

Inhaltsverzeichnis

1 Zustandsregelungen	11
1.1 Regelstrecke, Transitionsmatrix	11
1.2 Diagramm der Zustandsvariablen (Zustandsgrößen)	13
1.3 Eingrößenstrecken in Regelungsnormalform	13
1.4 Andere Normalformen	16
1.5 Modale Form der Zustandsraum-Darstellung	17
1.6 Varianten der Modalmatrix	21
1.7 Steuerbarkeit	22
1.8 Beobachtbarkeit	22
1.9 Störbarkeit	23
1.10 Regelbarkeit, Stabilisierbarkeit, Erreichbarkeit	23
1.11 Entwurf von Mehrgrößenregelungen durch Polvorgabe	26
1.12 Ausgangsrückführung, Dyadischer Zustandsregler	26
1.13 Zustandsregelung mit Integratoren	26
1.14 Anwendungen der Zustandsraumverfahren	27
1.15 Problematik des numerischen Rechnens	28
2 Modale Regelungen konzentrierter Systeme	29
2.1 Modale Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	29
2.2 Modale Einzelmodus-Regler für Eingrößenstrecken	30
2.3 Mehrmoden-Regelung für Eingrößenstrecken	31
2.4 Modaler Mehrmoden-Regler für Mehrfachstrecken	33
2.5 Alternative Entwurfsmöglichkeiten	34
2.6 Polempfindlichkeit bei Ausgangsrückführung	34
2.7 Zustandsvektoren und Vektorräume	37
3 Regelungen mit Zustandsbeobachtern	39
3.1 Beobachter-Ansatz	39
3.2 Analyse der Regelung mit Zustandsbeobachter	42
3.3 Separabilität von Beobachter- und Reglerentwurf	42
3.4 Beobachterentwurf	43
3.5 Kontrollbeobachter für Eingrößensysteme	44
3.6 Kontrollbeobachter für Mehrgrößenstrecken	46
3.6.1 Definition einer Partialvariablen	47
3.6.2 Kontrollbeobachteransatz im Frequenzbereich	49
3.6.3 Ersatz der Partialvariablen über Beobachtermatrizen	49
3.6.4 Eliminierung des Pfades mit $\Delta^{-1}(s)Z_u(s)$	50
3.6.5 Dimensionierungsfragen zum Kontrollbeobachter	50
3.7 Robustheit und Regelqualität	51

3.8	Reduzierter (verallgemeinerter) Beobachter	52
3.9	Rückgewinnung von Übertragungsverhalten	52
3.9.1	Open-Loop Transfer Recovery	52
3.9.2	Empfindlichkeits-Recovery	53
3.9.3	Eingangs-Ausgangs-Recovery	53
3.9.4	Bedingungen für exakte Recovery	54
4	Abtastregelungen	55
4.1	Getastete Signale. z -Transformation	55
4.2	Spezielle abgetastete Signale	57
4.3	Übertragung eines getasteten Signals durch ein kontinuierliches System	62
4.4	Modifizierte z -Transformation	63
4.5	z -Rücktransformation	66
4.6	Rechenregeln und Zusammenhänge der z -Transformation	67
4.7	Einfache Abtastregelungen	68
4.8	Stabilität	70
4.8.1	Stabilitätskriterium nach Schur-Cohn	72
4.8.2	Stabilitätskriterium nach Nyquist	73
4.8.3	Stabilitätskriterium im Bode-Diagramm und nach Routh	73
4.9	Zustandsraum-Darstellung allgemein	75
4.10	Transitionsmatrix und Zustandsgleichungen des Abtastsystems	77
4.11	Darstellung im Matrizenverbund	81
4.12	Abtast-Zustandsregler	81
4.13	Entwurf von Abtastregelungen	82
4.13.1	Bode-Diagramm in der w -Ebene	82
4.13.2	Wurzelorte	83
4.13.3	Polvorgabe	83
4.13.4	Vorfilterbemessung	84
4.13.5	Aperiodizität	84
4.13.6	Kürzeste (endliche) Ausregelzeit und Nachschwingfreiheit	84
5	Mehrgrößenregelungen	87
5.1	Mehrgrößenstrecken	87
5.1.1	Kanonische Formen	88
5.1.2	Verallgemeinertes Blockschaltbild	90
5.2	Analyse von Mehrgrößenregelungen	90
5.3	Stabilität allgemein	91
5.4	Autonomisierung	92
5.5	Zweigrößenregelung	93
5.6	Entwurf von Zweigrößenregelungen	97
5.7	Pole und Polpolynome von Übertragungsmatrizen	99
5.8	Nullstellen und Nullstellenpolynome von Übertragungsmatrizen	103
5.9	Verallgemeinertes Nyquist-Kriterium für Mehrgrößensysteme	104
5.9.1	Eingrößenfall als Vorstufe	104
5.9.2	Mehrgrößensysteme	105
5.10	Charakteristische Übertragungsfunktion	106
5.11	Diagonal dezentralisierte Stabilität	107
5.12	Verallgemeinertes Nyquist-Kriterium für schwache Verkopplung	108
5.13	Verallgemeinertes Nyquist-Kriterium in inverser Form	112

