

1	Einführung in die Regelungstechnik.....	21
2	Darstellung von regelungstechnischen Strukturen.....	27
3	Berechnungsmethoden für Regelkreise	43
4	Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken	107
5	Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen	193
6	Stabilität von Regelkreisen	209
7	BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen	265
8	Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern.....	295
9	Mathematische Modelle für die Regelungstechnik	329
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise.....	429
11	Digitale Regelungssysteme	477
12	Zustandsregelungen.....	627
13	Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik	709
14	Nichtlineare Regelungen.....	771
15	Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	921
16	Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB	1035
17	Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink.....	1169
18	Numerische Verfahren für die Regelungstechnik	1323
19	Formelzeichen und Abkürzungen.....	1339
20	Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik	1353
	Regelungstechnische Begriffe – englisch und deutsch	
	Sachwortverzeichnis	1395

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Regelungstechnik	21
1.1	Steuerungen und Regelungen	21
1.2	Begriffe der Regelungstechnik	22
2	Hilfsmittel zur Darstellung von regelungstechnischen Strukturen	27
2.1	Wirkungs- oder Signalflusspläne	27
2.2	Elemente des Wirkungs- oder Signalflussplans	27
2.2.1	Übertragungsblock und Wirkungslinie	27
2.2.2	Verknüpfungselemente	29
2.3	Einfache Signalflussstrukturen und Vereinfachungsregeln	31
2.3.1	Anwendung der Wirkungs- oder Signalflusspläne	31
2.3.2	Kettenstruktur	32
2.3.3	Parallelstruktur	32
2.3.4	Kreisstrukturen	34
2.3.4.1	Struktur mit indirekter Gegenkopplung	34
2.3.4.2	Struktur mit direkter Gegenkopplung	35
2.4	Berechnungen von Regelkreisen mit Proportional-Elementen	36
2.5	Umformung von Wirkungs- und Signalflussplänen	38
2.5.1	Umformungsregeln	38
2.5.2	Tabelle der Umformungsregeln für Wirkungspläne	38
2.5.3	Anwendungsbeispiele	40
3	Mathematische Methoden zur Berechnung von Regelkreisen	43
3.1	Normierung von Gleichungen	43
3.2	Linearisierung von Regelkreiselementen	44
3.2.1	Definition der Linearität	44
3.2.2	Linearisierung mit grafischen Verfahren	45
3.2.3	Linearisierung mit analytischen Verfahren	46
3.2.4	Linearisierung bei mehreren Variablen	48
3.3	Berechnung von Differenzialgleichungen für Regelkreise	50
3.3.1	Differenzialgleichungen von physikalischen Systemen	50
3.3.2	Lösung von linearen Differenzialgleichungen	50
3.3.2.1	Überlagerung von Teillösungen	50
3.3.2.2	Lösung einer homogenen Differenzialgleichung	50
3.3.2.3	Partikuläre Lösung einer Differenzialgleichung	52
3.4	Testfunktionen	59
3.4.1	Vergleich mit Testfunktionen	59
3.4.2	Impulsfunktion	59
3.4.3	Sprungfunktion	60
3.4.4	Anstiegsfunktion	61
3.4.5	Harmonische Funktion	61
3.5	LAPLACE-Transformation	61
3.5.1	Einleitung	61
3.5.2	Mathematische Transformationen	62
3.5.2.1	Rechenvereinfachungen durch Transformationen	62
3.5.2.2	Original- und Bildbereich der LAPLACE-Transformation	62
3.5.3	LAPLACE-Transformation und LAPLACE-Integral	63

3.5.4	Anwendung der LAPLACE-Transformation	65
3.5.4.1	Allgemeines	65
3.5.4.2	Linearität	65
3.5.4.3	Verschiebungssatz	66
3.5.4.4	Ähnlichkeitssatz	67
3.5.4.5	Differenziations- und Integrationsatz	67
3.5.4.6	Faltungssatz	69
3.5.4.7	Grenzwertsätze	69
3.5.4.8	Lösung von linearen Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten mithilfe der LAPLACE-Transformation	71
3.5.5	Übertragungsfunktionen von Übertragungselementen	73
3.5.6	Partialbruchzerlegung	74
3.5.6.1	Allgemeines	74
3.5.6.2	Einfache reelle Polstellen	74
3.5.6.3	Mehrfache reelle Polstellen	75
3.5.6.4	Einfache komplexe Polstellen	76
3.5.7	Charakteristische Gleichung und Pol-Nullstellenplan	76
3.5.8	Tabellen für die LAPLACE-Transformation	79
3.6	Frequenzgang von Übertragungselementen	97
3.6.1	Dynamisches Verhalten im Frequenzbereich	97
3.6.2	Frequenzgang	97
3.6.3	Berechnung des Frequenzgangs aus der Differenzialgleichung des Übertragungselements	100
3.6.4	Frequenzgang und Übertragungsfunktion	102
3.6.5	Frequenzgang und Ortskurve	103
3.6.6	Frequenzgang und BODE-Diagramm	104
3.6.7	Frequenzgang und Sprungantwort	106
4	Elemente von Regeleinrichtungen und Regelstrecken	107
4.1	Einteilung und Darstellung der Regelkreiselemente	107
4.2	Proportional-Element ohne Verzögerung	107
4.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	107
4.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	109
4.2.3	Proportional-Regler (P-Regler)	110
4.2.4	Proportionale Regelstrecken	111
4.2.4.1	Allgemeines	111
4.2.4.2	Proportional-Regelstrecke (P-Regelstrecke)	111
4.3	Proportional-Elemente mit Verzögerung	112
4.3.1	Allgemeines	112
4.3.2	PT ₁ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung	112
4.3.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	112
4.3.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	113
4.3.3	PT ₂ -Element, Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung	117
4.3.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	117
4.3.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	120
4.3.4	Totzeit-Element (PT ₁ -Element)	127
4.3.4.1	Beschreibung im Zeitbereich	127
4.3.4.2	Beschreibung im Frequenzbereich	128
4.4	Differenzierende Übertragungselemente	130

4.4.1	Differenzial-Element ohne Verzögerung (D-Element)	130
4.4.1.1	Beschreibung im Zeitbereich	130
4.4.1.2	Beschreibung im Frequenzbereich	130
4.4.2	Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung (DT ₁ -Element)	132
4.4.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	132
4.4.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	133
4.4.3	Proportional-Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung in multiplikativer Form (PDT ₁ -, PPT ₁ -Element)	137
4.4.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	137
4.4.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	138
4.4.4	Proportional-Differenzial-Element mit Verzögerung I. Ordnung in additiver Form (PDT ₁ -Element)	141
4.4.5	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler, PDT ₁ -Regler)	142
4.5	Integrierende Elemente	144
4.5.1	Integral-Element (I-Element)	144
4.5.1.1	Beschreibung im Zeitbereich	144
4.5.1.2	Beschreibung im Frequenzbereich	145
4.5.2	Integrale Regelstrecken	147
4.5.2.1	Allgemeines Verhalten	147
4.5.2.2	Integrale Regelstrecke (I-Regelstrecke)	147
4.5.2.3	Integrale Regelstrecke mit Verzögerung (IT ₁ -Regelstrecke)	149
4.5.2.4	Integrale Regelstrecke mit Totzeit (IT _T -Regelstrecke)	151
4.5.3	Regler mit integralem Verhalten	152
4.5.3.1	Integral-Regler (I-Regler)	152
4.5.3.2	Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	154
4.5.3.2.1	Beschreibung im Zeitbereich	154
4.5.3.2.2	Beschreibung im Frequenzbereich	155
4.5.3.3	Proportional-Integral-Differenzial-Regler ohne Verzögerung in additiver (paralleler) Form	158
4.5.3.3.1	Beschreibung im Zeitbereich	158
4.5.3.3.2	Beschreibung im Frequenzbereich	159
4.5.3.4	Proportional-Integral-Differenzial-Regler ohne Verzögerung in multiplikativer (serieller) Form	161
4.5.3.4.1	Beschreibung im Zeitbereich	161
4.5.3.4.2	Beschreibung im Frequenzbereich	162
4.5.3.5	Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung in additiver (paralleler) Form	164
4.5.3.5.1	Beschreibung im Zeitbereich	164
4.5.3.5.2	Beschreibung im Frequenzbereich	165
4.5.3.6	Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung in multiplikativer (serieller) Form	168
4.5.3.6.1	Beschreibung im Zeitbereich	168
4.5.3.6.2	Beschreibung im Frequenzbereich	169
4.5.3.7	Umrechnung zwischen additiver und multiplikativer Form	171
4.5.3.8	PID-Regler mit zwei Freiheitsgraden	176
4.6	Standardisierte Parameter von Übertragungsfunktionen	180
4.6.1	Koeffizienten und standardisierte Parameter	180
4.6.2	Ermittlung der stationären Verstärkungsfaktoren	181
4.6.2.1	Integrierverstärkung K_I	181

