

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Struktur und Einsatz von Optimierungsmethoden	2
1.2	Einsatz der Optimierung in der Steuerungs- und Regelungstechnik	6
Teil I Statische Optimierung		
2	Allgemeine Problemstellung der statischen Optimierung	11
	Übungsaufgaben	17
3	Minimierung einer Funktion einer Variablen	19
3.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	19
3.2	Numerische Verfahren	22
3.2.1	Eingrenzungsphase	23
3.2.2	Interpolations-Verfahren	24
3.2.3	Goldener-Schnitt-Verfahren	28
	Übungsaufgaben	31
4	Minimierung einer Funktion mehrerer Variablen ohne Nebenbedingungen	33
4.1	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	33
4.2	Numerische Verfahren	36
4.2.1	Algorithmische Struktur	37
4.2.2	Liniensuche	39
4.2.3	Gradientenverfahren	42
4.2.4	Newton-Verfahren	42
4.2.5	Konjugierte-Gradienten-Verfahren	47
4.2.6	Trust-Region-Verfahren	48
4.2.7	Skalierung	50
4.2.8	Ableitungsfreie Verfahren	52
4.2.9	Stochastische Verfahren	56

4.3 Beispiel: Optimale Festlegung von Reglerparametern	59
Übungsaufgaben	63
5 Minimierung einer Funktion mehrerer Variablen unter Nebenbedingungen	67
5.1 Minimierung unter Gleichungsnebenbedingungen	67
5.1.1 Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	68
5.1.2 Reduzierter Gradient	74
5.1.3 Beispiel: Optimale statische Prozesssteuerung	76
5.2 Minimierung unter Ungleichungsnebenbedingungen	77
5.2.1 Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	79
5.2.2 Sattelpunkt-Bedingung und Dualität	87
5.2.3 Beispiel: Optimale Festlegung von Reglerparametern unter Beschränkungen	88
5.3 Konvexe Probleme	93
5.4 Numerische Verfahren	95
5.4.1 Penalty-Verfahren	95
5.4.2 Verfahren der Multiplikatoren-Penalty-Funktion	99
5.4.3 QP-Verfahren	103
5.4.4 SQP-Verfahren	106
5.4.5 Innere-Punkte-Verfahren	109
Übungsaufgaben	113
6 Methode der kleinsten Quadrate	121
6.1 Lineare kleinste Quadrate	121
6.1.1 Kleinstes Quadrat unter Gleichungsnebenbedingungen ..	124
6.1.2 Gewichtete kleinste Quadrate	125
6.1.3 Rekursive kleinste Quadrate	126
6.1.4 Adaptive kleinste Quadrate	129
6.2 Probleme der Parameterschätzung	132
6.2.1 Parameterschätzung statischer Systeme	132
6.2.2 Parameterschätzung linearer dynamischer Systeme	134
6.3 Nichtlineare kleinste Quadrate	135
Übungsaufgaben	136
7 Lineare Programmierung	139
7.1 Simplex-Methode	141
7.2 Initialisierungsphase	146
7.3 Beispiele	147
7.3.1 Netzplantechnik	147
7.3.2 Transportproblem	149
7.3.3 Maximalstromproblem	151
Übungsaufgaben	153

8 Weitere Problemstellungen	157
8.1 Minimierung von Vektorfunktionen	157
8.2 Kombinatorische Optimierung	161
8.3 Spieltheorie	164
Übungsaufgaben	165
Teil II Dynamische Optimierung	
9 Variationsrechnung zur Minimierung von Funktionalen	169
9.1 Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	170
9.1.1 Feste Endzeit	171
9.1.2 Freie Endzeit	175
9.1.3 Allgemeine Endbedingung	176
9.2 Legendresche Bedingung	179
9.3 Starke lokale Minima	180
9.4 Weitere Nebenbedingungen	183
9.4.1 Gleichungsnebenbedingungen	183
9.4.2 Ungleichungsnebenbedingungen	188
Übungsaufgaben	188
10 Optimale Steuerung dynamischer Systeme	191
10.1 Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	192
10.2 Behandlung der Randbedingungen	195
10.2.1 Feste Endzeit	195
10.2.2 Freie Endzeit	197
10.3 Optimale Steuerung und optimale Regelung	198
10.4 Beispiele	200
10.5 Weitere Nebenbedingungen	207
10.5.1 Integrationsnebenbedingungen	207
10.5.2 Gleichungsnebenbedingungen an internen Randpunkten	209
10.5.3 Diskontinuierliche Zustandsgleichungen	212
10.6 Hybride dynamische Systeme	215
Übungsaufgaben	218
11 Minimum-Prinzip	223
11.1 Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	224
11.2 Bedingungen an die Hamilton-Funktion	233
11.3 Weitere Nebenbedingungen	235
11.3.1 Gleichungsnebenbedingungen	235
11.3.2 Ungleichungsnebenbedingungen der Zustandsgrößen	239
11.4 Singuläre optimale Steuerung	242
11.5 Beispiele	246
11.5.1 Zeitoptimale Steuerung	246
11.5.2 Verbrauchsoptimale Steuerung	256
11.5.3 Periodische optimale Steuerung	261
Übungsaufgaben	263

