

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	Einklammern 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	41
3.1.4	Skalierung der Restriktionen und Festlegung der Parameter	43
3.1.5	Die erweiterte Lagrange-Methode	45
3.1.5.1	Erweiterte Lagrange-Methode für Gleichheitsrestriktionen	46
3.1.5.2	Erweiterte Lagrange-Methode für Ungleichheitsrestriktionen	47
3.2	Direkte Methoden	48
3.2.1	Eindimensionale Optimierung mit Restriktionen	48
3.2.1.1	Einklammern des Minimums	48
3.2.1.2	Methode des goldenen Schnitts	49
3.2.1.3	Polynominterpolation	50
3.2.2	Mehrdimensionale Optimierung mit Restriktionen	51
3.2.2.1	Kuhn-Tucker-Bedingungen	51
3.2.2.2	Zoutendjiks Methode der zulässigen Richtungen	56
3.2.2.3	Modifizierte Methode der zulässigen Richtungen	60
3.2.2.4	Starten im unzulässigen Bereich	61
3.2.2.5	Die generalisierte Methode der reduzierten Gradienten	62

4	Lagrange-Funktion und Dualität	65
4.1	Lagrange-Funktion mit Gleichheitsrestriktionen	65
4.2	Lagrange-Funktion mit Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen	66
4.3	Sattelpunkteigenschaften	68
4.4	Dualität	69
4.4.1	Primale Methode	69
4.4.2	Duale Methode	70
4.4.3	Dualität bei separierbaren Problemen	74
4.5	Interpretation der Lagrange-Multiplikatoren	76
5	Optimalitätskriterienverfahren	79
5.1	Das Prinzip vom voll beanspruchten Tragwerk	79
5.2	Die adaptive biologische Wachstumsregel	81
5.3	Optimalitätskriterien aus den Kuhn-Tucker-Bedingungen	84
6	Approximationsverfahren	85
6.1	Lokale Approximation	85
6.1.1	Lineare und quadratische Approximation	86
6.1.1.1	Sequenzielle lineare Programmierung	87
6.1.1.2	Sequenzielle quadratische Programmierung	89
6.1.1.3	Successive Response Surface Method	89
6.1.2	Reziproke Approximation	92
6.1.3	CONLIN	93
6.1.4	MMA (Method of Moving Asymptotes)	93
6.2	Globale Approximation	99
6.2.1	Lineare Regression	101
6.2.1.1	Polynome	101
6.2.1.2	Bestimmung der Regressionsparameter	102
6.2.1.3	SVD (Singular Value Decomposition)	103
6.2.1.4	Die Moving-Least-Square-Methode	106
6.2.1.5	Sequenzielle Antwortflächen-Methode	108
6.2.2	Nichtlineare Regression	108
6.2.2.1	Neuronale Netzwerke	109
6.2.2.2	Bestimmung der Regressionsparameter	111
6.2.2.3	Levenberg-Marquardt-Methode	111
6.2.3	Statistische Test- und Fehlerterme	113
6.2.4	Interpolationen	114
6.2.4.1	Kriging	114
6.2.4.2	Radiale Basisfunktionen	122
6.2.5	Versuchsplanung	128
6.2.5.1	Klassische Versuchsplanung	130
6.2.5.1.1	Vollständig faktorielle Versuchspläne	131
6.2.5.1.2	Koshal Designs	132
6.2.5.1.3	D-Optimale Versuchspläne	133
6.2.5.2	Moderne Versuchsplanung	134
6.2.5.2.1	Monte Carlo Sampling	134
6.2.5.2.2	Latin Hypercube Sampling	134
6.2.5.2.3	Orthogonal Arrays	136
6.2.5.2.4	Randeffekt	137
6.2.5.3	Fluch der Dimensionalität	138