4.6.2.2	Proportionalverstärkung K_P	182
4.6.2.3	Differenzierverstärkung K_D	182
4.6.2.4	Ermittlung der Verstärkungsfaktoren bei Übertragungsfunktionen mit mehreren Übertragungskomponenten	183
4.6.3	Ermittlung von Zeitkonstanten, Dämpfung und Kennkreisfrequenz	184
4.6.3.1	Ermittlung von Zeitkonstanten	184
4.6.3.2	Ermittlung von standardisierten Zeitkonstanten	185
4.6.3.3	Ermittlung von standardisierten Koeffizienten bei Systemen II. Ordnung mit komplexen Nullstellen	186
4.7	Gleichungen und Symbole für Regelkreiselemente	187
4.7.1	Differenzialgleichungen von Regelkreiselementen	187
4.7.2	Frequenzgangfunktionen von Regelkreiselementen	189
4.7.3	Übertragungsfunktionen von Regelkreiselementen	191
5	Frequenzgang- und Übertragungsfunktionen für Führungs- und Störverhalten	193
5.1	Gleichungen für Regelkreise mit direkter Gegenkopplung	193
5.1.1	Strukturbild und Abkürzungen	193
5.1.2	Gleichungen für das Führungsübertragungsverhalten	195
5.1.3	Gleichungen für das Störungsübertragungsverhalten von Versorgungsstögrößen	196
5.1.4	Gleichungen für das Störungsübertragungsverhalten von Laststögrößen	196
5.1.5	Berechnungsbeispiel	197
5.1.6	Gleichungen für das Stellgrößenverhalten	199
5.2	Ausregelbarkeit von Störungen	202
5.3	Gleichungen für Regelkreise mit indirekter Gegenkopplung	203
5.4	Stationäre Regelfehler höherer Ordnung	206
6	Stabilität von Regelkreisen	209
6.1	Entstehung des Stabilitätsproblems bei Regelkreisen	209
6.2	Definition der Stabilität	210
6.3	Verfahren zur Stabilitätsbestimmung	213
6.3.1	Algebraische und geometrische Stabilitätskriterien	213
6.3.2	ROUTH-Kriterium	214
6.3.2.1	Eigenschaften des ROUTH-Verfahrens	214
6.3.2.2	Stabilitätskriterium nach ROUTH	214
6.3.2.3	Abhängigkeit der Stabilität von einem Parameter	216
6.3.3	Kriterium von HURWITZ	217
6.3.3.1	Allgemeines	217
6.3.3.2	Stabilitätskriterium nach HURWITZ	217
6.3.4	NYQUIST-Kriterium	219
6.3.4.1	Eigenschaften des NYQUIST-Kriteriums	219
6.3.4.2	Vereinfachtes Stabilitätskriterium nach NYQUIST	219
6.3.4.3	Beispiele zum vereinfachten NYQUIST-Kriterium	221
6.3.4.4	Vollständiges NYQUIST-Kriterium	222
6.3.4.5	Beispiele zum vollständigen NYQUIST-Kriterium	224
6.3.4.6	Stabilität von Regelungssystemen mit Totzeit	225
6.4	Wurzelortskurven	227
6.4.1	Einleitung	227
6.4.2	Kriterium für das Wurzelortskurven-Verfahren (WOK-Verfahren)	229
6.4.3	Regeln für die Konstruktion von Wurzelortskurven	235
6.4.3.1	Allgemeines	235

6.4.3.2	Prinzipieller Verlauf der WOK (Regel 1)	236
6.4.3.3	WOK auf der reellen Achse (Regel 2)	236
6.4.3.4	Schnittpunkt der Asymptoten (Regel 3)	237
6.4.3.5	Anstiegswinkel der Asymptoten (Regel 4)	237
6.4.3.6	Verzweigungspunkte (Regel 5)	237
6.4.3.7	Schnittwinkel der WOK-Zweige in Verzweigungspunkten (Regel 6)	240
6.4.3.8	Schnittpunkte der WOK mit der imaginären Achse (Regel 7)	242
6.4.3.9	Austrittswinkel der WOK aus Polstellen, Eintrittswinkel in Nullstellen (Regel 8)	243
6.4.3.10	Skalierung der WOK mit dem Kurvenparameter (Regel 9)	245
6.4.3.11	Tabelle der Schritte des WOK-Verfahrens	247
6.4.3.12	Anwendung des WOK-Verfahrens	248
6.4.3.13	Tabelle mit WOK für Regelungssysteme bis IV. Ordnung	253
6.4.4	Erweiterung der Anwendung des WOK-Verfahrens	257
6.4.4.1	WOK-Verfahren für andere Regelkreisparameter	257
6.4.4.2	WOK für mehrere Kurvenparameter (WOK-Kontur)	259
6.4.5	Zusammenfassung	263
7	BODE-Verfahren zur Einstellung von Regelkreisen	265
7.1	Einleitung	265
7.2	BODE-Diagramme	265
7.2.1	BODE-Diagramm des offenen Regelkreises	265
7.2.2	BODE-Diagramme der wichtigsten Übertragungselemente	266
7.2.2.1	Einleitung	266
7.2.2.2	Proportional-Element (P-Element)	266
7.2.2.3	Integral-Element (I-Element)	267
7.2.2.4	Differenzial-Element (D-Element)	267
7.2.2.5	Proportional-Element mit Verzögerung I. Ordnung (PT ₁ -Element)	268
7.2.2.6	Proportional-Differenzial-Element (PD-Element)	269
7.2.2.7	Totzeit-Element (PT _T -Element)	270
7.2.2.8	Proportional-Element mit Verzögerung II. Ordnung (PT ₂ -Element)	270
7.3	Stabilitätsgrenze im BODE-Diagramm	273
7.3.1	Vergleich mit der Ortskurvendarstellung	273
7.3.2	Amplitudenreserve und Phasenreserve	274
7.4	Anwendung des BODE-Verfahrens	276
7.4.1	Einstellung der Stabilitätsgröße	276
7.4.2	Einstellung des Verstärkungsfaktors	277
7.4.3	Anhebung des Phasengangs	278
7.4.4	Anwendung von phasenanhebenden Netzwerken	280
7.4.5	Absenkung des Amplitudengangs	283
7.4.6	Anwendung von amplitudenabsenkenden Netzwerken	284
7.4.7	Zusammenfassung	287
7.5	Zusammenhang zwischen Kenngrößen von Zeit- und Frequenzbereich	288
7.5.1	Anforderungen an das Zeitverhalten von Regelungssystemen	288
7.5.2	Zusammenhang für das Übertragungselement II. Ordnung	288
7.5.2.1	Kenngrößen für das Übertragungselement II. Ordnung	288
7.5.2.2	Berechnungsformeln	290
7.5.2.3	Erweiterung der Anwendung	292

