
Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Strukturoptimierung als Entwicklungswerkzeug	2
1.2 Aufbau einer Optimierungsprozedur	3
1.3 Klassifizierung der Strukturoptimierungsaufgaben	3
1.4 Erstellung von Spezifikationslisten	5
1.5 Hinweise zum Analysemodell	5
1.6 Wesentliche Begriffe der Strukturoptimierung	6
1.7 Übungsaufgabe	6
Literatur	7
2 Grundwissen zur Entwicklung mechanischer Systeme	9
2.1 Konstruktionsprinzipien	9
2.1.1 Maßnahmen zur Gewichtsreduzierung	9
2.1.2 Gestaltungsprinzipien	10
2.1.3 Werkstoffauswahl	12
2.2 Praktische Konstruktion mechanischer Systeme	13
2.2.1 Grundregeln	13
2.2.2 Flexible CAD-Modelle	14
2.2.3 „Digital Mock-up“ (DMU)	18
2.2.4 „Virtual Reality“ (VR)	19
2.2.5 Hilfe von „Außen“	19
2.2.6 Berücksichtigung des Fertigungsprozesses	20
2.3 Simulation des Verhaltens mechanischer Strukturen	20
2.3.1 Grundlagen der Finite Elemente Methode	21
2.3.2 Praktischer Einsatz der <i>Finite Elemente Methode</i>	23
2.3.3 Zusammenstellung der wichtigsten verfügbaren <i>Finite Elemente Programme</i> und ihrer Einsatzbereiche	26
2.3.4 Einbeziehung von nicht-strukturmechanischen Phänomenen	27
2.4 Übliche Ziel- und Restriktionsfunktionen	27
2.4.1 Anforderungen, die als Gebietsintegral beschreibbar sind	27
2.4.2 Weitere Anforderungen	31

2.4.3	BETA-Methode zur Zusammenfassung der Anforderungen	32
2.4.4	Nachträgliche Kontrolle von nicht berücksichtigten Anforderungen	33
2.5	Prozesse bei der Entwicklung mechanischer Strukturen	33
2.5.1	Analyse der Erfolgssaussichten	33
2.5.2	Phasen des Entwicklungsprozesses	34
2.5.3	Position der physikalischen Simulation und der Strukturoptimierung im Prozess	35
2.5.4	Rolle der Konstruierenden im Entwicklungsprozess	36
2.5.5	Rolle der Berechnungsingenieure/-ingenieurinnen im Entwicklungsprozess	36
2.6	Hinweise zur Einführung der Optimierung im industriellen Entwicklungsprozess	39
2.7	Übungsaufgaben	41
	Literatur	43
3	Mathematische Grundlagen der Optimierung	45
3.1	Einführung anhand eines einfachen Beispiels	45
3.2	Formulierung des Optimierungsproblems	46
3.3	Globales und lokales Minimum – Konvexität	48
3.4	Bedingungen für die Existenz eines lokalen Minimums	50
3.5	Behandlung restriktierter Optimierungsaufgaben mit der LAGRANGE-Funktion	51
3.6	Grundlagen der Stochastik	52
3.7	Übungsaufgaben	55
	Literatur	55
4	Optimierungsverfahren	57
4.1	Optimierung ohne Restriktionen	58
4.1.1	Eindimensionale Optimierung	58
4.1.2	Mehrdimensionale Optimierung	61
4.2	Optimierung mit Restriktionen	65
4.2.1	Methoden mit Definition von Straffunktionen	65
4.2.2	Direkte Methoden	66
4.3	Approximation des realen Problems	71
4.3.1	Lokale Approximation	72
4.3.2	Globale Approximation	76
4.4	Approximationsbasierte Optimierungsalgorithmen	87
4.4.1	Verwendung der LAGRANGE-Funktion zur Suche des Optimums	88
4.4.2	Duale Lösungsmethode (CONLIN)	91
4.4.3	Sequentielle Quadratische Programmierung (SQP)	93
4.4.4	Anpassen der Meta-Modelle während der Optimierung	94