5.14	Analytische Stabilitätsprüfung mit Polynommatrizen	113
5.15	Einseitige Kopplungen	114
5.16	Youla-Parametrierung	115
5.17	Pauschalanforderungen an einen Mehrgrößenregelkreis	116
5.18	Entkopplung in Zustandsraumdarstellung	117
5.19	Rosenbrock-Matrix	118
5.20	Invarianz der Nullstellen von Schleife und Regelkreis	118
5.21	Dynamischer Mehrgrößen-Zustandsregler	119
5.22	Integrität	122
5.23	Ausblick	122
6	Regelungen örtlich verteilter Systeme	123
6.1	Verteilte Regelstrecken in modaler Darstellung	123
6.2	Verteilter Regler in modaler Darstellung	127
6.3	Modale Algebraisierung verteilter Systeme	128
6.4	Räumlich diskrete Stellgrößen und Regelgrößen	128
6.5	Punktweise Regelung an verteilten Regelstrecken	129
7	Ordnungsreduzierung	133
7.1	Dominanzmaße	134
7.2	Wesentliche Zustandsgrößen	135
7.3	Wesentlichkeitsmaßzahlen	135
7.4	Umgruppierung. Reduktion im Modalbereich	135
7.5	Ordnungsreduziertes Modell	136
7.6	Varianten der Ordnungsreduzierung	137
7.6.1	Aggregation	137
7.6.2	Erhaltung gleicher Ausgangsgrößen	137
7.6.3	Stationäre Genauigkeit	137
7.6.4	Verswindender Gleichungsfehler	138
7.6.5	Ordnungsreduktion mit vektoriellem Gütekriterium	138
7.6.6	Bewertung des Reduktionsfehlers mit Normen	138
8	Optimierung technischer Prozesse	139
8.1	Statische Optimierungskriterien	139
8.2	Dynamische Optimierungskriterien im Zeitbereich	139
8.3	Dynamische Gütekriterien im Frequenzbereich	142
8.4	Allgemeine Optimierung einer Mehrgrößenregelung	143
8.5	Berechnung der Gütekriterien mit dem Parseval-Theorem	143
8.6	Geschlossene Extremisierung des Gütekriteriums	144
8.7	Extremisierung unter Nebenbedingungen	145
8.7.1	Gleichungsnebenbedingungen	145
8.7.2	Ungleichungsnebenbedingungen	145
8.8	Iterative Methoden	147
8.8.1	Jacobi-Matrix-Verfahren	147
8.8.2	Gradienten-Verfahren	147
8.8.3	Rechentechnische Besonderheiten	148
8.9	Begrenzungen mit Funktionsnormen	148