8	Regeleinrichtungen mit Operationsverstärkern	295
8.1	Prinzipieller Aufbau	295
8.1.1	Aufgaben von Regeleinrichtungen	295
8.1.2	Kenngrößen von Operationsverstärkern	295
8.1.2.1	Stationäre Kenngrößen	295
8.1.2.2	Dynamische Kenngrößen	296
8.1.2.3	Zusammenfassung	299
8.2	Grundsaltungen mit Operationsverstärkern	299
8.2.1	Allgemeines	299
8.2.2	Allgemeine Schaltung eines Operationsverstärkers	300
8.2.3	Invertierende Schaltung	301
8.2.4	Nichtinvertierende Schaltung	301
8.3	Schaltungen zur Bildung der Regeldifferenz	303
8.3.1	Schaltung mit Spannungsvergleichsstelle	303
8.3.2	Schaltung mit Stromvergleichsstelle	304
8.4	Schaltungen zur Bildung der Stellgröße	304
8.4.1	Allgemeines	304
8.4.2	Proportional-Regler (P-Regler)	305
8.4.2.1	Invertierender Proportional-Regler	305
8.4.2.2	Nichtinvertierender Proportional-Regler	305
8.4.3	Proportional-Differenzial-Regler (PD-Regler), Proportional-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PDT ₁ -Regler)	306
8.4.3.1	Invertierender PD/PDT ₁ -Regler	306
8.4.3.2	Nichtinvertierender PD/PDT ₁ -Regler	306
8.4.3.3	PD/PDT ₁ -Regler mit getrennt einstellbaren Parametern	307
8.4.4	Integral-Regler (I-Regler)	309
8.4.4.1	Invertierender Integral-Regler	309
8.4.4.2	Nichtinvertierender Integral-Regler	310
8.4.5	Proportional-Integral-Regler (PI-Regler)	311
8.4.5.1	Invertierender PI-Regler	311
8.4.5.2	Nichtinvertierender PI-Regler	311
8.4.5.3	PI-Regler mit unabhängig einstellbaren Parametern	312
8.4.6	Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID-Regler), Proportional-Integral-Differenzial-Regler mit Verzögerung I. Ordnung (PIDT ₁ -Regler)	313
8.4.6.1	PID/PIDT ₁ -Regler in additiver (paralleler) Form mit unabhängig voneinander einstellbaren Parametern	313
8.4.6.2	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit einem Verstärker	314
8.4.6.3	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit zwei Verstärkern	315
8.4.6.4	Invertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form mit Entkopplung	316
8.4.6.5	Nichtinvertierender PID/PIDT ₁ -Regler in multiplikativer (serieller) Form	317
8.5	Kontinuierliche Einstellung von Reglerparametern	317
8.6	Schaltungen zur Glättung von Regelkreissignalen	319
8.6.1	PT ₁ -Element mit invertierendem Trennverstärker	319
8.6.2	PT ₁ -Element mit nichtinvertierendem Trennverstärker	321
8.7	Zusammenfassung	322

9	Ermittlung mathematischer Modelle für regelungstechnische Übertragungselemente (Identifikation)	329
9.1	Einteilung von mathematischen Modellen	329
9.2	Anwendung der Modellbildung in der Regelungstechnik	330
9.2.1	Theoretische und experimentelle Analyse	330
9.2.2	Zusammenfassung	333
9.3	Experimentelle Analyse von linearen Übertragungselementen	333
9.3.1	Vorgehensweise bei der experimentellen Analyse	333
9.3.2	Experimentelle Analyse mit Sprungfunktionen	334
9.3.2.1	Bestimmung des prinzipiellen Übertragungsverhaltens aus dem Endwert der Sprungantwort	334
9.3.2.2	Bestimmung des Elementtyps aus Anfangswert und Anfangssteigung der Sprungantwort	337
9.3.2.3	Ableitung von Identifikationsmerkmalen aus den Eigenschaften von Sprungantworten	339
9.3.2.4	Sprungantwortverlauf ohne Überschwingen und ohne periodisches Schwingen	340
9.3.2.5	Sprungantwortverlauf mit Über- und Unterschwingen ohne periodisches Schwingen	341
9.3.2.6	Sprungantwortverläufe mit periodischem Schwingen	343
9.3.2.6.1	Identifikationsmerkmale von PT_2 -Elementen	343
9.3.2.6.2	PT_2 -Elemente mit Vorhalt- oder Verzögerungselement	349
9.3.2.7	Sprungantwortverläufe von Elementen mit Totzeit	352
9.3.3	Sprungantwortverläufe mit Wendepunkt und ohne Überschwingen	353
9.3.3.1	Prinzip des Wendetangentenverfahrens	353
9.3.3.2	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit zwei unterschiedlichen Zeitkonstanten	355
9.3.3.3	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit gleichen Zeitkonstanten	359
9.3.3.4	Wendetangentenverfahren für Übertragungselemente mit mehreren Zeitkonstanten	362
9.3.3.5	Zusammenfassung des Wendetangentenverfahrens	366
9.3.3.6	Zeitprozentkennwertmethode	367
9.3.4	Sprungantwortverläufe von Integral-Elementen	372
9.3.4.1	Eigenschaften von Integral-Elementen	372
9.3.4.2	Identifikation von reinen Integral-Elementen	372
9.3.4.3	Identifikation von Integral-Elementen mit Verzögerung	374
9.3.4.4	Identifikation von Integral-Elementen mit Totzeit	377
9.4	Sprungantworten und Identifizierungsgleichungen	379
9.4.1	Einleitung	379
9.4.2	Zusammenstellung von Sprungantwortfunktionen und mathematischen Modellen von Übertragungselementen	379
9.4.3	Zusammenfassung	405
9.5	Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren	406
9.5.1	Stochastische Prozesse, Modellbegriffe	406
9.5.2	MA-Modell (moving-average model)	406
9.5.3	AR-Modell (auto-regressive model)	408
9.5.4	ARMA-Modell (auto-regressive moving-average model)	409

9.5.5	Modelle mit zusätzlicher deterministischer Eingangsgröße	410
9.5.5.1	Allgemeine Modellstruktur	410
9.5.5.2	Modellarten mit deterministischer und stochastischer Eingangsgröße	412
9.5.6	Parameterschätzung von ARX-Modellen	412
9.5.6.1	Prinzip der Identifikation von dynamischen Systemen mit Parameterschätzverfahren (experimentelle Identifikation)	412
9.5.6.2	Fehlerarten für die Anwendung von Parameterschätzverfahren	413
9.5.6.3	Modellbestimmung bei Prozessen mit vernachlässigbaren Störgrößen	415
9.5.6.4	Modellbestimmung mit der Methode der kleinsten Quadrate	421
10	Optimierungskriterien und Einstellregeln für Regelkreise	429
10.1	Einleitung	429
10.2	Parameteroptimierung im Zeitbereich	430
10.2.1	Begriff der Regelfläche	430
10.2.2	Integralkriterien im Zeitbereich	431
10.2.2.1	Integralkriterium der Linearen Regelfläche	431
10.2.2.2	Integralkriterien der Betragsregelfläche	433
10.2.2.3	Integralkriterien der Quadratischen Regelfläche	434
10.2.3	Berechnung der Integralkriterien für Standardregelkreise II. Ordnung	438
10.3	Einstellregeln für Regelkreise	441
10.3.1	Anwendung der Einstellregeln	441
10.3.2	Einstellregeln von ZIEGLER und NICHOLS	441
10.3.3	Einstellregeln nach CHIEN, HRONES und RESWICK	442
10.3.4	Regler-Einstellung nach der T-Summen-Regel	445
10.3.4.1	Summenzeitkonstante einer Regelstrecke	445
10.3.4.2	Experimentelle Bestimmung der Summenzeitkonstanten	447
10.3.4.3	T-Summen-Regel für PI- und PID-Regler	447
10.3.4.4	Anwendung der T-Summen-Regel	449
10.4	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Betragsoptimum	452
10.4.1	Prinzip der Optimierung im Frequenzbereich	452
10.4.2	Einstellung von Regelkreisen nach dem Betragsoptimum	452
10.4.3	Anwendung des Verfahrens	456
10.4.3.1	Vereinfachung von Streckenübertragungsfunktionen	456
10.4.3.2	Satz von der Summe der kleinen Zeitkonstanten	456
10.4.3.3	Vereinfachung von Totzeitelementen	457
10.4.4	Anwendung des Betragsoptimums bei Regelstrecken höherer Ordnung	457
10.4.4.1	Kompensation einer großen Zeitkonstanten	457
10.4.4.2	Kompensation von zwei großen Zeitkonstanten	458
10.4.5	Einstellregeln für das Betragsoptimum	463
10.5	Optimierungskriterien im Frequenzbereich – Symmetrisches Optimum	464
10.5.1	Prinzip des Verfahrens und Anwendung bei IT ₁ -Regelstrecken	464
10.5.2	Standardeinstellung des Symmetrischen Optimums	469
10.5.3	Anwendung des Verfahrens bei integralen Regelstrecken mit Verzögerung höherer Ordnung	472
10.5.4	Anwendung des Verfahrens bei proportionalen Regelstrecken mit Verzögerungen höherer Ordnung	473
10.5.4.1	PT _n -Regelstrecken mit einer großen Zeitkonstanten	473
10.5.4.2	PT _n -Regelstrecken mit zwei großen Zeitkonstanten	473
10.5.5	Einstellregeln für das Symmetrische Optimum	474
10.5.6	Zusammenfassung zur Optimierung im Frequenzbereich	476

