

ALEXANDER SAUER

# Bionik in der Struktur- optimierung

Praxishandbuch für  
ressourceneffizienten  
Leichtbau



Ein Fachbuch von

**konstruktions  
praxis**

Alexander Sauer

**Bionik in der Strukturoptimierung**

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

# **Bionik in der Strukturoptimierung**

**Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau**

Vogel Communications Group

## Die Autoren:

### **Prof. Dr.-Ing. ALEXANDER SAUER**

Professor für Bionik und Leichtbau

Studiengangsleiter B.Sc. Bionik

Mitglied im WIB (Westfälisches Institut für Bionik)

Fachkollegiat im Fachkollegium 402 «Mechanik und Konstruktiver Maschinenbau», Fach «Leichtbau und Textiltechnik» der DFG (Deutschen Forschungsgemeinschaft)

*Akademischer und beruflicher Werdegang*

Stiftungsprofessur Westfälische Hochschule, Campus Bocholt

Entwicklungsingenieur bei Voith GmbH & Co. KG in Heidenheim

Promotion bei Prof. Dr. CLAUS MATTHECK, Universität Karlsruhe (TH), Fakultät für Maschinenbau, Thema: «Untersuchungen zur Vereinfachung biomechanisch inspirierter Strukturoptimierung»

Wissenschaftlicher Angestellter am Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung II, Abteilung Biomechanik

Maschinenbau-Studium an der Universität Karlsruhe (TH) Studienrichtung

Produktentwicklung und Konstruktion

*F&E-Schwerpunkte*

Bionik, Strukturoptimierung, Biologische und technische Faserverbund-Strukturen, Kraftfluss-gerechte Bauteilgestaltung

### **Prof. Dr. HEIKE BEISMANN**

(Essayautorin des Buchabschnitts 3.3)

Westfälische Hochschule, Campus Bocholt

Lehrgebiet: Biologie und Bionik

Studiengang Bionik

### **Prof. Dr. med. MARCUS JÄGER**

(Essayautor des Buchabschnitts 8.1.2)

Direktor der Klinik

Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie Universität Duisburg-Essen

Universitätsklinikum Essen (AÖR)

Evangelisches Krankenhaus Essen-Werden

### **Dr. CHRISTIAN HAMM**

(Essayautor des Buchkapitels 13)

Alfred-Wegener-Institut

Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Leiter Bionischer Leichtbau und Funktionelle Morphologie

## Weitere Informationen:

**www.vogel-fachbuch.de**



<http://twitter.com/vogelfachbuch>



[www.facebook.com/vogel-fachbuch](http://www.facebook.com/vogel-fachbuch)



[www.vogel-fachbuch.de/rss/buch.rss\\_](http://www.vogel-fachbuch.de/rss/buch.rss_)

ISBN 978-3-8343-3381-0

1. Auflage. 2018

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Copyright 2018 by Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, Würzburg

Für die Umschlaggrafik wurden Bildelemente von PAUL BOMKE, Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven, verwendet.

## Vorwort

In diesem Buch geht es darum, Bauteile so zu gestalten, dass sie mit minimalem Aufwand ihre strukturellen Funktionen erfüllen. Das Ziel ist, durch Leichtbaumaßnahmen eine Gewichtseinsparung zu erreichen, womit eine Performancesteigerung ermöglicht wird. Gleichzeitig soll durch ressourceneffizienten Material- und Methodeneinsatz eine Reduktion der Kosten angestrebt werden. Die Bionik ist hierbei ein mächtiges Werkzeug und hilft diese Ziele zu erreichen.

