

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Grundwissen zur Entwicklung mechanischer Systeme</b>	<b>9</b>
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 Erfolgsaussichten. ....	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
<b>3</b>	<b>Mathematische Grundlagen der Optimierung. ....</b>	<b>45</b>
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 restringierter Optimierungsaufgaben mit der LAGRANGE-Funktion .....	51
3.6	Grundlagen der Stochastik. ....	52
3.7	Übungsaufgaben. ....	55
	Literatur. ....	55
<b>4</b>	<b>Optimierungsverfahren .....</b>	<b>57</b>
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	<b>Optimierungsprogrammsysteme</b> .....	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	<b>Optimierungsstrategien</b> .....	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	<b>Methoden zur Formoptimierung</b> .....	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
<b>8</b>	<b>Methoden zur Topologieoptimierung.....</b>	<b>211</b>
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 Klagscheibe .....	237
8.5.6	Positionierung einer Spannungsentlastungsbohrung .....	239
8.5.7	Bewertung der Verfahren mit parametrisierter Randbeschreibung .....	240
8.6	Übungsaufgaben.....	241
	Literatur.....	241
<b>9</b>	<b>Weitere exemplarische Anwendungen der Strukturoptimierung.....</b>	<b>243</b>
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 Lamineigenschaften 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
	<b>Anhang</b> .....	273
	<b>Englische Fachausdrücke</b> .....	293
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	301