11	Digitale Regelungssysteme (Abtastregelungen)	477
11.1	Prinzipielle Arbeitsweise von digitalen Regelkreisen	477
11.1.1	Einleitung	477
11.1.2	Kontinuierliche und diskrete Signale in digitalen Regelungssystemen	477
11.1.3	Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	478
11.2	Basialgorithmen für digitale Regelungen	479
11.2.1	Einleitung	479
11.2.2	Proportionalalgorithmus	480
11.2.3	Approximation von Integration und Differenziation durch diskrete Operationen	480
11.2.3.1	Integralalgorithmen mit Rechtecknäherung	480
11.2.3.2	Integralalgorithmus mit Trapeznäherung	484
11.2.3.3	Einfache Differenzialalgorithmen	485
11.2.3.4	Differenzialalgorithmen mit Mittelwertbildung	487
11.2.4	Regelalgorithmen für Standardregler	487
11.2.4.1	PID-Stellungsalgorithmus	487
11.2.4.2	PID-Geschwindigkeitsalgorithmus	488
11.2.4.3	PID-Standardregelalgorithmen	495
11.2.4.4	Modifizierte PID-Regelalgorithmen	497
11.3	Einstellregeln für digitale Regelkreise	497
11.3.1	Quasikontinuierliche digitale Regelkreise	497
11.3.2	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen der Regelstrecke	498
11.3.3	Bestimmung der Abtastzeit aus Kenngrößen des Regelkreises	499
11.3.4	Einstellregeln mit Berücksichtigung der Abtastzeit	504
11.4	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Zeitbereich	506
11.4.1	Allgemeines	506
11.4.2	Differenzgleichungen	506
11.4.3	Lösung von Differenzgleichungen	506
11.4.3.1	Ermittlung der Lösung durch Rekursion	506
11.4.3.2	Lösung mit homogenem und partikulärem Ansatz	508
11.4.4	Stabilität von Abtastsystemen im Zeitbereich	512
11.5	Mathematische Methoden zur Berechnung von digitalen Regelkreisen im Frequenzbereich	513
11.5.1	Technische und mathematische Grundfunktionen von digitalen Regelkreisen	513
11.5.1.1	Allgemeines	513
11.5.1.2	Abtastung von kontinuierlichen Signalen	514
11.5.1.3	Darstellung von zeitdiskreten Signalen durch Folgen	516
11.5.1.4	Ausführung des Regelalgorithmus (Berechnung der Stellgröße)	516
11.5.1.5	Speicherung der diskreten Stellgröße (Halteglied)	517
11.5.2	z -Transformation	519
11.5.2.1	Einleitung	519
11.5.2.2	Definition der z -Transformation	520
11.5.2.3	Rechenregeln der z -Transformation	522
11.5.2.4	Tabellen zur z -Transformation	528
11.5.2.5	Anwendung der Tabellen zur z -Transformation	554
11.5.3	Inverse z -Transformation (z -Rücktransformation)	555
11.5.3.1	Verfahren zur z -Rücktransformation	555
11.5.3.2	Rücktransformation mit dem komplexen Umkehrintegral	556
11.5.3.3	Partialbruchzerlegung, Rücktransformation mit Tabelle	556
11.5.3.4	Rücktransformation mit der Potenzreihenentwicklung	558
11.5.3.5	Berechnung der Impulsfunktion mit Rekursion	559

11.5.4	z-Übertragungsfunktionen (Impulsübertragungsfunktionen)	560
11.5.4.1	z-Übertragungsfunktionen von zeitdiskreten Elementen	560
11.5.4.2	z-Übertragungsfunktionen von Regelalgorithmen	561
11.5.4.3	z-Übertragungsfunktionen von zeitkontinuierlichen Elementen	562
11.5.4.4	Tabelle von z-Übertragungsfunktionen für zeitkontinuierliche Elemente (Regelstrecken mit Halteglied)	564
11.5.4.5	Eigenschaften von z-Übertragungsfunktionen	568
11.5.4.6	Normierte Testfolgen für z-Übertragungsfunktionen	571
11.5.4.7	Umformungsregeln für z-Übertragungsfunktionen	572
11.5.4.7.1	Voraussetzungen für die Anwendung der Umformungsregeln	572
11.5.4.7.2	Einfache Strukturen	573
11.5.4.7.3	Reihenschaltung von Übertragungselementen	574
11.5.4.7.4	Parallelschaltung von Übertragungselementen	575
11.5.4.7.5	Kreisstrukturen	575
11.5.4.8	z-Übertragungsfunktionen von digitalen Regelkreisen	576
11.5.4.8.1	Voraussetzungen	576
11.5.4.8.2	Führungsübertragungsverhalten	577
11.5.4.8.3	Störungsübertragungsverhalten (Versorgungsstörgröße)	577
11.5.4.8.4	Störungsübertragungsverhalten (Laststörgröße)	579
11.5.4.8.5	Berechnung von z-Übertragungsfunktionen	580
11.6	Stabilität von digitalen Regelungssystemen	583
11.6.1	Stabilitätsdefinition	583
11.6.2	Verfahren zur Stabilitätsbestimmung	585
11.6.2.1	Stabilitätskriterien	585
11.6.2.2	Anwendung der Bilineartransformation	586
11.6.2.3	Koeffizientenkriterien (Bilineartransformation)	589
11.6.2.4	Stabilitätskriterium von JURY	592
11.7	Kompensationsregler für digitale Regelkreise	594
11.7.1	Prinzip der Kompensation	594
11.7.2	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit (Dead-Beat-Regler)	595
11.7.3	Kompensationsregler für endliche Einstellzeit mit Vorgabe des ersten Stellgrößenwerts	607
11.8	Diskretisierung von kontinuierlichen Übertragungsfunktionen	612
11.8.1	Anwendung von Diskretisierungsverfahren	612
11.8.2	Substitutionsverfahren	613
11.8.3	Stabilität der Verfahren	620
11.8.4	Systemantwortinvariante Transformationen	623
11.8.4.1	Invariante Systemreaktionen im Zeitbereich	623
11.8.4.2	Impulsinvariante Transformation	624
11.8.4.3	Sprunginvariante Transformation	624
12	Zustandsregelungen	627
12.1	Allgemeines	627
12.2	Mathematische Methoden zur Berechnung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	628
12.2.1	Beschreibung von Übertragungssystemen mit Zustandsvariablen	628
12.2.1.1	Allgemeine Form des Gleichungssystems	628
12.2.1.2	Beschreibung linearer Mehrgrößensysteme mit Zustandsvariablen	629
12.2.1.3	Beschreibung linearer Eingrößensysteme mit Zustandsvariablen	633
12.2.2	Lösung der Zustandsgleichung im Zeitbereich	635
12.2.2.1	Berechnung der Matrix-e-Funktion	635

