

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Vorwort zur zweiten Auflage	VIII
Inhaltsverzeichnis	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 Optimale Entscheidungen	1
1.2 Struktur und Einsatz von Optimierungsmethoden	3
1.3 Einsatz der Optimierung in der Steuerungs- und Rege- lungstechnik	7
I STATISCHE OPTIMIERUNG	9
2 ALLGEMEINE PROBLEMSTELLUNG DER STATI- SCHEN OPTIMIERUNG	11
3 MINIMIERUNG EINER FUNKTION EINER VARIA- BLEN	15
3.1 Problemstellung	15
3.2 Optimalitätsbedingungen	15
3.2.1 Minimierung ohne Ungleichungsnebenbedingun- gen (UNB)	15
3.2.2 Minimierung mit UNB	17
3.2.3 Globales Minimum	18
3.2.4 Analytische Lösung	19
3.3 Rechnergestützte Optimierungsverfahren	19
3.3.1 Motivation und Problemstellung	19

3.3.2	Die Eingrenzungsphase	20
3.3.3	Interpolationsformeln	22
3.3.4	Iterativer Algorithmus mit Interpolationsformeln	24
3.3.5	Der Goldene-Schnitt-Algorithmus	26
	Übungsaufgaben	29
4	MINIMIERUNG EINER FUNKTION MEHRERER VARIABLEN OHNE NEBENBEDINGUNGEN	31
4.1	Optimalitätsbedingungen	31
4.2	Rechnergestützte Minimierungsverfahren	35
4.2.1	Grundsätzliche algorithmische Struktur	35
4.2.2	Bestimmung einer Suchrichtung	37
4.2.2.1	Achsenparallele Suche	38
4.2.2.2	Gradientenverfahren (Steilster Abstieg)	39
4.2.2.3	Newton-Verfahren	40
4.2.2.4	Quasi-Newton- (oder Variable-Metrik-) Verfahren	42
4.2.2.5	Konjugierte-Gradienten-Verfahren	44
4.2.2.6	Zusammenfassung	45
4.2.3	Linienoptimierung	45
4.2.4	Abbruchkriterium	48
4.2.5	Restart	48
4.2.6	Skalierung	49
4.3	Optimale Festlegung von Reglerparametern	51
	Übungsaufgaben	55
5	DIE METHODE DER KLEINSTEN QUADRATE	59
5.1	Mathematisches Grundproblem	59
5.1.1	Problemformulierung	59
5.1.2	Lösung	61
5.1.3	Gewichtete Kleinste Quadrate	61
5.2	Rekursive und adaptive Kleinste Quadrate	62
5.2.1	Rekursive Kleinste Quadrate	62
5.2.2	Adaptive Kleinste Quadrate	66
5.3	Probleme der Parameterschätzung	69
5.3.1	Parameterschätzung statischer Systeme	69
5.3.2	Parameterschätzung linearer dynamischer Systeme	72
	Übungsaufgaben	72

6	MINIMIERUNG EINER FUNKTION UNTER GLEICHUNGSNEBENBEDINGUNGEN	76
6.1	Problemstellung	76
6.2	Optimalitätsbedingungen	77
6.3	Der reduzierte Gradient	84
6.4	Optimale statische Prozeßsteuerung	86
6.5	Kleinste Quadrate unter linearen GNB	87
	Übungsaufgaben	89
7	MINIMIERUNG EINER FUNKTION UNTER GLEICHUNGS- UND UNGLEICHUNGSNEBENBEDINGUNGEN	93
7.1	Problemstellung	93
7.2	Optimalitätsbedingungen	95
7.3	Die Sattelpunkt-Bedingung	103
7.4	Optimale Festlegung von Reglerparametern unter Beschränkungen	105
	Übungsaufgaben	111
8	KONVEXE OPTIMIERUNGSPROBLEME	117
8.1	Konvexe Mengen und konvexe Funktionen	117
	8.1.1 Konvexe Mengen	117
	8.1.2 Konvexe Funktionen	118
8.2	Konvexe Optimierungsprobleme	120
	Übungsaufgaben	122
9	LINEARE PROGRAMMIERUNG	124
9.1	Problemstellung	124
9.2	Die Simplex-Methode	127
9.3	Initialisierungsphase	132
9.4	Anwendungen der Linearen Programmierung	134
	9.4.1 Netzplantechnik	134
	9.4.2 Das Transportproblem	136
	9.4.3 Das Maximalstromproblem	138
	Übungsaufgaben	139
10	NUMERISCHE VERFAHREN DER NICHTLINEAREN PROGRAMMIERUNG	143
10.1	Straffunktionsverfahren	144
10.2	Verfahren der zulässigen Richtung	146