Der Fokus ist auf bionische Verfahren gerichtet, die meist mit einer einfachen und robusten Anwendung punkten, klammert jedoch konventionelle Methoden nicht aus. Schlussendlich gilt der Ansatz, technische Probleme pragmatisch zu lösen. Das Buch bietet Konstrukteuren, Entwicklern, Studierenden und Interessierten einen Überblick sowie direkt anwendbare Lösungsmethoden. Es beschreibt die Thematik der Strukturoptimierung und enthält praktische Hilfestellungen und Tools, wie auch mit einfachen Mitteln Optimierungen vorgenommen werden können, die zu kraftflussgerechten Bauteilen und damit zu Leichtbaustrukturen führen. Vervollständigt wird die Thematik durch essenzielle Grundlagen der Bionik sowie des Leichtbaus. Mit Hilfe des PEP (Produktentwicklungsprozesses) wird gezeigt, wann und wie welche Methoden sinnvoll anzuwenden sind.

Das Buch ist im Rahmen meiner Leichtbauvorlesungen an der Westfälischen Hochschule (WHS), Campus Bocholt, entstanden. Der praktische und anwendungsorientierte Charakter der Vorlesung, der neben Beispielen auch ergänzende Arbeitsmaterialien umfasst, wird in diesem Buch mit dem Onlineservice InfoClick wiedergegeben. Inhalte, die mit dem InfoClick-Symbol versehen sind, verweisen darauf, dass auf der Internetseite des Verlags [www.vbm-fachbuch.de](http://www.vbm-fachbuch.de) zusätzliche Informationen und Arbeitsmaterialien zum Downloaden bereitstehen. Zusätzlich findet man im Text die zugehörigen Quellen und Internetadressen, um sich intensiver mit einzelnen Themen zu beschäftigen. Handelt es sich hierbei um eine spezielle Textstelle und nicht um das gesamte Buch, wird die Seite angegeben, auf die sich der jeweilige Verweis bezieht.

## Danksagung

An der Entstehung dieses Buches haben mich viele Personen unterstützt, bei denen ich mich herzlich bedanken möchte. Die Essayautoren Prof. Dr. HEIKE BEISMANN, Dr. CHRISTIAN HAMM und Prof. Dr. MARCUS JÄGER erklärten sich sofort bereit, mit ihren Essays wichtige fachliche Aspekte aus ihrem wissenschaftlichen Blickwinkel zu beleuchten.

Den Studierenden danke ich für den konstruktiven Austausch in der Vorlesung und die kritischen Nachfragen, wodurch Lücken geschlossen und Inhalte präzisiert wurden.

Meinem Vater, Dipl.-Ing. WOLFGANG SAUER, danke ich für die kritische und konstruktive Diskussion und das Feedback zum gesamten Werk.

Meinen Kollegen aus den unterschiedlichen Fachrichtungen danke ich für die fruchtbaren Diskussionen, die gerade im Bereich der Bionik sehr hilfreich und zielführend waren, im Besonderen Prof. HEIKE BEISMANN und Herrn Dipl.-Biol. OLIVER HAGEDORN. Meinem Mitarbeiter B.Eng. FRANK BÜNING danke ich für die CAD-Zeichnungen und seine Unterstützung. Meinem Bruder JOHANNES SAUER danke ich für seine handschriftlichen Zeichnungen und den Austausch. Dr. SASCHA HALLER, Prof. Dr. MICHAEL HERDY, Prof. Dr. HENNING KIEL, Prof. Dr. ANDREA SPRINGER und Dr. IWIZA TESARI danke ich für das inhaltliche Feedback zu verschiedenen Kapiteln.

Prof. Dr. CLAUDIUS MATTHECK, der mit seiner Forschung die bionische Strukturoptimierung geprägt hat, gilt mein besonderer Dank, da er freundlicherweise der Nutzung seiner Bilder in diesem Buch zugestimmt hat.

Und besonders danke ich Herrn Dipl.-Ing. NIELS BERNAU und dem Verlag, ohne die dieses Buch nicht erschienen wäre.

Vielen Dank.

Ich wünsche Ihnen als Leser viel Freude an der bionischen Strukturoptimierung und hoffe, dass Sie das neu erworbene Wissen auch erfolgreich anwenden können.