	12.2.2.2	Differenziation der Matrix-e-Funktion	636
	12.2.2.3	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	636
	12.2.2.4	Transitionsmatrix	637
12.2.3		Lösung der Zustandsgleichung im Frequenzbereich	641
12.2.4		Normalformen von Übertragungssystemen	643
	12.2.4.1	Allgemeines	643
	12.2.4.2	Regelungsnormalform	643
	12.2.4.3	Beobachtungsnormalform	648
	12.2.4.4	Zusammenfassung	653
12.2.5		Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit von Übertragungssystemen	653
	12.2.5.1	Steuerbarkeit	653
	12.2.5.2	Beobachtbarkeit	655
	12.2.5.3	Untersuchung der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit eines Regelungssystems	657
12.2.6		Transformation auf Regelungs- und Beobachtungsnormalform	659
	12.2.6.1	Allgemeine Form der Transformationsgleichungen	659
	12.2.6.2	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Regelungsnormalform	660
	12.2.6.3	Berechnung der Transformationsmatrix für die Transformation auf Beobachtungsnormalform	662
12.3		Regelung durch Zustandsrückführung	664
	12.3.1	Allgemeines	664
	12.3.2	Berechnung von Zustandsregelungen	665
	12.3.2.1	Ermittlung von Zustandsreglern durch Polvorgabe	665
	12.3.2.2	Berechnung des Vorfilters	667
	12.3.3	Zustandsregelung mit Beobachter	674
	12.3.3.1	Prinzipielle Arbeitsweise von Beobachtern	674
	12.3.3.2	Ermittlung von Zustandsbeobachtern durch Polvorgabe	678
	12.3.4	Systematische Vorgehensweise bei der Berechnung von Zustandsreglern und Zustandsbeobachtern	684
	12.3.5	Zusammenfassung	684
12.4		Regelungen durch Zustandsrückführung mit verbessertem Störungsverhalten	685
	12.4.1	Allgemeines	685
	12.4.2	Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	686
	12.4.2.1	Berechnung des Zustandsreglers mit Vorfilter	686
	12.4.2.2	Störungsverhalten der Zustandsregelung	688
	12.4.2.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	690
	12.4.2.4	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter	695
	12.4.3	Proportional-Integral-(PI)-Zustandsregelung	695
	12.4.3.1	Zustandsgleichungen für die PI-Zustandsregelung	695
	12.4.3.2	Berechnung der Zustandsregelung mit überlagertem PI-Regler	699
	12.4.3.3	Störungsverhalten der PI-Zustandsregelung	703
	12.4.4	Robuste Regelung – Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung	704
	12.4.4.1	Begriff der robusten Regelung	704
	12.4.4.2	Vergleich der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößenbeobachter mit der PI-Zustandsregelung auf Robustheit	704
	12.4.5	Zusammenfassung	707

13	Regelungen in der elektrischen Antriebstechnik	709
13.1	Allgemeines	709
13.2	Regelstrecken für elektrische Antriebe	709
13.2.1	Mathematisches Modell der Regelstrecke	709
13.2.1.1	Elektrischer Teil der Regelstrecke	709
13.2.1.2	Mechanischer Teil der Regelstrecke	712
13.2.2	Vereinfachung der Regelstrecke	714
13.3	Zeitverläufe von Führungs- und Störgrößen bei Antriebsregelungen von Drehmaschinen	715
13.4	Einschleifige Lageregelung	717
13.4.1	Berechnung des Lagereglers	717
13.4.2	Führungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	718
13.4.3	Störungsverhalten der einschleifigen Lageregelung	720
13.5	Lageregelung mit Kaskadenstruktur	721
13.5.1	Allgemeines	721
13.5.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	721
13.5.2.1	Berechnung des Momentenreglers	721
13.5.2.2	Drehzahlregelung mit unterlagelter Momentenregelung	722
13.5.2.2.1	Berechnung des Drehzahlreglers	722
13.5.2.2.2	Führungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagelter Momentenregelung	723
13.5.2.3	Lageregelung mit unterlagelter Drehzahl- und Momentenregelung	725
13.5.2.3.1	Berechnung des Lagereglers	725
13.5.2.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagelter Drehzahl- und Momentenregelung	727
13.5.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit Kaskadenstruktur	729
13.5.3.1	Störungsverhalten der Regelstrecke	729
13.5.3.2	Störungsverhalten der Drehzahlregelung mit unterlagelter Momentenregelung	730
13.5.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagelter Drehzahl- und Momentenregelung	732
13.6	Zusammenfassung	733
13.7	Digitale Lageregelung mit Kaskadenstruktur	734
13.7.1	Allgemeines	734
13.7.2	Digitale Winkelgeschwindigkeitsregelung (Drehzahlregelung) mit unterlagelter Momentenregelung	734
13.7.2.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	734
13.7.2.2	Führungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagelter Momentenregelung	735
13.7.2.3	Störungsverhalten der Winkelgeschwindigkeitsregelung mit unterlagelter Momentenregelung	738
13.7.3	Digitale Lageregelung mit unterlagelter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	739
13.7.3.1	Regelalgorithmus und Abtastzeit	739
13.7.3.2	Führungsverhalten der Lageregelung mit unterlagelter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	739
13.7.3.3	Störungsverhalten der Lageregelung mit unterlagelter Winkelgeschwindigkeits- und Momentenregelung	740
13.7.4	Zusammenfassung	741

13.8	Lageregelung mit Zustandsregler	741
13.8.1	Allgemeines	741
13.8.2	Berechnung der Zustandsregelung	741
13.8.2.1	Ermittlung des Zustandsreglers durch Polvorgabe	741
13.8.2.2	Berechnung des Vorfilters für den Zustandsregler	745
13.8.2.3	Sprungverhalten der Lageregelung mit Zustandsregler	746
13.8.2.4	Stellgliedzeitkonstante und Stellgrößenaufwand	748
13.8.3	Berechnung des Zustands- und Störgrößenbeobachters	750
13.8.3.1	Struktur des Zustands- und Störgrößenbeobachters	750
13.8.3.2	Ermittlung des Beobachters durch Polvorgabe	752
13.8.3.3	Berechnung des Vorfilters für die Störgrößenaufschaltung	755
13.8.3.4	Dynamisches Verhalten des Beobachters	756
13.8.3.5	Störungsverhalten der Zustandsregelung mit Zustands- und Störgrößen- beobachter und Störgrößenaufschaltung	758
13.8.4	Zustandslageregelung mit Störgrößenaufschaltung	759
13.9	Digitale Drehzahl- und Lageregelungen mit Zustandsregler	761
13.9.1	Zustandsdarstellung für digitale Regelungen	761
13.9.2	Digitale Drehzahlregelung mit Zustandsregler	761
13.9.3	Digitale Integral-Zustandslageregelung	767
13.10	Zusammenfassung	770
14	Nichtlineare Regelungen	771
14.1	Einleitung	771
14.1.1	Verfahren zur Untersuchung nichtlinearer Systeme	771
14.1.2	Definition der Nichtlinearität	771
14.1.3	Lineare und nichtlineare Operationen	773
14.1.4	Eigenschaften von nichtlinearen Regelkreiselementen und -systemen	776
14.2	Grundtypen von nichtlinearen Elementen	783
14.2.1	Prinzipielle Eigenschaften von nichtlinearen Funktionen	783
14.3	Verfahren der Linearisierung	786
14.3.1	Allgemeines	786
14.3.2	Linearisierung mit inversen Kennlinien	786
14.3.3	Linearisierung durch Rückführung	788
14.3.4	Linearisierung im Arbeitspunkt (Tangentenlinearisierung), Vernachlässigung höherer Ableitungen der TAYLOR-Reihe	790
14.3.5	Harmonische Linearisierung mit der Beschreibungsfunktion, Vernachlässigung von höheren Harmonischen der FOURIER-Reihe	791
14.3.5.1	Grundlage des Verfahrens	791
14.3.5.2	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit eindeutigen Kennlinien- funktionen	794
14.3.5.3	Beschreibungsfunktionen von Elementen mit mehrdeutigen Kennlinien- funktionen	803
14.3.5.4	Direkte Berechnung von Beschreibungsfunktionen aus Kennlinien- funktionen	807
14.3.5.5	Rechenregeln für Beschreibungsfunktionen	812
14.3.5.6	Beschreibungsfunktionen von Kennlinienelementen (Tabelle)	821
14.3.5.7	Berechnung der Gleichung der Harmonischen Balance	849
14.3.5.8	Stabilität von Grenzschwingungen	860
14.4	Untersuchung der Stabilität nichtlinearer Systeme	864
14.4.1	Methode der Phasenebene (Zustandsebene)	864