6.2.6	Test der Vorhersagegüte	140
6.2.7	Vergleich der globalen Approximationen und Optimierungsstrategie	145
7	Kopplung an FEM	150
7.1	Strukturantworten und Formulierungen des Optimierungsproblems	150
7.1.1	Bauteilsteifigkeit	150
7.1.2	Das Min-Max-Problem	152
7.1.2.1	Die direkte Formulierung	152
7.1.2.2	Die p -Norm	153
7.1.2.3	Die Beta-Methode	153
7.1.2.4	Die Kreisselmeier-Steinhauser-Funktion (KS-Funktion)	157
7.1.3	Frequenzen	160
7.1.4	Weitere Strukturantworten	162
7.1.5	Berücksichtigung von mehreren Lastfällen	162
7.2	Sensitivitätsanalyse	163
7.2.1	Finite Differenzen	163
7.2.2	Analytische und semi-analytische Sensitivitätsanalyse	165
7.2.2.1	Die direkte Methode	165
7.2.2.2	Die adjungierte Methode	166
7.2.2.3	Exakte semi-analytische Sensitivitäten	168
7.3	Programmsysteme zur Optimierung	170
7.3.1	Programme mit integriertem Optimierungsalgorithmus	171
7.3.2	Externe Optimierer	173
7.4	Anwendung: Dimensionierung	174
7.4.1	Wandstärkenoptimierung von Blechbauteilen einer Karosserie	175
7.4.2	Optimierung einer Karosseriestruktur unter Einsatz von Blechen mit variabler Wandstärke	176
7.4.3	„Taylor Rolled Blank“ Optimierung eines Lenkungsquerträgers	183
7.4.4	Optimierung eines Instrumententafelträgers unter Berücksichtigung von Frequenzgangrestriktionen	184
8	Formoptimierung	187
8.1	CAD-basierte Formoptimierung	188
8.1.1	Anwendungsbeispiele	190
8.1.1.1	Formoptimierung eines Torsionsprofils	190
8.1.1.2	Formoptimierung eines Motorhalters	191
8.2	FE-Netz-basierte Formoptimierung	192
8.2.1	Sensitivitätsbasierte Formoptimierung	193
8.2.1.1	Erzeugung von Formbasisvektoren über Lastfälle	197
8.2.1.2	SHAPE200	198
8.2.1.3	Morphing	206
8.2.1.3.1	Grundversion von Morphing	206
8.2.1.3.2	Erweitere Version von Morphing	209
8.2.1.3.3	Freiformoptimierung	209
8.2.1.4	Sickenoptimierung	210
8.2.1.5	Diskussion der Vor- und Nachteile der Formoptimierung mit Formbasisvektoren	214
8.2.1.6	Anwendungen	214
8.2.1.6.1	Formoptimierung eines Vorderachslenkens	214
8.2.1.6.2	Formoptimierung eines Motorhalters	221
8.2.1.6.3	Formoptimierung eines Kunststoff-Spritzgussteils	223

	8.2.1.6.4	Formoptimierung eines Karosserie-Blechbauteils	225
	8.2.1.6.5	Sickenoptimierung einer Ersatzradmulde	227
	8.2.1.6.6	Sickenoptimierung einer Fahrzeugbodengruppe	228
8.2.2	Das CAO-Verfahren		229
	8.2.2.1	Wachstumssimulation mithilfe einer Wachstumsschicht	231
	8.2.2.2	Direkte Methode der Wachstumssimulation	232
	8.2.2.3	Berücksichtigung von geometrischen Restriktionen	234
	8.2.2.4	Das CAIO-Verfahren	237
	8.2.2.5	Diskussion der Vor- und Nachteile des CAO-Verfahrens	237
	8.2.2.6	Anwendungen	238
	8.2.2.6.1	Beispiele aus der Natur	238
	8.2.2.6.2	Formoptimierung eines Achsschenkels	240
	8.2.2.6.3	Formoptimierung eines Differenzialkäfigs	240
	8.2.2.6.4	Formoptimierung eines Karosserie-Blechbauteils	241
9	Topologieoptimierung		243
9.1	Mathematische Topologieoptimierung		245
	9.1.1	E-Modul – Dichte-Relation	245
		9.1.1.1 Die Homogenisierungsmethode	246
		9.1.1.2 Der SIMP-Ansatz	249
	9.1.2	Optimierungsziele und Lösungsverfahren	250
		9.1.2.1 Minimierung der mittleren Nachgiebigkeit	251
		9.1.2.2 Dynamische Topologieoptimierung	255
		9.1.2.2.1 Künstliche Eigenformen	256
		9.1.2.2.2 Modellierungsschwäche	257
		9.1.2.3 Duale Methode	263
	9.1.3	Topologieoptimierung mit nachgezogener Lasteinleitung	267
	9.1.4	Mathematische und numerische Probleme	269
9.2	Empirische Topologieoptimierung		275
	9.2.1	Das SKO-Verfahren	275
	9.2.2	TopShape	277
	9.2.3	Weitere empirische Optimierungsverfahren	280
9.3	Vergleich von SKO und mathematischen Verfahren		281
9.4	Die Level Set Methode		281
9.5	Anwendungen		289
	9.5.1	Akademische Beispiele	289
	9.5.2	Praktische Anwendungen	291
		9.5.2.1 Auffinden einer optimalen Lochanordnung	292
		9.5.2.2 Bestimmung einer optimalen Sickenanordnung	298
		9.5.2.3 Ermittlung von optimalen Merkmalen von Gussteilen	301
		9.5.2.3.1 Topologieoptimierung ohne Gussteilrestriktionen	302
		9.5.2.3.2 Topologieoptimierung mit Gussteilrestriktionen	311
		9.5.2.4 Topologieoptimierung eines Querträgers	324
		9.5.2.5 Topologieoptimierung eines Hinterwagens	328
		9.5.2.6 Designerstuhl	329
		9.5.2.7 Optimierung von Schweißpunkten	330
	9.5.3	Weitere Anwendungsbereiche	332
10	Globale Optimierungsverfahren		335
10.1	Multistart		335