Bocholt

ALEXANDER SAUER

# 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 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
<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 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 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
<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 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 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 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 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>

# 1 Bionik, Leichtbau und Strukturoptimierung

Bionik bedeutet technische Probleme mit Hilfe der Natur zu lösen. Das erfolgte für viele Bereiche bekanntlich schon durch LEONARDO DA VINCI und für den Traum des menschlichen Flugs durch OTTO LILIENTHAL. Neben diesen ganz bekannten Beispielen diente die Natur noch für viele weitere Anwendungen als Vorbild, die nicht ganz so bekannt [94] oder dokumentiert sind. Aktuell ist Bionik wieder sehr gefragt und sogar leistungsfähiger als früher, da moderne Analysemethoden es ermöglichen, weitere Geheimnisse der Natur zu entschlüsseln.

Bei uns Menschen lassen sich zwei Tendenzen beobachten: einerseits das Unstete, Rastlose, ständig um eine Verbesserung Bemühte und auf der anderen Seite, wenn einmal ein guter Weg gefunden wurde, kein Weiterstreben, sondern ein Verharren im Bekannten und scheinbar Sicheren. Bei Unternehmen kann man auch diese beiden Eigenschaften erkennen, wobei in einem zunehmend globalen, vernetzten und sich kontinuierlich verändernden Wettbewerbsumfeld gerade ein Verharren gefährlich sein kann, wenn man konkurrenzfähig bleiben will.

Gegenwärtig befinden wir uns in einem Käufermarkt, in dem einer geringen Nachfrage ein weitaus größeres Angebot gegenübersteht und sich viele Produkte oft nur noch über das Design und den Preis und nicht mehr über Haupt-Funktionalitäten und Leistungsdaten unterscheiden. Ein Käufermarkt entspricht einem starken Wettbewerb, also analog zu einem hohen Selektionsdruck in der Natur. Um sich am Markt behaupten zu können, müssen Unternehmen innovativ sein und Kundenwünsche sollten schnell und ökonomisch umgesetzt werden.

Ein Blick in die Natur und die Bionik kann hier weiterhelfen. Die Überlebensfähigkeit einer Tier- oder Pflanzenart bestimmt sich nicht durch ihre Größe, Anzahl oder Aggressivität, sondern insbesondere durch die Fähigkeit, sich schnell an sich verändernde Bedingungen anpassen zu können. Ein zukunftsfähiges Unternehmen sollte also in der Lage sein, sich auf verändernde Bedingungen einzustellen und schon frühzeitig ein breites Feld an Lösungsansätzen zu generieren. In der Bionik vereint sich das Ausnutzen des Erfindungsreichtums der belebten Natur mit dem Ansatz, über tagesaktuelle Fragestellungen hinaus zu blicken und im transdisziplinären Dialog Lösungen für zukünftige Fragestellungen zu erarbeiten. Damit stellt die Bionik in Unternehmen ein Werkzeug dar, das sowohl für kleine Verbesserungen wie auch für revolutionäre Produktinnovationen angewendet werden kann.

In der Biologie, wie auch in Unternehmen, wird meist nicht die physikalisch perfekte Lösung favorisiert, sondern die ökonomischste. Ökonomisch bezieht sich in diesem Kontext auf die Ressourcen Zeit, Material und Know-how, die bezüglich des finanziellen Gewinns bewertet werden. Natürlich gibt es auch funktionelle Gründe, wenig Material zu verwenden und Leichtbau zu betreiben. Besonders im Maschinenbau mit einem hohen Materialkostenanteil wird deshalb oft eine Lösung angestrebt, die mit minimalem Materialeinsatz die geforderte Qualität und Leistung erreicht.

In der Praxis werden Leichtbau-Methoden benötigt, die mit möglichst geringem Aufwand verbunden sind. Löst man sich zunächst von einer Fokussierung auf die physikalische Optimallösung, dann bieten sich zahlreiche neue Vorgehensweisen an. Gerade biologische Organismen verwenden sehr robuste und effiziente Strategien, die in die Technik übertragen werden können. Dieses Buch behandelt die Verfahren der Strukturoptimierung, die zu kraftflussgerechten Bauteilen und damit zu Leichtbau-Strukturen führt.