14.4.2	Eigenschaften von Zustandskurven in der Phasenebene	865
14.4.3	Berechnung von linearen Systemen II. Ordnung im Zeitbereich und in der Phasenebene	866
14.4.4	Ruhelagen von linearen und nichtlinearen Systemen	870
14.4.5	Stabilität von Ruhelagen	870
14.4.6	Berechnung der Stabilität von Ruhelagen	874
14.4.7	Stabilitätsuntersuchung mit der direkten Methode von LJAPUNOW	878
14.4.7.1	Grundgedanke der direkten Methode	878
14.4.7.2	Stabilitätsuntersuchung mit der LJAPUNOW-Funktion	880
14.4.8	Stabilitätskriterium von POPOW	882
14.4.8.1	Absolute Stabilität	882
14.4.8.2	Numerische Form des POPOW-Kriteriums	883
14.4.8.3	Ortskurvenform des POPOW-Kriteriums	886
14.5	Regelkreise mit schaltenden Reglern	888
14.5.1	Anwendung von schaltenden Reglern	888
14.5.2	Regelkreise mit Zweipunktreglern	890
14.5.2.1	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und proportionalen Regelstrecken	890
14.5.2.2	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken mit Totzeit	894
14.5.2.3	Zweipunktregler an proportionalen Regelstrecken ohne Totzeit	902
14.5.2.4	Berechnung der Kenngrößen von Regelkreisen mit Zweipunktreglern und Regelstrecken mit Integral-Anteil	903
14.5.3	Berechnung von Regelkreisen mit Dreipunktreglern	908
14.5.4	Schaltende Regler mit Rückführung	911
14.5.4.1	Eigenschaften von quasistetigen Reglern	911
14.5.4.2	Einfluss der Rückführung bei schaltenden Reglern	912
14.5.4.3	Quasistetige Standardregler (Regler mit Rückführung)	915
15	Anwendung der Fuzzy-Logik in der Regelungstechnik	921
15.1	Grundbegriffe der Fuzzy-Logik	921
15.1.1	Scharfe und unscharfe Mengen, Zugehörigkeitsfunktionen	921
15.1.2	Beschreibung von scharfen und unscharfen Mengen	922
15.1.2.1	Beschreibungsformen von scharfen Mengen	922
15.1.2.2	Beschreibungsformen von unscharfen Mengen	923
15.1.3	Darstellung von unscharfen Mengen mit Zugehörigkeitsfunktionen	926
15.1.4	Linguistische Variablen und Werte	930
15.1.4.1	Linguistische Variablen zur Beschreibung von unscharfen Aussagen	930
15.1.4.2	Struktur von linguistischen Variablen, linguistische Operatoren	932
15.2	Operationen mit unscharfen Mengen	938
15.2.1	Elementaroperationen mit scharfen Mengen	938
15.2.2	Operationen mit unscharfen Mengen	939
15.2.2.1	Elementaroperationen mit unscharfen Mengen	939
15.2.2.2	Allgemeine Anforderungen an Fuzzy-Operatoren	942
15.2.2.3	t -Normen und t -Konormen (s -Normen)	944
15.2.2.4	Parametrisierte t -Normen und t -Konormen	949
15.2.2.5	Kompensatorische und mittelnde Operatoren	950
15.3	Unschärfe Relationen	953
15.3.1	Einstellige Relationen	953
15.3.2	Scharfe Relationen mit scharfen Mengen	954

15.3.3	Unschärfe Relationen mit scharfen Mengen	955
15.3.4	Unschärfe Relationen mit unsharp Mengen	956
15.3.5	Verknüpfung von unsharp Relationen	958
15.3.6	Verkettung (Komposition) von unsharp Relationen	960
15.3.7	Unschärfe Schließen (Fuzzy-Inferenz)	964
15.4	Fuzzy-Regelungen und -Steuerungen (Fuzzy-Control)	968
15.4.1	Anwendungsgebiete von Fuzzy-Reglern	968
15.4.2	Arten von Fuzzy-Reglern	969
15.4.3	Struktur und Komponenten von relationalen Fuzzy-Reglern	969
15.4.3.1	Prinzipieller Aufbau	969
15.4.3.2	Fuzzifizierung	970
15.4.4	Inferenzkomponenten von Fuzzy-Reglern	973
15.4.4.1	Regelbasis	973
15.4.4.2	Teilschritte des Inferenzverfahrens	976
15.4.4.3	Auswertung der Regelprämissen	976
15.4.4.4	Regelaktivierung und Aggregation	979
15.4.5	Defuzzifizierung	985
15.4.5.1	Defuzzifizierungsverfahren	985
15.4.5.2	Defuzzifizierung mit der maximalen Höhe der Zugehörigkeitsfunktion	985
15.4.5.3	Defuzzifizierung mit Schwerpunktverfahren	987
15.4.5.4	Allgemeines Schwerpunktverfahren	987
15.4.5.5	Schwerpunktsummen-Verfahren für die Inferenz mit der SUM-MIN-, SUM-PROD-Methode	990
15.4.5.6	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Rechteckfunktionen)	995
15.4.5.7	Schwerpunktverfahren für vereinfachte Zugehörigkeitsfunktionen (Singletons)	998
15.4.5.8	Schwerpunktverfahren für erweiterte Zugehörigkeitsfunktionen	1000
15.4.6	Struktur und Komponenten von funktionalen Fuzzy-Reglern	1001
15.4.6.1	Unterschiede von relationalen und funktionalen Fuzzy-Reglern	1001
15.4.6.2	Prinzipieller Aufbau von funktionalen Fuzzy-Reglern	1003
15.5	Übertragungsverhalten von Fuzzy-Reglern	1005
15.5.1	Allgemeine Eigenschaften von Fuzzy-Reglern	1005
15.5.2	Kennlinien von Fuzzy-Reglern	1006
15.5.2.1	Einfluss der Defuzzifizierung	1006
15.5.2.2	Einstellung von linearen Übertragungsfunktionen	1008
15.5.2.3	Einstellung von nichtlinearen Übertragungsfunktionen	1011
15.5.3	Fuzzy-PID-Regler	1015
15.5.3.1	PID-ähnliche Fuzzy-Regler	1015
15.5.3.2	Fuzzy-P-Regler	1016
15.5.3.3	Fuzzy-PD-Regler	1020
15.5.3.4	Fuzzy-PI-Regler (Stellungsalgorithmus)	1025
15.5.3.5	Fuzzy-PI-Regler (Geschwindigkeitsalgorithmus)	1028
15.5.3.6	Fuzzy-PID-Regler	1029
15.5.4	Strukturen von Fuzzy-Regelkreisen	1031
15.5.4.1	Einsatz von Fuzzy-Komponenten	1031
15.5.4.2	Fuzzy-Regler als Ersatz für konventionelle Regler	1031
15.5.4.3	Erweiterung von konventionellen Regelkreisstrukturen mit Fuzzy-Komponenten (Fuzzy-Hybrid-Strukturen)	1032