4.5	Stochastische Suchstrategien	94
4.5.1	Monte-Carlo-Methode	94
4.5.2	Evolutionsalgorithmen	95
4.5.3	Simulated Annealing	98
4.6	Lösung diskreter Optimierungsaufgaben	100
4.7	Kombinationen und weitere Verfahren	101
4.7.1	Auswahl mehrerer Startentwürfe	101
4.7.2	Weitere Optimierungsverfahren	101
4.7.3	Auswahl und Kombination von Optimierungsalgorithmen	103
4.8	Übungsaufgaben	103
	Literatur	104
5	Optimierungsprogrammsysteme	107
5.1	Optimierungsmöglichkeiten von Microsoft-Excel® und MATLAB®	108
5.1.1	Microsoft-Excel®	108
5.1.2	MATLAB®	108
5.2	Allgemein und schnell verwendbare Optimierungssoftware	109
5.2.1	Anforderungen an die Optimierungssoftware	112
5.2.2	Analytische Testfunktionen	114
5.2.3	Testbeispiele aus der Praxis	119
5.3	Spezielle Software zur Strukturoptimierung und Sensitivitätsanalyse	122
5.3.1	Analytische Sensitivitätsanalyse	122
5.3.2	Finite Elemente Programme mit integriertem Optimierungsalgorithmus	124
5.3.3	Dimensionierungsbeispiele	127
5.4	Optimierung großer Systeme durch Parallelverarbeitung	130
5.4.1	Parallelisierungsmöglichkeiten	130
5.4.2	Software zum Verteilen der Rechenlast	131
5.4.3	Steuerung durch die Optimierungssoftware	132
5.5	Übungsaufgaben	132
	Literatur	134
6	Optimierungsstrategien	135
6.1	Verfahrensstrategien und Voroptimierungen	135
6.2	Mehrzieloptimierung	136
6.2.1	Methode der Zielgewichtung	138
6.2.2	Methode der Abstandsfunktionen	138
6.2.3	Methode der restriktionsorientierten Transformation	140
6.2.4	Min-Max-Formulierung	141
6.2.5	BETA-Methode	141
6.2.6	Darstellung des PARETO-optimalen Rands im Ant-Hill-Plot	141
6.3	Multidisziplinäre Optimierung	141
6.3.1	Globale Sensitivitätsmatrix	142
6.3.2	Vorbereitende Optimierungen in den Einzeldisziplinen	145

6.3.3	Multidisziplinäre Optimierung in einem geschlossenen Rechenlauf	146
6.4	Multilevel-Optimierung	148
6.5	Berücksichtigung der Streuung der Strukturparameter, Robust Design ..	150
6.5.1	Problemstellung	150
6.5.2	Einbeziehung der Robustheitsanalyse in den Optimierungsprozess	153
6.5.3	Prozess für eine zeitsparende Optimierung	154
6.5.4	Anwendungen	156
6.6	Übungsaufgaben	159
Literatur		160
7	Methoden zur Formoptimierung	163
7.1	Funktionen zur Geometriebeschreibung	165
7.1.1	Rekursivformel für NURBS	166
7.1.2	Flexibilität von NURBS	167
7.1.3	Standard-definierte Ansatzfunktionen und sukzessive Verfeinerungsmöglichkeiten	169
7.1.4	Erstellung von Fläche und Volumen aus den Splines	170
7.1.5	Spezielle Ansatzfunktionen	170
7.2	Formoptimierung basierend auf parametrisierten CAD-Modellen	172
7.2.1	Einsatz der NURBS bei Formoptimierungsproblemen	172
7.2.2	Prozess der Formoptimierung	174
7.2.3	Anwendungsbeispiele	175
7.2.4	Linienmodell-basierte Konstruktion	186
7.2.5	Automatische Erstellung eines Geometriemodells aus einem FE-Modell	188
7.3	Methoden ohne Zugriff auf die CAD-Daten	188
7.4	Steigerung der Effizienz durch Nutzung schneller Sensitivitätsanalyse	189
7.4.1	Mathematische Formulierung der Gebietsvariation	190
7.4.2	Einbindung der mechanischen Grundgleichungen in die LAGRANGE-Funktion	192
7.4.3	Explizite Ausführung der Gebietsvariation	193
7.4.4	Auswertung aller notwendigen Bedingungen	195
7.4.5	Separation der Gebietsvariation	196
7.4.6	Variationelle Sensitivitätsanalyse	196
7.4.7	Praktischer Einsatz der Variationellen Sensitivitätsanalyse	197
7.4.8	Einsetzen bestimmter Optimierungsfunktionale	199
7.5	Verfahren für spezielle Ziel- und Restriktionsfunktionen	205
7.5.1	Nutzung von Optimalitätskriterien	205
7.5.2	Biologische Wachstumsstrategie	206
7.5.3	Topographie-Optimierung	207