9	Optimale Regler fester Struktur	149
9.1	Optimaler Zustandsregler in Zeitbereichsdarstellung	149
9.2	Optimaler Regler in Frequenzbereichsdarstellung	151
9.3	Optimaler diskreter Zustandsregler	155
10	Optimale Steuerungen und Regelungen bei freier Struktur	157
10.1	Gradientenverfahren. Prinzipielles	157
10.2	Adjungierte Variable	158
10.3	Einflußfunktion	158
10.4	Gradientenverfahren	159
10.5	Begrenzungen	160
10.6	Maximum-Prinzip nach Hamilton und Pontrjagin	161
10.7	Minimierung von I und Maximierung von H	163
10.8	Randbedingungen	164
10.9	Anwendungsfälle	164
10.9.1	Sonderfall fester Zielbedingung	164
10.9.2	Sonderfall vollkommener Ausregelung	165
10.9.3	Zeitoptimale Steuerung an einer I_2 -Regelstrecke	165
10.9.4	Optimalität in der Ausregelzeit und $ u $ -Fläche	166
10.9.5	Zeit- und/oder energieoptimale Regelung	166
10.10	Dynamisches Programmieren nach Bellman	172
10.11	Optimale Regler nach dem Dynamischen Programmieren	175
10.12	Optimalregelung für diskrete lineare Regelstrecken	176
11	Regelungen unter stationär zufälligen Bewegungen	177
11.1	Korrelationsfunktion	178
11.2	Spektrale Leistungsdichte	179
11.3	Lineare Regelungen unter stationären Rauschsignalen	181
11.4	Identifikation eines einfachen linearen Systems	183
12	Regelungen mit stochastisch optimaler Vorhersage. Kalman-Filter	185
12.1	Zeitdiskrete Prozesse	186
12.1.1	Optimale Filterung	186
12.1.2	Grundlagen der Stochastik	186
12.1.3	Optimaler Schätzalgorithmus	187
12.1.4	Optimale Vorhersage	188
12.2	Kontinuierliche Prozesse	189
12.2.1	Optimale Filterung	189
12.2.2	Optimale Vorhersage	189
12.3	Diskrete stochastische Optimal-Regelung	190
12.4	Kontinuierliche stochastische Optimal-Regelung	190
12.5	Folgerungen. Spezialisierung auf den Beobachter	192
12.6	Ausblick	192
13	Nichtlineare Regelungen allgemeiner Art. Fuzzy Regelung	193
13.1	Kennlinien-Kompensation	194
13.2	Rückführungen zum nichtlinearen Element	194
13.3	Anpassung der Zustandsraum-Verfahren	194
13.4	Analyseverfahren der numerischen Analysis	195

13.5 Störungsmethode mit Reihenentwicklung der Nichtlinearität	195
13.6 Linearisierung mit kompensierenden Zustandstransformationen	196
13.6.1 Linearisierung mit Transformationen der Stellgröße	196
13.6.2 Linearisierung mit Zustandsgrößen- und Stellgrößentransformation	196
13.6.3 Differentialgeometrische Darstellung	197
13.7 Nichtlineare Regelung auf der Basis unscharfer Mengen (Fuzzy Control)	197
13.7.1 Fuzzifizierung	198
13.7.2 Maßnahmen im unscharfen Beschreibungsbereich (Inferenz)	199
13.7.3 Defuzzifizierung	199
13.7.4 Zusammenfassung, Ausblick	204
14 Nichtlineare Regelungen in der Zustandsebene	205
14.1 Unstetige Ansteuerung der Regelstrecke	205
14.2 Zustandskurven für lineare Strecken zweiter Ordnung	208
14.3 Stückweise lineare Regelungen	210
14.4 Nahtlinie	211
14.5 Resultierende Trajektorie der Regelung	211
14.6 Bezifferung der Zustandskurven nach der Zeit	214
14.7 Zustandskurven bei allgemeiner Nichtlinearität	214
14.8 Grenzzyklen	215
15 Grenzzyklennäherung durch Beschreibungsfunktion	221
15.1 Beschreibungsfunktion	221
15.2 Regelkreisanalyse mittels Beschreibungsfunktion	225
15.3 Stabilität, stabiler oder instabiler Grenzzyklus	225
16 Frequenzkennlinien für unstetige Regelungen	227
16.1 Eigenschwingungen	227
16.2 Erzwungene Schwingungen	232
16.3 Qualitative Stabilitätsuntersuchung	233
16.4 Synthesebeziehungen	235
17 Stabilität nichtlinearer Regelungen	237
17.1 Verschiedene Stabilitätsformulierungen	237
17.2 Notwendige und hinreichende Stabilitätsbedingungen	238
17.3 Stabilitätskriterium nach Lyapunov	240
17.4 Krasovski-Theorem	240
17.5 Hyperstabilität, Ansatz und Definition	241
17.6 Absolute Stabilität	241
17.7 Kreiskriterium	242
17.8 Praktische Stabilität	242
18 Adaptive und neuronale Regelungen	243
18.1 Adaption durch Parameter-Vorsteuerung	243
18.2 Adaption mittels simultaner Streckenidentifikation	244
18.3 Adaption mit Identifikation des Regelkreises, Modelladaptive Systeme	247
18.4 Modellbildung zur Parameterschätzung	248
18.5 Parameterschätzung für Self-Tuning-Regler	248
18.6 Minimum-Varianz-Regler	249