10.2.1	Die Grundidee	146
10.2.2	Algorithmische Grundstruktur	148
10.2.3	Quadratische Programmierung	151
10.3	Verfahren der Multiplikatoren–Straffunktion	151
10.3.1	Probleme mit GNB	151
10.3.2	Probleme mit UNB	154
10.4	Verfahren der exakten Straffunktion	155
10.5	Sequentielle Quadratische Programmierung	156
10.6	Globale Minimierungsverfahren	159
10.6.1	Die Complex–Methode	160
10.6.2	Simuliertes Ausglühen	161
10.6.3	Evolutionäre Algorithmen	162
10.6.4	Schlußbetrachtungen	164
	Übungsaufgaben	164
11	HIERARCHISCHE OPTIMIERUNG	166
11.1	Definition der Teilprobleme	166
11.2	Zielkoordinierung	170
11.3	Modellkoordinierung	172
12	WEITERE PROBLEMSTELLUNGEN	176
12.1	Minimierung von Vektorfunktionen	176
12.1.1	Problemstellung	176
12.1.2	Lösung durch beschränkte Optimierung	177
12.1.3	Lösung durch gewichtete Summenfunktion	180
12.2	Kombinatorische Optimierung	181
12.3	Spieltheorie	184
	Übungsaufgaben	186
II	DYNAMISCHE OPTIMIERUNG	187
13	MINIMIERUNG VON FUNKTIONALEN MITTELS DER VARIATIONSRECHNUNG	189
13.1	Problemstellung der dynamischen Optimierung	189
13.2	Minimierung von Funktionalen mit fester Endzeit	190
13.3	Minimierung von Funktionalen mit freier Endzeit	195
13.4	Minimierung von Funktionalen mit allgemeiner Endbe- dingung	197
13.5	Die Legendresche Bedingung	200

13.6	Notwendige Bedingungen für ein starkes lokales Minimum	201
13.7	Minimierung von Funktionalen unter GNB	204
13.8	Minimierung von Funktionalen unter UNB	209
	Übungsaufgaben	210
14	OPTIMALE STEUERUNG DYNAMISCHER SYSTEME	213
14.1	Problemstellung	213
14.2	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum . . .	214
14.3	Behandlung der Randbedingungen	218
	14.3.1 Feste Endzeit t_e	218
	14.3.2 Freie Endzeit t_e	220
14.4	Optimale Steuerung und optimale Regelung	221
14.5	Ein Beispiel	224
	14.5.1 Problemformulierung	224
	14.5.2 Lösung	224
	14.5.3 Realisierung der Ergebnisse	226
	14.5.4 Empfindlichkeit bei Störungen	228
14.6	Praktischer Einsatz der optimalen Steuerung	231
14.7	Weitere Nebenbedingungen	232
	14.7.1 Integrationsnebenbedingungen	232
	14.7.2 GNB an internen Randpunkten	235
	14.7.3 Diskontinuierliche Zustandsgleichungen	238
	Übungsaufgaben	240
15	LINEARE-QUADRATISCHE OPTIMIERUNG DYNAMISCHER SYSTEME	247
15.1	Problemstellung	248
15.2	Lösung	249
15.3	Zeitinvariantes optimales Regelgesetz	254
15.4	Rechnergestützter Entwurf von LQ-Reglern	261
15.5	Robustheit zeitinvarianter LQ-Regler	263
15.6	LQ-Regler mit vorgeschriebener Stabilitätsreserve . . .	264
15.7	Regelung der Ausgangsgrößen	266
	15.7.1 Zustandsrückführung	266
	15.7.2 Ausgangsrückführung	268
15.8	LQ-Regelung mit Störgrößenreduktion	271
	15.8.1 Bekannte Störgrößen	271
	15.8.2 Meßbare Störgrößen	273

