

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Bionik in der Strukturoptimierung

Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau

Vogel Communications Group

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Bionik, Leichtbau und Strukturoptimierung	11
2 Leichtbau	13
2.1 Spannungsfeld Leichtbau	13
2.1.1 Gründe für Leichtbau	13
2.1.2 Gründe für Gewichtszunahme	13
2.1.3 Drei Leichtbau-Leitlinien	15
2.2 Kosten	16
2.2.1 Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe	16
2.2.2 Zusammenhang von Gewicht zu Kosten eines Produktes	17
2.3 Leichtbau-Begriffe	18
2.3.1 Leichtbau-Strategien	20
2.3.2 Leichtbau-Werkzeuge	20
2.3.3 Leichtbau-Bauweisen	21
3 Bionik	25
3.1 Bionik: Biologie und Technik	25
3.1.1 Bedeutung der Bionik	25
3.1.2 Voraussetzungen, um Bionik erfolgreich anzuwenden	26
3.1.3 Biologie und Evolution – Einflüsse auf die Struktur	27
3.2 Übersetzungs-Wörterbuch: Biologie–Technik / Technik–Biologie	28
3.2.1 Lage- und Richtungsbezeichnung	29
3.2.2 Allgemeiner struktureller Aufbau von Pflanzen	30
3.2.3 Technische und natürliche Faserverbundwerkstoffe und ihre Ausgangswerkstoffe	32
3.3 Bionik in Entwicklungsprozesse integrieren Prof. Dr. HEIKE BEISMANN	32
3.3.1 Entwicklungsprozess der VDI 2221	35
3.3.2 Integration der Bionik in die einzelnen Arbeitsabschnitte	37
3.3.3 Anwendungsbeispiel	45
3.3.4 Gesamtbetrachtung	46
4 Kraftfluss	49
4.1 Geschlossener und offener Kraftfluss	49
4.2 Favorisierter Kraftfluss	51
4.3 Atomkräfte als Ursache des favorisierten Kraftflusses	54
4.3.1 Atomkräfte	54
4.3.2 Elastische und plastische Verformungen	55
4.3.3 Materialgesetz und Materialfestigkeiten	56
4.3.4 Qualitativer Kraftfluss: «ein einfaches Modell»	57
4.4 Gestaltung von Standardbauteilen in Abhängigkeit der Grundlastfälle	59
4.4.1 Fünf Grundlastfälle	59

4.4.2	Standardbauteile	59
4.4.3	Überblick strukturmechanisch günstiger Strukturen	60
5	Optimierung	65
5.1	Grundlagen	65
5.1.1	Allgemeine Beschreibung	65
5.1.2	Lokale und globale Extremwerte	66
5.1.3	Praktisches Beispiel: Papierschachtel	67
5.2	Optimierungsverfahren	69
5.3	Optimierungstools	73
5.3.1	Unterscheidung der Optimierungstools in vier Klassen	74
5.3.2	Wann wird welche Methode eingesetzt?	77
6	Evolutionäre Algorithmen	79
6.1	Evolutionäre Grundlagen	79
6.2	Evolutionstrategie	81
6.3	Einfluss der Strategie und der Einstellungen auf den Optimierungsablauf	81
6.3.1	Plus- oder Komma-Strategie	81
6.3.2	Anzahl der Nachkommen	82
6.3.3	Festlegung der Mutationsschrittweite bzw. Mutationsrate	82
6.3.4	Vorgehensweisen, um aus lokalen Extremwertstellen herauszufinden	84
6.4	Evolutionäre Optimierung mit Excel	84
6.4.1	Excel-Funktionen zur Berechnung der Mutationsrate	85
6.4.2	Umsetzung einer ES-Optimierung in Excel	86
6.4.3	(1+3)-ES-Strategie	87
6.4.4	Anzahl der Nachkommen erhöhen	88
7	Strukturoptimierung	91
7.1	Begriffe der Strukturoptimierung	91
7.2	Fünf Disziplinen der Strukturoptimierung	93
7.3	Strukturoptimierungsprogramme	96
7.4	Überblick der erhältlichen Optimierungsprogramme	97
7.5	FEM (Finite-Elemente-Methode)	100
8	Topologieoptimierung	103
8.1	Einführung	103
8.1.1	Beispiele aus der Biologie	103
8.1.2	Knochen und Knochenwachstum Prof. Dr. med. MARCUS JÄGER	104
8.1.3	Historische Ansätze einer optimierten Topologie	107
8.2	Allgemeiner Ablauf einer Topologieoptimierung mit Ergebnisbetrachtung	108
8.2.1	Der Weg zu einem optimalen Design	108
8.2.2	Wahl der Zielfunktion	110
8.2.3	Betrachtung der Designvorschläge	111
8.2.4	Die Spannungsart als Bewertungsgröße: Von-Mises-Vergleichsspannung oder HNS	115
8.2.5	Höhe der Referenzspannung, Füllgrad, Massen- oder Gewichtsreduktion	116

