

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Optimierungstypen	3
1.2	Motivation und Grundbegriffe der Optimierung	4
1.3	Allgemeine Form des Optimierungsproblems	7
1.4	Optimierung basierend auf linearer und nichtlinearer Analyse	10
1.5	Konvexität	10
2	Optimierung ohne Restriktionen	14
2.1	Eindimensionale Optimierung (Liniensuche)	14
2.1.1	Einklammerung des Minimums	15
2.1.2	Methode des goldenen Schnitts	15
2.1.3	Polynominterpolation	18
2.1.4	Unvollständige Liniensuche	19
2.2	Mehrdimensionale Optimierung	20
2.2.1	Nelder-Mead-Simplexverfahren	20
2.2.2	Suchrichtungsmethoden	22
2.2.2.1	Methoden 0-ter Ordnung	23
2.2.2.2	Methoden 1-ter Ordnung	26
2.2.2.2.1	Methode des steilsten Abstiegs	27
2.2.2.2.2	Konjugierte Suchrichtungen	28
2.2.2.2.3	Methode der konjugierten Gradienten (Methode nach Fletcher und Reeves)	30
2.2.2.3	Methoden 2-ter Ordnung: Quasi-Newton-Methode	33
2.2.2.4	Skalierung von Designvariablen	36
2.3	Abbruchkriterien	38
3	Optimierung mit Restriktionen	39
3.1	Indirekte Methoden	39
3.1.1	Externe Straffunktion	39
3.1.2	Interne Straffunktion	41
3.1.3	Erweiterte interne Straffunktion	42
3.1.4	Die erweiterte Lagrange-Methode	45
3.1.4.1	Erweiterte Lagrange-Methode für Gleichheitsrestriktionen	45
3.1.4.2	Erweiterte Lagrange-Methode für Ungleichheitsrestriktionen	46
3.2	Direkte Methoden	47
3.2.1	Eindimensionale Optimierung mit Restriktionen	47
3.2.1.1	Einklammerung des Minimums	47
3.2.1.2	Methode des goldenen Schnitts	48
3.2.1.3	Polynominterpolation	49
3.2.2	Mehrdimensionale Optimierung mit Restriktionen	50
3.2.2.1	Kuhn-Tucker-Bedingungen	50
3.2.2.2	Zoutendijks Methode der zulässigen Richtungen	56
3.2.2.3	Modifizierte Methode der zulässigen Richtungen	59
3.2.2.4	Starten im unzulässigen Bereich	60
3.2.2.5	Die generalisierte Methode der reduzierten Gradienten	61

4	Lagrange-Funktion und Dualität	64
4.1	Lagrange-Funktion mit Gleichheitsrestriktionen	64
4.2	Lagrange-Funktion mit Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen	65
4.3	Sattelpunkteigenschaften	67
4.4	Dualität	68
4.4.1	Primale Methode	68
4.4.2	Duale Methode	69
4.4.3	Dualität bei separierbaren Problemen	73
4.5	Interpretation der Lagrange-Multiplikatoren	75
5	Optimalitätskriterienverfahren	78
5.1	Das Prinzip vom voll beanspruchten Tragwerk	78
5.2	Die adaptive biologische Wachstumsregel	80
5.3	Optimalitätskriterien aus den Kuhn-Tucker-Bedingungen	83
6	Approximationsverfahren	84
6.1	Lokale Approximation	84
6.1.1	Lineare und quadratische Approximation	85
6.1.1.1	Sequenzielle lineare Programmierung	86
6.1.1.2	Sequenzielle quadratische Programmierung	88
6.1.1.3	Successive Response Surface Method	88
6.1.2	Reziproke Approximation	91
6.1.3	CONLIN	92
6.1.4	MMA (Method of Moving Asymptotes)	92
6.2	Globale Approximation	98
6.2.1	Lineare Regression	100
6.2.1.1	Polynome	100
6.2.1.2	Bestimmung der Regressionsparameter	101
6.2.1.3	SVD (Singular Value Decomposition)	102
6.2.1.4	Die Moving-Least-Square-Methode	105
6.2.1.5	Sequenzielle Antwortflächen-Methode	107
6.2.2	Nichtlineare Regression	107
6.2.2.1	Neuronale Netzwerke	108
6.2.2.2	Bestimmung der Regressionsparameter	110
6.2.2.3	Levenberg-Marquardt-Methode	110
6.2.3	Statistische Test- und Fehlerterme	112
6.2.4	Interpolationen	113
6.2.4.1	Kriging	113
6.2.4.2	Radiale Basisfunktionen	121
6.2.5	Versuchsplanung	127
6.2.5.1	Klassische Versuchsplanung	129
6.2.5.1.1	Vollständig faktorielle Versuchspläne	130
6.2.5.1.2	Koshal Designs	131
6.2.5.1.3	D-Optimale Versuchspläne	132
6.2.5.2	Moderne Versuchsplanung	133
6.2.5.2.1	Monte Carlo Sampling	133
6.2.5.2.2	Latin Hypercube Sampling	133
6.2.5.2.3	Orthogonal Arrays	135
6.2.5.2.4	Randeffekt	136
6.2.6	Test der Vorhersagegüte	137
6.2.7	Vergleich der globalen Approximationen und Optimierungsstrategie	142