Der **Onlineservice InfoClick** bietet unter [www.vbm-fachbuch.de/infoclick](http://www.vbm-fachbuch.de/infoclick) nach Codeeingabe zusätzliche Informationen und Aktualisierungen zu diesem Buch.

# InfoClick

## In 2 Schritten zum Onlineservice

1. Einfach [www.vbm-fachbuch.de/infoclick](http://www.vbm-fachbuch.de/infoclick) aufrufen.
2. Den unten stehenden Zugangscode in die Suchleiste eingeben und bestätigen.

Sofern Aktualisierungen oder Zusatzinformationen zu Ihrem Buch bereitstehen, werden diese anschließend unterhalb der Eingabemaske aufgeführt.



Ihr persönlicher Zugang  
zum Onlineservice



338104990001

## 2 Leichtbau

Leichtbau ist ein ganzheitliches Konstruktionsprinzip, um Bauteile so zu gestalten, dass sie ihre Anforderungen erfüllen und zusätzlich möglichst leicht sind. Dies ist besonders in Zeiten wichtig, in denen die Material- und Energieressourcen knapper und teurer werden, aber trotzdem vom Markt leistungsfähigere und günstigere Produkte gefordert werden. Nicht benötigtes Material erhöht nicht nur das Gewicht der Struktur, sondern muss bezahlt, bewegt und gepflegt werden, so dass es viele Gründe gibt, nicht oder gering belastete Bereiche zu identifizieren und dann aus der Struktur zu entfernen. Dies gilt vor allem für biologische Strukturen, bei denen durch die Evolution leistungsfähige Leichtbau-Strukturen entstanden sind.

Historisch gewann das Thema Leichtbau mit der Entwicklung von Flugzeugen immer mehr an Bedeutung. Da hier zunächst die Funktion des Fliegens im Vordergrund stand und die Kosten eher nachgeordnet waren, sind die wesentlichen Leichtbau-Grundlagen in der Luftfahrtforschung fundiert bearbeitet und wissenschaftlich untersucht worden. Von der Luftfahrtindustrie ausgehend, wurden dann die gewonnenen Leichtbau-Erkenntnisse zunächst bei Zügen, den Schiffen und schließlich auch im Kfz angewendet. Durch niedrige Energiekosten ist das Leichtbau-Interesse am Ende des letzten Jahrhunderts etwas abgeflacht, jedoch ist mit der aufkommenden E-Mobilität und den Effizienzanstrebungen das Thema Leichtbau aktuell wieder sehr in den Fokus gerückt.

### 2.1 Spannungsfeld Leichtbau

#### 2.1.1 Gründe für Leichtbau

Die wesentlichen Gründe, um Leichtbau anzuwenden, sind:

- **Funktionserfüllung:** Ein zu schweres Flugzeug fliegt nicht.
- **Gesetzliche Vorgaben:** In der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) § 34 werden die zulässige Achslast und das Gesamtgewicht festgelegt.
- **Energieeffizienz:** Leichtere bewegte Massen benötigen weniger Energie.
- **Materialeffizienz:** Es wird weniger Material benötigt und damit entstehen geringere Kosten.