16	Berechnung von Regelungssystemen mit MATLAB	1035
16.1	Allgemeines	1035
16.2	Einführung in MATLAB	1036
16.2.1	Einfache Berechnungen mit MATLAB	1036
16.2.2	Vektoren, Matrizen und Polynome – Eingabe und Grundoperationen	1039
16.2.2.1	Vektoren	1039
16.2.2.2	Matrizen	1041
16.2.2.3	Polynome	1043
16.2.2.4	Elementweise Multiplikation und Division von Vektoren und Matrizen	1045
16.2.3	m-Files	1045
16.2.3.1	Script-Files und Function-Files	1045
16.2.3.2	Script-Files	1046
16.2.3.3	Function-Files	1046
16.2.4	Kontrollstrukturen	1047
16.2.4.1	Arten von Kontrollstrukturen	1047
16.2.4.2	for-Schleife	1047
16.2.4.3	while-Schleife	1048
16.2.4.4	if-elseif-else-Struktur	1048
16.2.4.5	switch-case-otherwise-Struktur	1050
16.2.4.6	Verkürzung der Rechenzeit	1050
16.2.5	Nützliche Anweisungen: echo, keyboard, pause, type, what	1051
16.2.6	Grafische Darstellungen	1051
16.2.6.1	Zweidimensionale Grafiken	1051
16.2.6.2	Dreidimensionale Grafiken	1056
	Tabellen wichtiger Standardfunktionen für MATLAB	1062
16.3	Objektorientierte Programmierung	1069
16.3.1	LTI-Objekte für lineare zeitinvariante Systeme	1069
16.3.2	Daten und Methoden für LTI-Objekte	1070
16.3.3	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Erzeugung und Konversion von LTI-Modellen	1077
16.4	Umformung von Signalflussplänen	1077
16.4.1	Allgemeines	1077
16.4.2	Kettenstruktur	1078
16.4.3	Parallelstruktur	1078
16.4.4	Kreisstrukturen	1079
16.4.4.1	Struktur mit indirekter Gegenkopplung	1079
16.4.4.2	Struktur mit direkter Gegenkopplung	1080
16.4.5	Ermittlung von Führungs- und Störungsübertragungsfunktionen für Signalflusspläne	1080
16.4.6	Umformung vermaschter Signalflusspläne	1081
16.4.7	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Umformung von Signalflussplänen	1083
16.5	Berechnung von Regelungen im Zeitbereich	1083
16.5.1	Allgemeines	1083
16.5.2	Impulsantwort	1084
16.5.3	Sprungantwort	1085
16.5.4	Anstiegsantwort	1086
16.5.5	Sinusantwort	1088
16.5.6	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Regelungen im Zeitbereich	1089

16.6	Berechnung von Regelungen im Frequenzbereich	1090
16.6.1	Eigenschaften von Übertragungsfunktionen	1090
16.6.1.1	Übertragungsfunktion und Pol-Nullstellenplan	1090
16.6.1.2	Partialbruchzerlegung	1093
16.6.1.3	Übertragungsfunktion und Wurzelortskurve	1095
16.6.2	Frequenzgang und Ortskurve	1098
16.6.2.1	Ortskurve für ein PT_1 - und ein PT_2 -Element	1098
16.6.2.2	Ortskurve eines offenen Regelkreises	1099
16.6.3	Frequenzgang und BODE-Diagramm	1101
16.6.3.1	BODE-Diagramm eines $PIDT_1$ -Reglers	1101
16.6.3.2	Amplituden- und Phasenreserve eines Regelkreises	1102
16.6.3.3	BODE-Diagramm für ein PT_2 -Element bei verschiedenen Dämpfungen ..	1105
16.6.4	Berechnung von LAPLACE-Transformationen und -Rücktransformationen mit der <i>Symbolic Math Toolbox</i> von MATLAB	1107
16.6.5	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Regelungen im Frequenzbereich	1111
16.7	Berechnung von digitalen Regelungssystemen mit MATLAB	1112
16.7.1	Allgemeines	1112
16.7.2	Bestimmung der z-Übertragungsfunktion für verschiedene Diskretisierungsverfahren	1113
16.7.3	Wahl der Abtastzeit für ein Übertragungssystem	1115
16.7.4	Untersuchung des Zeitverhaltens von digitalen Regelungen	1117
16.7.4.1	Wahl der Abtastzeit	1117
16.7.4.2	Ermittlung der z-Übertragungsfunktion	1117
16.7.4.3	Impulsantwortfolge	1119
16.7.4.4	Sprungantwortfolge	1120
16.7.4.5	Anstiegsantwortfolge	1122
16.7.5	Reglerauslegung bei Nichterfüllung des Abtastzeitkriteriums	1123
16.7.6	Dead-Beat-Regelung für sprungförmige Führungsgrößen	1125
16.7.7	z-Übertragungsfunktion und Pol-Nullstellenplan	1127
16.7.7.1	Dämpfung und Kennkreisfrequenz von Übertragungsfunktionen mit konjugiert komplexen Nullstellen	1127
16.7.7.2	Pol-Nullstellenplan für z-Übertragungsfunktionen	1128
16.7.7.3	z-Übertragungsfunktion und Wurzelortskurve	1129
16.7.8	Berechnung von z-Transformationen und -Rücktransformationen mit der <i>Symbolic Math Toolbox</i> von MATLAB	1132
16.7.9	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von digitalen Regelungssystemen	1140
16.8	Berechnung von Zustandsregelungen mit MATLAB	1141
16.8.1	Allgemeines	1141
16.8.2	Signalflussstrukturen mit Zustandsmodellen	1141
16.8.3	Lösung der Zustandsgleichung	1143
16.8.3.1	Lösung der homogenen Zustandsgleichung	1143
16.8.3.2	Lösung der inhomogenen Zustandsgleichung	1144
16.8.4	Modellkonversion: Übertragungsfunktion und Zustandsdarstellung	1146
16.8.5	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	1148
16.8.5.1	Untersuchung eines Regelungssystems auf Steuerbarkeit	1148
16.8.5.2	Untersuchung eines Regelungssystems auf Beobachtbarkeit	1149

16.8.6	Ähnlichkeitstransformationen	1151
16.8.6.1	Transformation auf Regelungsnormalform	1151
16.8.6.2	Transformation auf Beobachtungsnormalform	1152
16.8.7	Zustandsregelungen	1153
16.8.7.1	Zustandsregelung einer PT_2 -Regelstrecke	1153
16.8.7.2	Zustandsregelung mit Zustandsbeobachter	1155
16.8.8	Tabelle für Funktionen der <i>Control System Toolbox</i> zur Berechnung von Zustandsregelungen	1160
16.9	Grafisches User Interface <i>ltiview</i>	1161
16.10	Grafisches User Interface <i>SISO Design Tool</i>	1165
17	Berechnung von Regelungssystemen mit Simulink	1169
17.1	Allgemeines	1169
17.2	Einführung in Simulink	1169
17.2.1	Modellbildung und Simulation einer Drehzahlregelung	1169
17.2.1.1	Start von Simulink	1169
17.2.1.2	Kopieren der Blöcke in das Simulink-Arbeitsfenster	1171
17.2.1.3	Modifizieren der Blöcke	1171
17.2.1.4	Einfügen von Wirkungslinien und Text	1172
17.2.1.5	Aufzeichnen der Sprungantwort	1173
17.2.2	Erstellung von Signalflussplänen mit Simulink	1174
17.2.2.1	Allgemeines	1174
17.2.2.2	Editieren von Blöcken	1174
17.2.2.3	Wirkungslinien editieren	1176
17.2.2.4	Kommentar einfügen	1179
17.3	Simulation zeitkontinuierlicher Regelungen	1180
17.3.1	Allgemeines	1180
17.3.2	Wichtige Übertragungsböcke der <i>Continuous Block Library</i>	1180
17.3.2.1	Sprungantwort mit <i>Step</i> -, <i>Integrator</i> -, <i>Mux</i> - und <i>Scope</i> -Block	1180
17.3.2.2	Anstiegsantwort mit <i>Ramp</i> -, <i>Derivative</i> - und <i>Scope</i> -Block	1182
17.3.2.3	Impulsantwort mit <i>Step</i> -, <i>Sum</i> -, <i>Transfer Fcn</i> -, <i>Mux</i> - und <i>Scope</i> -Block	1184
17.3.2.4	Anstiegsantwort mit <i>Ramp</i> -, <i>Transport Delay</i> -, <i>Zero-Pole</i> -, <i>Mux</i> - und <i>Scope</i> -Block	1185
17.3.2.5	Regelkreis mit <i>Gain</i> -, <i>State-Space</i> - und <i>Floating Scope</i> -Block	1185
17.3.3	Geschwindigkeitsregelung mit trapezförmigem Führungsgrößenprofil	1187
17.3.4	Ermittlung eines Zustandsmodells mit der Funktion <i>linmod</i>	1189
17.3.5	Streckensteuerung für eine Linearachse	1190
17.3.6	Streckensteuerung für eine Linearachse mit Führungsgrößenvorsteuerung	1192
17.3.7	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben	1194
17.3.8	Bahnsteuerung mit zwei Vorschubantrieben und Führungsgrößenvorsteuerung	1197
17.4	Simulation und Programmierung mit Simulink	1199
17.4.1	Ablauf einer Simulation	1199
17.4.2	Algebraische Schleifen	1200
17.4.3	Numerische Lösungsverfahren und Simulations-Parameter für Simulink-Modelle	1203
17.4.3.1	Numerische Lösungsverfahren	1203
17.4.3.2	Simulations-Parameter	1204
17.4.3.3	Simulation einer Lageregelung mit Zerspanungsprozess (steifes System)	1206
17.4.4	Start der Simulation von der <i>MATLAB</i> -Umgebung	1210
17.4.4.1	Allgemeines	1210