7	Kopplung an FEM	146
7.1	Strukturantworten und Formulierungen des Optimierungsproblems	146
7.1.1	Bauteilsteifigkeit	146
7.1.2	Das Min-Max-Problem	148
7.1.2.1	Die direkte Formulierung	148
7.1.2.2	Die p -Norm	149
7.1.2.3	Die Beta-Methode	149
7.1.2.4	Die Kreisselmeier-Steinhauser-Funktion (KS-Funktion)	150
7.1.3	Frequenzen	153
7.1.4	Weitere Strukturantworten	155
7.1.5	Berücksichtigung von mehreren Lastfällen	156
7.2	Sensitivitätsanalyse	157
7.2.1	Finite Differenzen	157
7.2.2	Analytische und semi-analytische Sensitivitätsanalyse	158
7.2.2.1	Die direkte Methode	159
7.2.2.2	Die adjungierte Methode	160
7.2.2.3	Exakte semi-analytische Sensitivitäten	162
7.3	Programmsysteme zur Optimierung	164
7.3.1	Programme mit integriertem Optimierungsalgorithmus	165
7.3.2	Externe Optimierer	166
7.4	Anwendung: Dimensionierung	168
7.4.1	Wandstärkenoptimierung von Blechbauteilen einer Karosserie	168
7.4.2	Optimierung einer Karosseriestruktur unter Einsatz von Blechen mit variabler Wandstärke	169
7.4.3	„Taylor Rolled Blank“ Optimierung eines Instrumententafelträgers	176
8	Formoptimierung	178
8.1	CAD-basierte Formoptimierung	179
8.1.1	Anwendungsbeispiele	181
8.1.1.1	Formoptimierung eines Torsionsprofils	181
8.1.1.2	Formoptimierung eines Motorhalters	182
8.2	FE-Netz-basierte Formoptimierung	183
8.2.1	Sensitivitätsbasierte Formoptimierung	184
8.2.1.1	Erzeugung von Formbasisvektoren über Lastfälle	188
8.2.1.2	SHAPE200	189
8.2.1.3	Morphing	197
8.2.1.3.1	Grundversion von Morphing	197
8.2.1.3.2	Erweiterte Version von Morphing	200
8.2.1.3.3	Freiformoptimierung	200
8.2.1.4	Sickenoptimierung	201
8.2.1.5	Diskussion der Vor- und Nachteile der Formoptimierung mit Formbasisvektoren	205
8.2.1.6	Anwendungen	205
8.2.1.6.1	Formoptimierung eines Vorderachslenkers	205
8.2.1.6.2	Formoptimierung eines Motorhalters	208
8.2.1.6.3	Formoptimierung eines Kunststoff-Spritzgussteils	210
8.2.1.6.4	Formoptimierung eines Karosserie-Blechbauteils	213
8.2.1.6.5	Sickenoptimierung einer Ersatzradmulde	215
8.2.1.6.6	Sickenoptimierung einer Fahrzeugbodengruppe	216
8.2.2	Das CAO-Verfahren	217
8.2.2.1	Wachstumssimulation mithilfe einer Wachstumsschicht	218