12 Lineare-Quadratische (LQ-)Optimierung dynamischer Systeme	273
12.1 Zeitvarianter Fall	274
12.2 Zeitinvarianter Fall	280
12.3 Rechnergestützter Entwurf	285
12.4 Robustheit zeitinvarianter LQ-Regler	287
12.5 LQ-Regler mit vorgeschriebener minimaler Stabilitätsreserve	288
12.6 Regelung der Ausgangsgrößen	291
12.7 LQ-Regelung mit Störgrößenreduktion	295
12.7.1 Bekannte Störgrößen	295
12.7.2 Messbare Störgrößen	297
12.7.3 Bekanntes Störgrößenmodell	300
12.8 Optimale Folgeregelung	301
12.8.1 Zeitvarianter Fall	301
12.8.2 Zeitinvarianter Fall	304
12.9 LQ-Regelung mit Integralrückführung	306
12.9.1 Stationäre Genauigkeit von LQ-Reglern	306
12.9.2 LQI-Regler	307
12.9.3 LQI-Regelung von Mehrgrößensystemen	310
12.10 Optimale Regelung linearisierter Mehrgrößensysteme	314
Übungsaufgaben	316
13 Optimale Steuerung zeitdiskreter dynamischer Systeme	321
13.1 Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	322
13.2 Zeitdiskrete LQ-Optimierung	326
13.2.1 Zeitvarianter Fall	326
13.2.2 Zeitinvarianter Fall	329
Übungsaufgaben	331
14 Dynamische Programmierung	335
14.1 Bellmansches Optimalitätsprinzip	335
14.2 Kombinatorische Probleme	337
14.3 Zeitdiskrete Probleme	340
14.4 Diskrete dynamische Programmierung	346
14.5 Zeitkontinuierliche Probleme	353
Übungsaufgaben	359
15 Numerische Verfahren für dynamische Optimierungsprobleme	365
15.1 Zeitdiskrete Probleme	366
15.2 Anfangswertprobleme	369
15.3 Indirekte Verfahren	371
15.3.1 Indirekte Schießverfahren	373
15.3.2 Indirekte Gradienten-Verfahren	376
15.3.3 Quasilinearisierung	384
15.4 Direkte Verfahren	388
15.4.1 Parameteroptimierung	389

15.4.2 Direkte Einfachschießverfahren	394
15.4.3 Direkte Kollokationsverfahren	396
15.4.4 Direkte Mehrfachschießverfahren	400
Übungsaufgaben	402
Teil III Stochastische optimale Regler und Filter	
16 Stochastische dynamische Programmierung	407
16.1 Zeitdiskrete stochastische dynamische Programmierung	414
16.2 Diskrete stochastische dynamische Programmierung	416
16.3 Zeitinvarianter Fall	420
16.4 Approximate dynamic Programming	423
16.5 Stochastische LQ-Optimierung	430
16.6 Stochastische Probleme mit unvollständiger Information	432
Übungsaufgaben	436
17 Optimale Zustandsschätzung dynamischer Systeme	439
17.1 Zustandsschätzung zeitkontinuierlicher linearer Systeme	439
17.1.1 Kalman-Bucy-Filter	441
17.1.2 Zeitinvarianter Fall	445
17.1.3 Korrelierte Störungen	448
17.2 Zustandsschätzung zeitdiskreter linearer Systeme	449
17.2.1 Kalman-Filter	450
17.2.2 Zeitinvarianter Fall	454
17.2.3 Korrelierte Störungen	455
17.3 Zustandsschätzung statischer Systeme	456
17.3.1 Konstanter Zustand	456
17.3.2 Adaptive Schätzung	458
17.4 Zustandsschätzung nichtlinearer Systeme	459
17.4.1 Erweitertes Kalman-Filter	460
17.4.2 Zustands- und Parameterschätzung	461
17.4.3 Unscented Kalman-Filter	463
Übungsaufgaben	466
18 Lineare quadratische Gaußsche (LQG-)Optimierung	469
18.1 Zeitkontinuierliche Probleme	469
18.2 Zeitdiskrete Probleme	475
Übungsaufgaben	480
Vektoren und Matrizen	483
A.1 Notation	483
A.2 Definitionen	484
A.3 Differentiationsregeln	485
A.4 Quadratische Formen	485
A.5 Transponieren und Invertieren von Matrizen	488
Übungsaufgaben	488

Mathematische Systemdarstellung	489
B.1 Dynamische Systeme	489
B.1.1 Zeitkontinuierliche Systemdarstellung	490
B.1.2 Zeitdiskrete Systemdarstellung	492
B.1.3 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	494
B.2 Statische Systeme	494
Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie	495
C.1 Wahrscheinlichkeit	495
C.2 Zufallsvariablen	496
C.3 Bedingte Wahrscheinlichkeit	500
C.4 Stochastische Prozesse	500
Literaturverzeichnis	503
Sachverzeichnis	513