15.8.3	Bekanntes Störgrößenmodell	276
15.9	Optimale Folgeregelung	277
15.9.1	Der zeitvariante Fall	277
15.9.2	Der zeitinvariante Fall	281
15.10	LQ-Regelung mit Integralrückführung	282
15.10.1	Stationäre Genauigkeit von LQ-Reglern	283
15.10.2	LQI-Regler	283
15.10.3	Stationäre Genauigkeit von LQI-Reglern	285
15.10.4	LQI-Regelung von Mehrgrößensystemen	287
15.11	Optimale Regelung linearisierter Mehrgrößensysteme	291
	Übungsaufgaben	293
16	DAS MINIMUM-PRINZIP	298
16.1	Problemstellung	298
16.2	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	299
16.3	Bedingungen für die Hamilton-Funktion	309
16.4	Erweiterungen	312
16.4.1	Gleichungsnebenbedingungen	312
16.4.2	UNB der Zustandsgrößen	316
16.5	Singuläre optimale Steuerung	319
	Übungsaufgaben	323
17	ANWENDUNGEN DES MINIMUM-PRINZIPS	329
17.1	Zeitoptimale Steuerung	329
17.1.1	Zeitoptimale Steuerung linearer Systeme	329
17.1.2	Der Satz von Feldbaum	332
17.1.3	Beispiele zeitoptimaler Regelung	333
17.2	Verbrauchsoptimale Steuerung	339
17.2.1	Verbrauchsoptimale Steuerung linearer Systeme	340
17.2.2	Beispiel einer zeit-/verbrauchsoptimalen Regelung	341
17.3	Periodische optimale Steuerung	344
	Übungsaufgaben	347
18	OPTIMALE STEUERUNG ZEITDISKRETER DYNAMISCHER SYSTEME	353
18.1	Problemstellung	354
18.2	Notwendige Bedingungen für ein lokales Minimum	355
18.3	Zeitdiskrete LQ-Optimierung	360

18.3.1	Der zeitvariante Fall	360
18.3.2	Der zeitinvariante Fall	362
18.3.3	Erweiterungen	365
Übungsaufgaben	365
19	DYNAMISCHE PROGRAMMIERUNG	369
19.1	Das Optimalitätsprinzip	369
19.2	Anwendung auf kombinatorische Probleme	371
19.3	Anwendung auf zeitdiskrete Steuerungsprobleme	375
19.3.1	Die Bellmansche Rekursionsformel	376
19.3.2	Diskrete Dynamische Programmierung	380
19.4	Die Hamilton–Jacobi–Bellman–Gleichung	389
Übungsaufgaben	396
20	NUMERISCHE VERFAHREN FÜR DYNAMISCHE OPTIMIERUNGSPROBLEME	403
20.1	Reduzierter Gradient eines Funktionals	404
20.1.1	Zeitdiskrete Probleme	404
20.1.2	Zeitkontinuierliche Probleme	405
20.2	Parameteroptimierung	407
20.2.1	Lösungsansatz mit Koordinatenfunktionen	407
20.2.2	Finite Differenzen	414
20.3	Verfahren der zulässigen Richtung	416
20.3.1	Grundsätzliche algorithmische Struktur	416
20.3.2	Bestimmung einer Suchrichtung	419
20.3.3	Linienoptimierung	422
20.3.4	Abbruchkriterium	423
20.3.5	Restart	423
20.3.6	Skalierung	423
20.3.7	Erweiterungen	429
20.4	Quasilinearisierung	447
20.4.1	Allgemeines Vorgehen	447
20.4.2	Numerische Lösung eines linearen ZPRWP	449
20.4.3	Der Algorithmus	450
20.4.4	Erweiterungen	451
20.4.5	Der zeitdiskrete Fall	453
20.5	Hierarchische Verfahren	453
20.6	Weitere Verfahren	459
Übungsaufgaben	461