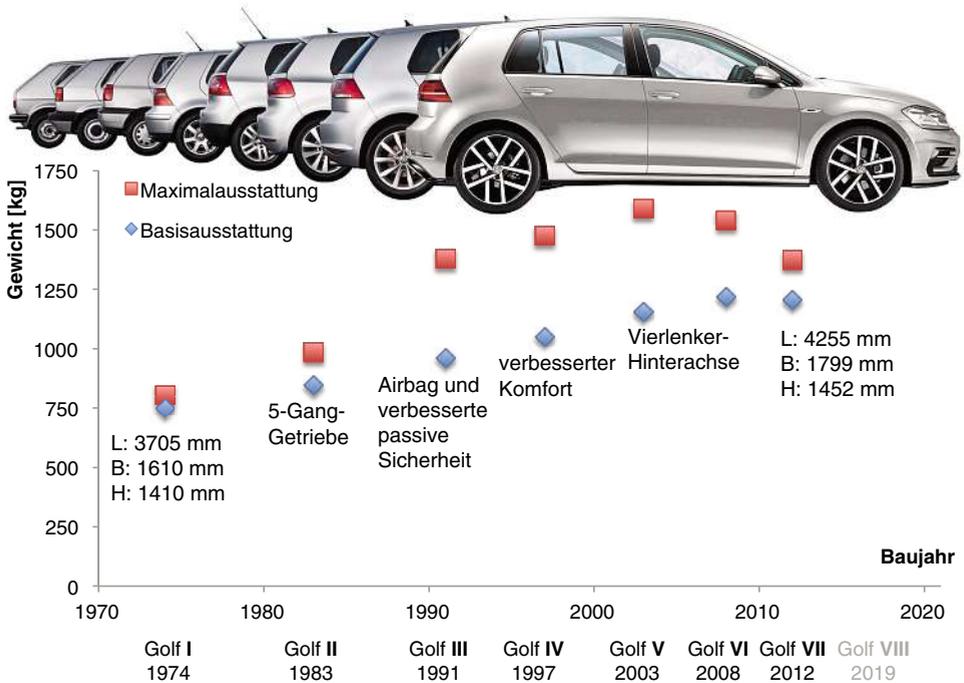
Leichtbau steigert damit die Performance eines Produktes. Ist ein 40-Tonner-Lkw leichter, kann pro Fahrt mehr transportiert werden. Ein leichterer Roboter beschleunigt schneller und kann damit z.B. mehr «Pick and Place»-Aufgaben pro Zeiteinheit durchführen.

Leichtbau muss nicht unbedingt teuer sein. So ist es z.B. bei einem Fahrzeug billiger, anstatt eines Reserverades eine Pumpe und Dichtflüssigkeit beizulegen und dadurch auch das Kfz-Gesamtgewicht zu reduzieren. Neben dem eingesparten Gewicht und den Materialkosten gibt es meist noch weitere positive Effekte. So erhöht sich der Laderaum, wenn das Reserverad ersetzt werden kann. Ganz allgemein vereinfachen leichtere Strukturen das Handling in der Fertigung und im Transport.

#### 2.1.2 Gründe für Gewichtszunahme

Es gibt also gute Gründe dafür, dass Produkte immer leichter werden sollten. Und trotz bestehender Leichtbau-Anstrengungen kann bei vielen Produkten sogar eine Gewichtszunahme beobachtet werden. Exemplarisch wird in Bild 2.1 die Gewichtsentwicklung der Golf-Pkw von Generation I bis VII dargestellt. Erst in der Generation VI sinkt erstmals das Gewicht bei den

Versionen mit Maximalausstattung. In der Basisversion ist das Gewicht erstmals in der Generation VII etwas niedriger als in der Vorgängerversion. Eine tendenzielle Gewichtszunahme lässt sich genauso auch bei anderen Produkten, z.B. Werkzeugmaschinen, beobachten. Dies liegt an den allgemeinen Tendenzen, den Megatrends.