10.2	Globale Optimierungsverfahren aus dem Bereich der Bionik	336
10.2.1	Evolutionäre Algorithmen	336
10.2.1.1	Evolutionstrategien (ES)	337
10.2.1.2	Genetische Algorithmen (GA)	340
10.2.1.3	Differentielle Evolution (DE)	343
10.2.1.4	Abschließende Bemerkungen zu den evolutionären Algorithmen	346
10.2.2	Optimierung mit Teilchenschwärmen (Particle Swarm Optimization)	346
10.3	Simulated Annealing	356
10.4	Generelle Bemerkungen zu den stochastischen Optimierungsverfahren	357
10.5	Der EGO-Algorithmus	359
10.6	Würfeln auf dem Computer	361
10.7	Globale Optimierungsstrategien	362
11	Optimierungsstrategien	364
11.1	Mehrzieloptimierung	364
11.1.1	Zielgewichtung	367
11.1.2	Formulierung mit der KS-Funktion	370
11.1.3	Methode der Abstandsfunktionen	371
11.1.4	Restriktionsformulierung	372
11.1.5	Pareto-Front Bestimmung über Versuchsplanung	373
11.1.6	Pareto-basierte genetische Algorithmen	374
11.2	Multidisziplinäre Optimierung	374
11.3	Die ESL (Equivalent Static Loads) Methode	377
11.4	Bestimmung der wichtigsten Designvariablen und Reduktion der Variablen	381
11.4.1	Bestimmung der wichtigsten Variablen über lokale Sensitivitäten	382
11.4.2	Bestimmung der wichtigsten Variablen über globale Sensitivitäten	382
11.4.2.1	Globale Sensitivitäten aus finiten Differenzen	383
11.4.2.2	Globale Sensitivitäten über eine Varianzanalyse (ANOVA)	384
11.4.2.2.1	Lineares Regressionsmodell	385
11.4.2.2.2	Funktionale Varianzanalyse	386
11.4.2.2.3	Diskrete Varianzanalyse	394
11.4.3	Verfolgen von Sensitivitäten	398
11.5	Robustheits- und Zuverlässigkeitsoptimierung	401
11.5.1	Gegenüberstellung von Versuch und Simulation	403
11.5.2	Statistische Grundlagen	406
11.5.3	Stochastische Simulation	412
11.5.3.1	Monte-Carlo-Methode und lineares Regressionsmodell	414
11.5.3.2	Latin Hypercube Sampling	416
11.5.3.3	Die FOSM-Methode	416
11.5.3.4	Variation der Eingangsstreuung	418
11.5.3.5	Funktionale Varianzanalyse	418
11.5.3.6	Diskrete Varianzanalyse	421
11.5.4	Formulierungen des Optimierungsproblems	421
11.6	Anwendungsbeispiele	430
11.6.1	Robustheitsanalyse und Optimierung des Systems Fensterrahmen/Türdichtung	430
11.6.2	Optimierung und Robustheitsuntersuchung einer Mehrlenkerhinterachse hinsichtlich des Rollgeräusches	438
11.6.3	Robustheitsoptimierung eines Verzweigungsproblems beim Pendelumschlagen eines Hinterachsstabilisators	453
11.6.3.1	Die „Pushing-Away“-Strategie	459
11.6.3.2	Metamodell basierte Robustheitsoptimierung	461

11.6.4	Multidisziplinäre Wandstärkenoptimierung einer Karosserie	463
11.6.5	Multidisziplinäre Form- und Wandstärkenoptimierung einer Sitzquerträger- Struktur	465
12	Literatur	475
	Sachwortverzeichnis	496