7.6 Übungsaufgaben	207
Literatur	209
8 Methoden zur Topologieoptimierung	211
8.1 Begriff der Topologie und Einordnung der Verfahren	211
8.2 Optimierung mit der Pixel-Methode	214
8.2.1 Homogenisierung des porösen Materialverhaltens	215
8.2.2 Ziel- und Restriktionsfunktionen und deren Sensitivitäten	217
8.2.3 Definition des Entwurfsraums	218
8.2.4 Vorgehensweise bei der Verwendung der Pixel-Methode zur Topologieoptimierung	219
8.2.5 Verwendete Software	219
8.2.6 Einfache Anwendungen der Pixel-Methode	220
8.3 Anwendungen der Pixel-Methode	223
8.4 Erweiterungen der Pixel-Methode	226
8.5 Kombinierte Topologie- und Formoptimierung	229
8.5.1 Optimierungskonzept der Bubble Methode	230
8.5.2 Analytische Ausdrücke für die optimale Lochpositionierung (indirekte Methode)	231
8.5.3 Lochpositionierung durch numerische Suchverfahren (direkte Methode)	235
8.5.4 Geometrische Verarbeitung der positionierten Löcher	235
8.5.5 Form- und Topologieoptimierung einer Kragscheibe	237
8.5.6 Positionierung einer Spannungsentlastungsbohrung	239
8.5.7 Bewertung der Verfahren mit parametrisierter Randbeschreibung	240
8.6 Übungsaufgaben	241
Literatur	241
9 Weitere exemplarische Anwendungen der Strukturoptimierung	243
9.1 Optimierung bei Crashlastfällen	243
9.1.1 Passive Sicherheit	243
9.1.2 Abstimmung der Insassen-Sicherungssysteme	244
9.1.3 Crash-Auslegung der Karosserie	245
9.1.4 Einsatzfelder der Optimierung bei der Crashauslegung	245
9.1.5 Beispiel: Steifigkeitsauslegung der Karosserie für den Fahrzeugüberschlag	246
9.2 Betriebsfestigkeitsoptimierung	250
9.2.1 Einflussfaktoren der Betriebsfestigkeitsrechnung für eine Safe-Life-Auslegung	251
9.2.2 Ablauf der Betriebsfestigkeitsrechnung	252

9.2.3	Betriebsfestigkeitsoptimierung eines Achsschenkels	253
9.2.4	Optimierung spröder Werkstoffe	255
9.3	Faserverbundoptimierung	257
9.3.1	Mechanik der Verbundwerkstoffe	258
9.3.2	Prinzipielle Studie zum Einfluss der Laminateigenschaften auf das Bauteilverhalten	260
9.3.3	Faserverbundoptimierung eines Außenflügels	261
9.3.4	Robustes Optimieren der Faserverbundstruktur	265
9.3.5	Lochpositionierung in einer Faserverbundscheibe	265
9.4	Optimierungen basierend auf Versuchsergebnissen	268
	Literatur	271
Anhang	273
Englische Fachausdrücke	293
Sachverzeichnis	301