17.4.4.2	Simulation eines Gleichstrommotors mit Getriebe	1210
17.4.4.3	Setzen und Abfragen der Simulationsparameter mit <code>simset</code> und <code>simget</code>	1213
17.4.5	Simulink-Subsysteme (Untersysteme, hierarchische Modelle)	1214
17.4.5.1	Allgemeines	1214
17.4.5.2	Strukturierung von Simulink-Modellen durch Untersysteme	1215
17.4.5.3	Strukturierung von Simulink-Modellen mit Subsystem-Blöcken	1217
17.5	Simulation digitaler Regelungen	1219
17.5.1	Allgemeines	1219
17.5.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Discrete Block Library	1220
17.5.2.1	Sprungantwortfolge einer zeitdiskreten PT_1 -Regelstrecke mit Unit Delay-Block	1220
17.5.2.2	Sprungantwortfolge mit Discrete-Time Integrator-Block	1221
17.5.2.3	Sprungverhalten einer I_2 -Regelstrecke mit Halteglied	1222
17.5.2.4	Einschleifiger digitaler Regelkreis mit Zero-Order Hold-Block	1224
17.5.3	Digitale Kaskadenregelung mit unterschiedlichen Abtastzeiten	1225
17.5.4	Digitale Zustandsregelungen	1228
17.5.4.1	Diskretisierung einer Zustandsregelung	1228
17.5.4.2	Zustands-Drehzahlregelung mit zeitdiskretem Streckenmodell	1231
17.5.4.3	Zustands-Drehzahlregelung mit Zustandsbeobachter	1233
17.5.5	Lösungsverfahren für digitale Regelungen	1233
17.6	Simulation nichtlinearer und zeitvarianter Systeme	1234
17.6.1	Allgemeines	1234
17.6.2	Wichtige Übertragungsblöcke der Discontinuities Block Library	1235
17.6.2.1	Sinusantwort mit Sine Wave-, Dead Zone- und XY Graph-Block	1235
17.6.2.2	Sinusantwort mit Sine Wave- und Saturation-Block	1235
17.6.2.3	Sinusantwort mit Sine Wave- und Backlash-Block	1236
17.6.2.4	Sinusantwort mit Sine Wave- und Relay-Block	1236
17.6.3	Linearisierung des nichtlinearen Modells eines Gleichstrommotors mit <code>linmod</code>	1237
17.6.4	Kraftregelung an Arbeitsmaschinen	1239
17.6.5	Nichtlineare Lageregelung	1242
17.6.6	Simulation von zeitvarianten Systemen	1245
17.7	Simulink-Bibliotheken	1248
17.7.1	Simulink Library, Standardbibliotheken von Simulink	1248
17.7.2	Commonly Used Blocks Library, häufig verwendete Blöcke	1249
17.7.3	Continuous Block Library, Modellblöcke für kontinuierliche Systeme	1250
17.7.4	Discontinuities Block Library, Modellblöcke für diskontinuierlich arbeitende Systeme	1260
17.7.5	Discrete Block Library, Modellblöcke für zeitdiskrete Systeme	1263
17.7.6	Logic and Bit Operations Block Library, Funktionsbibliothek für Logik- und Bitoperationen	1278
17.7.7	Lookup Tables Block Library, Index-Tabellen	1283
17.7.8	Math Operations Block Library, mathematische Funktionsbibliothek	1286
17.7.9	Model Verification Block Library, Modellüberprüfung	1297
17.7.10	Model-Wide Utilities Block Library, Hilfsblöcke	1300
17.7.11	Ports & Subsystems Block Library, Ein- und Ausgänge (Ports) und Modellblöcke für Subsysteme	1301
17.7.12	Signal Attributes Block Library, Modellblöcke für die Modifikation und Anzeige von Signaleigenschaften	1305

17.7.13	Signal Routing Block Library, Modellblöcke für die Signalverbindung zwischen Systemmodellen und Blöcken	1308
17.7.14	Sinks Block Library, Datensenken, Blöcke für die Anzeige und Ausgabe von Daten und Signalen	1314
17.7.15	Sources Block Library, Datenquellen, Blöcke für die Eingabe von Daten und Signalen	1316
17.7.16	User-Defined Functions Block Library, anwenderdefinierte Funktionsblöcke	1321
18	Numerische Verfahren für die Regelungstechnik	1323
18.1	Einleitung	1323
18.2	Ermittlung der Nullstellen der charakteristischen Gleichung	1323
18.2.1	Lösung von algebraischen Gleichungen	1323
18.2.2	NEWTON-Verfahren	1324
18.2.3	BAIRSTOW-Verfahren	1325
18.2.4	C-Programm zur Berechnung von reellen und komplexen Nullstellen von Polynomen	1326
	18.2.4.1 Einleitung	1326
	18.2.4.2 Programmbeschreibung und Programm	1326
	18.2.4.3 Anwendungsbeispiel	1329
18.3	Numerische Verfahren zur Lösung von Differenzialgleichungen	1329
18.3.1	Einleitung	1329
18.3.2	Grundlagen des RUNGE-KUTTA-Verfahrens	1330
18.3.3	Umformung von Differenzialgleichungen höherer Ordnung in Systeme von Differenzialgleichungen I. Ordnung	1332
18.3.4	Programm zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens von linearen Regelungssystemen ohne Totzeit	1335
18.3.5	Anwendungsbeispiel	1337
19	Formelzeichen und Abkürzungen	1339
19.1	Allgemeines	1339
19.2	Formelzeichen und Abkürzungen der klassischen Regelungstechnik	1339
19.3	Formelzeichen für Zustandsregelungen	1348
19.4	Formelzeichen und Abkürzungen für Anwendungen der Fuzzy-Logik	1349
20	Fachbücher und Normen zur Regelungstechnik, regelungstechnische Begriffe	1353
20.1	Deutschsprachige Fachliteratur	1353
20.2	Fremdsprachige Fachliteratur	1355
20.3	Regelungstechnische Begriffe: deutsch-englisch	1358
20.4	Regelungstechnische Begriffe: englisch-deutsch	1371
20.5	Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: deutsch-englisch	1385
20.6	Begriffe der Fuzzy-Logik, Fuzzy-Regelung: englisch-deutsch	1390
	Sachwortverzeichnis	1395