8.2.6	Suboptimale Designvorschläge	117
8.2.7	Weitere Stellschrauben	118
8.3	Soft-Kill-Option-Methode (SKO)	120
8.3.1	Ein Kragträger als Optimierungsbeispiel	121
8.3.2	Stellgrößen der SKO-Methode	121
8.4	SKO mit Excel	123
8.4.1	Excel-Umsetzung der SKO-Methode	123
8.4.2	Detaillierter Ablaufplan einer Optimierung	124
8.4.3	Ergebnisdarstellung	126
8.5	FORTRAN-Programmierung der SKO-Methode	127
8.6	Mathematische Topologieoptimierung	128
8.6.1	Vorgehen einer mathematischen Optimierung	128
8.6.2	TopOpt-Optimierungsprogramm	133
9	Kraftkegelmethode (KKM)	135
9.1	Motivation und Grundgedanke	135
9.2	Begriffe der Kraftkegelmethode	136
9.3	Drei Varianten der Kraftkegelmethode	136
9.3.1	Allgemeine Vorgehensweise	137
9.3.2	Variante 1: Wirklinie der Kraft ist senkrecht zur Lagerebene	138
9.3.3	Variante 2: Wirklinie der Kraft ist parallel zur Lagerebene	139
9.3.4	Variante 3: Wirklinie der Kraft ist parallel zur Lagerebene und Lagerabstand ist geringer als die Höhe des Kraftangriffspunktes	140
9.4	Weitere Anmerkungen und Hinweise	144
9.4.1	Änderung der Kraftwirklinie führt zu mindestens zwei Streben	144
9.4.2	Einfluss der Kraftflussumlenkung auf das Volumen der Struktur	145
9.4.3	Dimensionierung der Streben	145
9.5	Zusammenfassung und Übungen zur KKM	146
10	Formoptimierung	149
10.1	Was ist eine Form und wann ist eine Form gut gestaltet?	149
10.1.1	Technisches Beispiel für eine strukturmechanisch günstige Form	149
10.1.2	Biologische Beispiele für kraftflussgerecht geformte Strukturen	150
10.1.3	Historische Ansätze zur Kerbformoptimierung	151
10.2	Genauere Betrachtung der Kerbspannungen	153
10.3	Was ist eine strukturmechanisch günstige Kerbkontur?	155
10.3.1	Grundlagen des Baumwachstums	155
10.4	Methoden zur Kerbformoptimierung	157
10.5	Formoptimierung durch Zugdeformation	157
10.6	Computer-Aided-Optimization-Methode (CAO)	159
10.6.1	Umsetzung des lastadaptiven Holzwachstums mittels einer adaptiven FEM-Struktur	159
10.7	Methode der Zugdreiecke (ZDE)	162
10.7.1	Spannungssituation im Kerbgrund einer Balkenschulter	163
10.7.2	Zugdreiecksmethode bei einer Balkenschulter	164
10.7.3	Zweiachsige Belastung	166
10.7.4	Anwendungsbeispiel Winkelstruktur	169
10.7.5	Schrumpf-ZDE	169

10.7.6 Wachsen und Schrumpfen	170
10.7.7 Vertiefendes Zugdreiecks-Know-how	171
11 Dimensionierungs-, Sizing- oder Parameteroptimierung	177
11.1 Biologisches Beispiel für Sizing	177
11.2 Technische Beispiele für Sizing	178
11.3 Parametervariation in Excel am Beispiel des Zugseils eines Balkons	179
11.4 Excel-Solver	181
11.5 FEM-Parameterstudie	185
11.5.1 ANSYS-Parameter-Variation	186
12 Materialauswahl	189
12.1 Materialauswahl – Beharren im Bewährten oder risikobereit für neue Werkstoffe?	189
12.2 Materialauswahlprozess	190
12.2.1 Schritt 1: Anforderungsprofil	190
12.2.2 Schritt 2: Screening	191
12.2.3 Schritt 3: Ranking	192
12.2.4 Schritt 4: Ganzheitliche Bewertung – Portfolio	196
12.2.5 Schritt 5: Bewertung mit lokalen Gegebenheiten	196
12.3 Zusammenfassung des Auswahlprozesses	196
13 ELiSE-Verfahren	199
13.1 Diatomeen und Radiolarien Dr. CHRISTIAN HAMM	200
13.2 ELiSE als Produktentstehungsprozess	201
13.3 Anwendungsbeispiele	204
13.3.1 Offshore-Gründungsstruktur	204
13.3.2 B-Säule im Automobilbau	204
13.4 Bewertung des ELiSE-Verfahrens und Einflüsse auf die Optimierungsgüte	205
13.5 Ausblick: Weiterentwicklungen und Potenziale	206
14 Strukturoptimierung im Produktentwicklungsprozess	209
14.1 Übertragung der Optimierungsergebnisse in den Konstruktionsprozess	210
14.2 Dienstleister und Fördermöglichkeiten	211
14.3 Fazit	211
Abkürzungen	213
Quellenverzeichnis	215
Stichwortverzeichnis	221