21 EIN ANWENDUNGSBEISPIEL	464
21.1 Problemhintergrund	464
21.2 Formulierung und Lösung eines dynamischen Optimierungsproblems	466
21.2.1 Mathematisches Modell	466
21.2.2 Gütefunktional	468
21.2.3 Problemformulierung	469
21.2.4 Lösungsalgorithmus	470
21.3 Untersuchungen mit genauer Zuflußinformation	473
21.4 Einfluß ungenauer Zuflußprognosen	476
21.4.1 Wiederholte Optimierung	477
21.4.2 Länge des zeitlichen Optimierungshorizontes	477
21.4.3 Einfluß der Vorhersagezeit	479
Übungsaufgaben	480
III STOCHASTISCHE OPTIMIERUNG	481
22 STOCHASTISCHE DYNAMISCHE OPTIMIERUNGSPROBLEME	483
22.1 Einführung	483
22.2 Ein Grundproblem der stochastischen optimalen Regelung	487
22.3 Stochastische Dynamische Programmierung	490
22.4 Diskrete Stochastische Dynamische Programmierung	493
22.5 Erweiterungen	495
22.5.1 Totzeitbehaftete Probleme	496
22.5.2 Korrelierte, meßbare Störungen	496
22.5.3 Nutzung von Vorhersagen	496
22.5.4 Zeitinvariantes Regelgesetz	497
22.6 Stochastische LQ-Optimierung	500
22.7 Stochastische Probleme mit unvollständiger Information	505
Übungsaufgaben	510
23 DAS KALMAN-BUCY-FILTER	513
23.1 Zustandsschätzung linearer zeitkontinuierlicher Systeme	513
23.1.1 Problemstellung der linearen Zustandsschätzung	514
23.1.2 Lösung des Filterungsproblems	516
23.1.3 Der zeitinvariante Fall	521
23.1.4 Korrelierte Störungen	524

23.2	Zustandsschätzung linearer zeitdiskreter Systeme	524
23.2.1	Problemstellung	524
23.2.2	Das zeitdiskrete Kalman–Bucy–Filter	526
23.2.3	Der zeitinvariante Fall	530
23.2.4	Korrelierte Störungen	531
23.3	Optimale Zustandsschätzung statischer Systeme	531
23.3.1	Konstanter Zustand	532
23.3.2	Adaptive Schätzung	534
23.4	Zustandsschätzung nichtlinearer Systeme	535
23.4.1	Das Erweiterte Kalman–Bucy–Filter	535
23.4.2	Zustands- und Parameterschätzung	537
	Übungsaufgaben	539
24	LINEARE QUADRATISCHE GAUSSISCHE OPTIMIE-	
	RUNG	542
24.1	LQG–Optimierung zeitkontinuierlicher Systeme	543
24.1.1	Problemstellung	543
24.1.2	Lösung	544
24.1.3	Zeitinvarianter LQG–Regler	548
24.2	LQG–Optimierung zeitdiskreter Systeme	550
24.2.1	Problemstellung	550
24.2.2	Lösung	551
24.2.3	Zeitinvarianter LQG–Regler	554
	Übungsaufgaben	556
A	VEKTOREN UND MATRIZEN	557
A.1	Notation	557
A.2	Definitionen	558
A.3	Differentiationsregeln	559
A.4	Quadratische Formen	559
A.5	Transponieren und Invertieren von Matrizen	562
	Übungsaufgaben	563
B	MATHEMATISCHE SYSTEMDARSTELLUNG	564
B.1	Einführung	564
B.2	Dynamische Systeme	565
B.2.1	Zeitkontinuierliche Systemdarstellung	565
B.2.2	Zeitdiskrete Systemdarstellung	568
B.2.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	569

B.3	Statische Systeme	570
C	GRUNDBEGRIFFE DER WAHRSCHEINLICHKEITS-	
	THEORIE	571
C.1	Wahrscheinlichkeit	571
C.2	Zufallsvariablen	572
C.3	Bedingte Wahrscheinlichkeit	576
C.4	Stochastische Prozesse	577
	Literaturverzeichnis	579
	Index	599