linguistische Variablen und Werte	1056
15.1.4.1	Linguistische Variablen zur Beschreibung von unscharfen Aussagen	1056
15.1.4.2	Struktur von linguistischen Variablen, linguistische Operatoren	1058
15.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1064
15.2.1	Elementaroperationen mit scharfen Mengen	1064
15.2.2	Operationen mit unscharfen Mengen	1065
15.2.2.1	Elementaroperationen mit unscharfen Mengen	1065
15.2.2.2	Allgemeine Anforderungen an Fuzzy-Operatoren	1068
15.2.2.3	t -Normen und t -Konormen (s -Normen)	1070
15.2.2.4	Parametrisierte t -Normen und t -Konormen	1075
15.2.2.5	Kompensatorische und mittelnde Operatoren	1076
15.3	Unscharfe Relationen	1079
15.3.1	Einstellige Relationen	1079
15.3.2	Scharfe Relationen mit scharfen Mengen	1080
15.3.3	Unscharfe Relationen mit scharfen Mengen	1081
15.3.4	Unscharfe 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	Unscharfes 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