18.7	Besonderheiten adaptiver Regelungen	251
18.8	Künstliche neuronale Netze und neuronale Regler	252
18.8.1	Mehrschichten-Perceptron. Backpropagation-Algorithmus	252
18.8.2	Lernen von Funktionen nach dem <i>functional link network</i>	254
18.8.3	Lernverfahren im Kohonen-Modell	255
18.8.4	Künstlicher neuronaler Regler	255
18.8.5	Anwendungen der neuronalen Netze und Regler	256
18.8.6	Neuronaler Regler gegenüber fuzzy Regler	256
19	Robuste Regelungen	257
19.1	Methoden im Frequenzbereich	258
19.2	Vektor- und Matrixnormen	258
19.3	Nichtlineare zeitvariante Systemunsicherheit	259
19.4	Robustheit mittels Bellman-Gronwall-Lemma	260
19.4.1	Unsicherheit an zeitdiskreten Systemen	260
19.4.2	Bellman-Gronwall-Lemma. Diskrete Form	261
19.4.3	Obere Grenze für diagonalisierbare Transitionsmatrix	261
19.5	Robustheit bei multiplikativer Unsicherheit	262
19.5.1	Robuste Stabilität (Stabilitätsrobustheit)	262
19.5.2	Nominelle Güte	263
19.5.3	Robuste Güte (Güterobustheit)	263
19.6	Stabilitätsrobustheit mittels Singulärwertanalyse	264
19.7	H_∞ -Problem	266
19.8	Stabilitätsrobustheit und Regelkreisgüte	267
19.9	Shaping	268
19.10	Polytope von Polynomen. Intervall-Polynome	268
19.11	Kharitonov-Theorem	269
19.12	Kantensatz	270
19.13	Methode des Parameter-Durchschnitts	272
19.14	Parameteroptimierung mit vektorielltem Gütekriterium	274
19.15	Erweiterung des Gradientenverfahrens auf lokale Unempfindlichkeit	275
19.16	Unempfindlicher optimaler Zustandsregler	276
20	Optimale Regelungen für zeitvariante Prozesse	277
20.1	Zeitvariante kontinuierliche Systeme	277
20.2	Optimaler zeitvarianter kontinuierlicher Regler	277
20.3	Reglerdiskussion	279
20.4	Ausregelung mit Gütekriterium nach der Ausgangsgröße	279
20.5	Optimale Sollwertführung	280
20.6	Optimale Ausregelung unter Mindeststabilität	281
20.7	Zeitinvariante Systeme und Lyapunov-Gleichung	281
20.7.1	Streckendifferentialgleichung und Lyapunov-Gleichung	281
20.7.2	Integral über das dyadische Produkt $\mathbf{x}\mathbf{x}^T$	282
20.7.3	Regelkreis mit Zustandsregler und Lyapunov-Gleichung	282
20.7.4	Optimierung von I über $\mathbf{K}$	282
20.7.5	Optimales bilineares Netz	283
20.8	Zeitvariante diskrete Prozesse	283
20.8.1	Verrauschter diskreter Prozeß	284
20.8.2	Sonderfall des zeitinvarianten Prozesses	284

21 Dezentrale Regelungen	285
21.1 Grundbegriffe und Problemstellung	285
21.2 System mit zwei einfachen Teilsystemen	286
21.3 Zwei Teilsysteme niedriger Ordnung	288
A Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen	291
A.1 Allgemeine Hinweise	291
A.2 Verknüpfungssymbole	291
A.3 Hochgestellte Symbole u. dgl.	292
A.4 Indizes	292
A.5 Operationszeichen	292
A.6 Symbole spezieller Art	293
B Literaturverzeichnis	297
C Sachverzeichnis	309