8.2.2.2	Direkte Methode der Wachstumssimulation	220
8.2.2.3	Berücksichtigung von geometrischen Restriktionen	222
8.2.2.4	Das CAIO-Verfahren	225
8.2.2.5	Diskussion der Vor- und Nachteile des CAO-Verfahrens	225
8.2.2.6	Anwendungen	226
8.2.2.6.1	Beispiele aus der Natur	226
8.2.2.6.2	Formoptimierung eines Achsschenkels	228
8.2.2.6.3	Formoptimierung eines Differenzialkäfigs	228
8.2.2.6.4	Formoptimierung eines Karosserie-Blechbauteils	229
9	Topologieoptimierung	231
9.1	Mathematische Topologieoptimierung	233
9.1.1	E-Modul – Dichte-Relation	233
9.1.1.1	Die Homogenisierungsmethode	234
9.1.1.2	Der SIMP-Ansatz	237
9.1.2	Optimierungsziele und Lösungsverfahren	238
9.1.2.1	Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit	239
9.1.2.2	Dynamische Topologieoptimierung	243
9.1.2.2.1	Künstliche Eigenformen	244
9.1.2.2.2	Modellierungsschwäche	245
9.1.2.3	Duale Methode	251
9.1.3	Topologieoptimierung mit nachgezogener Lasteinleitung	255
9.1.4	Mathematische und numerische Probleme	257
9.2	Empirische Topologieoptimierung	263
9.2.1	Das SKO-Verfahren	263
9.2.2	TopShape	265
9.2.3	Weitere empirische Optimierungsverfahren	268
9.3	Vergleich von SKO und mathematischen Verfahren	269
9.4	Die Level Set Methode	269
9.5	Anwendungen	277
9.5.1	Akademische Beispiele	277
9.5.2	Praktische Anwendungen	279
9.5.2.1	Auffinden einer optimalen Lochanordnung	280
9.5.2.2	Bestimmung einer optimalen Sickenanordnung	286
9.5.2.3	Ermittlung von optimalen Merkmalen von Gussteilen	289
9.5.2.3.1	Topologieoptimierung ohne Gussteilrestriktionen	290
9.5.2.3.2	Topologieoptimierung mit Gussteilrestriktionen	299
9.5.2.4	Topologieoptimierung eines Querträgers	312
9.5.2.5	Topologieoptimierung eines Hinterwagens	316
9.5.2.6	Designerstuhl	317
9.5.2.7	Optimierung von Schweißpunkten	318
9.5.3	Weitere Anwendungsbereiche	320
10	Globale Optimierungsverfahren	323
10.1	Multistart	323
10.2	Globale Optimierungsverfahren aus dem Bereich der Bionik	324
10.2.1	Evolutionäre Algorithmen	324
10.2.1.1	Evolutionsstrategien (ES)	325
10.2.1.2	Genetische Algorithmen (GA)	328
10.2.1.3	Abschließende Bemerkungen zu den evolutionären Algorithmen	331
10.2.2	Optimierung mit Teilchenschwärmen (Particle Swarm Optimization)	332

10.3	Simulated Annealing	341
10.4	Generelle Bemerkungen zu den stochastischen Optimierungsverfahren	343
10.5	Der EGO-Algorithmus	343
10.6	Würfeln auf dem Computer	345
10.7	Globale Optimierungsstrategien	346
11	Optimierungsstrategien	348
11.1	Mehrzieloptimierung	348
11.1.1	Zielgewichtung	351
11.1.2	Formulierung mit der KS-Funktion	354
11.1.3	Methode der Abstandsfunktionen	355
11.1.4	Restriktionsformulierung	356
11.1.5	Pareto-Front Bestimmung über Versuchsplanung	357
11.1.6	Pareto-basierte genetische Algorithmen	358
11.2	Multidisziplinäre Optimierung	358
11.3	Die ESL (Equivalent Static Loads) Methode	361
11.4	Bestimmung der wichtigsten Designvariablen und Reduktion der Variablen	365
11.4.1	Bestimmung der wichtigsten Variablen über lokale Sensitivitäten	366
11.4.2	Bestimmung der wichtigsten Variablen über globale Sensitivitäten	366
11.4.2.1	Globale Sensitivitäten aus finiten Differenzen	367
11.4.2.2	Globale Sensitivitäten über eine Varianzanalyse (ANOVA)	367
11.4.2.2.1	Lineares Regressionsmodell	369
11.4.2.2.2	Funktionale Varianzanalyse	369
11.4.2.2.3	Diskrete Varianzanalyse	378
11.4.3	Verfolgen von Sensitivitäten	382
11.5	Robustheits- und Zuverlässigkeitsoptimierung	385
11.5.1	Gegenüberstellung von Versuch und Simulation	387
11.5.2	Statistische Grundlagen	390
11.5.3	Stochastische Simulation	396
11.5.3.1	Monte-Carlo-Methode und lineares Regressionsmodell	398
11.5.3.2	Latin Hypercube Sampling	400
11.5.3.3	Die FOSM-Methode	400
11.5.3.4	Variation der Eingangsstreuung	402
11.5.3.5	Funktionale Varianzanalyse	402
11.5.3.6	Diskrete Varianzanalyse	404
11.5.4	Formulierungen des Optimierungsproblems	405
11.6	Anwendungsbeispiele	413
11.6.1	Robustheitsanalyse und Optimierung des Systems Fensterrahmen/Türdichtung	413
11.6.2	Optimierung und Robustheitsuntersuchung einer Mehrlenkerhinterachse hinsichtlich des Rollgeräusches	422
11.6.3	Robustheitsoptimierung eines Verzweigungsproblems beim Pendelumschlagen eines Hinterachsstabilisators	437
11.6.3.1	Die „Pushing-Away“-Strategie	442
11.6.3.2	Metamodell basierte Robustheitsoptimierung	444
11.6.4	Multidisziplinäre Wandstärkenoptimierung einer Karosserie	447
11.6.5	Multidisziplinäre Form- und Wandstärkenoptimierung einer Sitzquerträger- Struktur	448
12	Literatur	459
	Sachwortverzeichnis	479