

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| <b>Vorwort</b> .....  | 5  |
| <b>1 Bionik, Leichtbau und Strukturoptimierung</b> .....                                    | 11 |
| <b>2 Leichtbau</b> .....  | 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 |
| <b>3 Bionik</b> .....   | 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<br>Ausgangswerkstoffe ..... | 32 |
| 3.3 Bionik in Entwicklungsprozesse integrieren<br>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 |
| <b>4 Kraftfluss</b> .....   | 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<br>Grundlastfälle .....            | 59 |
| 4.4.1 Fünf Grundlastfälle .....   | 59 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.4.2    | Standardbauteile .....   | 59         |
| 4.4.3    | Überblick strukturmechanisch günstiger Strukturen .....                              | 60         |
| <b>5</b> | <b>Optimierung</b> .....   | <b>65</b>  |
| 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         |
| <b>6</b> | <b>Evolutionäre Algorithmen</b> .....  | <b>79</b>  |
| 6.1      | Evolutionäre Grundlagen .....  | 79         |
| 6.2      | Evolutionsstrategie .....  | 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         |
| <b>7</b> | <b>Strukturoptimierung</b> .....   | <b>91</b>  |
| 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        |
| <b>8</b> | <b>Topologieoptimierung</b> .....  | <b>103</b> |
| 8.1      | Einführung .....   | 103        |
| 8.1.1    | Beispiele aus der Biologie .....   | 103        |
| 8.1.2    | Knochen und Knochenwachstum<br>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:<br>Von-Mises-Vergleichsspannung oder HNS ..... | 115        |
| 8.2.5    | Höhe der Referenzspannung, Füllgrad, Massen- oder<br>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        |
| <b>9</b>  | <b>Kraftkegelmethode (KKM) .....</b>   | <b>135</b> |
| 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<br>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        |
| <b>10</b> | <b>Formoptimierung .....</b>   | <b>149</b> |
| 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<br>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        |
| <b>11 Dimensionierungs-, Sizing- oder Parameteroptimierung .....</b>                         | <b>177</b> |
| 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        |
| <b>12 Materialauswahl .....</b>  | <b>189</b> |
| 12.1 Materialauswahl – Beharren im Bewährten oder risikobereit für neue<br>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        |
| <b>13 ELiSE-Verfahren .....</b>  | <b>199</b> |
| 13.1 Diatomeen und Radiolarien<br>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        |
| <b>14 Strukturoptimierung im Produktentwicklungsprozess .....</b>                            | <b>209</b> |
| 14.1 Übertragung der Optimierungsergebnisse in den Konstruktionsprozess .....                | 210        |
| 14.2 Dienstleister und Fördermöglichkeiten .....   | 211        |
| 14.3 Fazit .....   | 211        |
| <b>Abkürzungen .....</b>   | <b>213</b> |
| <b>Quellenverzeichnis .....</b>  | <b>215</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis .....</b>  | <b>221</b> |