**Bild 2.1** Kfz-Gewichtsentwicklung, exemplarisch an den Versionen des VW Golf dargestellt

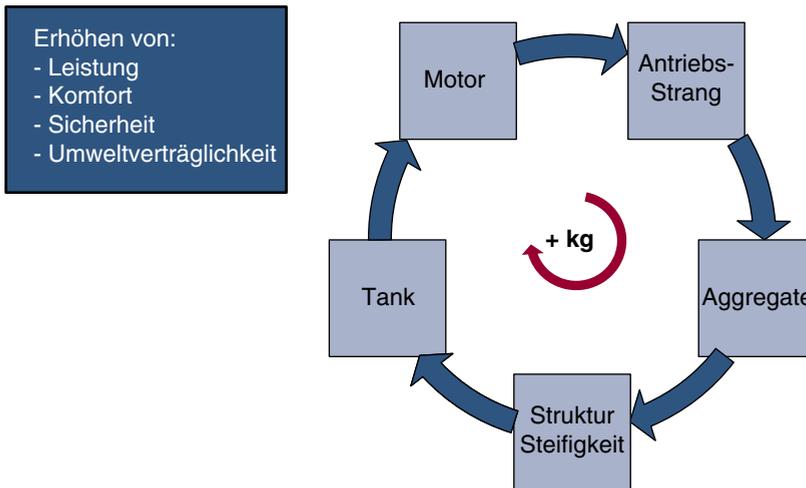
Die Hauptgründe, warum Produkte tendenziell immer schwerer werden, sind die sich ändernden Anforderungen. Dieser Wandel ist in weiten Bereichen der Gesellschaft feststellbar.

- **Sicherheit:** Die Vorgaben des Gesetzgebers und auch die der Hersteller steigen, z.B. Anschnallpflicht, Crashtests mit dem Ziel, sicherster Pkw zu werden.
- **Umweltauflagen:** Auch hier gibt es wieder Anforderungen vom Gesetzgeber und auch herstellereigene Ziele. Katalysatoren müssen eingebaut werden; dies bedeutet ein zusätzliches Gewicht bei gleichzeitigem Leistungsverlust.
- **Komfort:** Neben Entertainmentssystemen und besseren Sitzen sind in Pkw mittlerweile nahezu alle Verstellmöglichkeiten vom Spiegel bis zum Sitz motorisiert. D.h., aktuelle Pkw haben neben dem Antriebsmotor noch über 50 weitere Motoren an Bord, die alle das Gesamtgewicht erhöhen.
- **Leistung:** Auch hier gilt das olympische Motto: schneller, höher weiter.

### Sekundäreffekte und Gewichtsspirale

Produktmodifikationen können das Gesamtgewicht direkt und über Sekundäreffekte zusätzlich auch indirekt beeinflussen. Wenn sich z.B. neben der Heckklappe nun auch alle Türen des Pkws

automatisiert öffnen und schließen lassen, steigt neben der direkten Gewichtszunahme aufgrund der zusätzlichen Motoren das Gewicht noch weiter, da die Motoren befestigt werden müssen, weshalb die Karosserie verändert und verstärkt werden muss. D.h., der Pkw wird schwerer und damit auch träger. Um dies zu kompensieren, wird mehr Leistung benötigt. Ein Motor, der mehr leistet, benötigt ein leistungsfähigeres Getriebe. Dieses ist wiederum schwerer, wodurch das Gesamtgewicht weiter steigt (Bild 2.2). Damit ist eine negative Gewichtsspirale in Gang gesetzt, da das Gesamtgewicht nicht als Summe separater Einzelposten, sondern als Systemeigenschaft betrachtet werden muss.



**Bild 2.2** Gewichtsspirale mit Sekundäreffekten. Wird eine Komponente verändert, zieht dies weitere Anpassungen nach sich.

### 2.1.3 Drei Leichtbau-Leitlinien

Leichtbau-Leitlinien helfen bei der Entscheidung, ob eine Leichtbau-Maßnahme umgesetzt werden sollte oder ob sie nicht sinnvoll ist. Ganz entscheidend sind aktuell die Kosten, außer eine Muss-Anforderung wird nicht eingehalten, wie z.B. ein vertraglich festgelegtes Gesamtgewicht. Ein anderer Grund sind signifikante wirtschaftliche Vorteile, wie z.B. die Führerscheinklasse B, die 1999 für die Klasse 3 eingeführt wurde; sie erlaubt nur noch das Führen von Fahrzeugen bis 3,5 t anstatt 7 t. D.h., Wohnmobile müssen unter 3,5 t wiegen, um einen möglichst großen Kundenkreis anzusprechen. Somit sind Leichtbau-Maßnahmen immer dann sinnvoll, wenn sich ein wirtschaftlicher Vorteil ergibt.

Positive Gewichts- und Kostenvorteile sind oft nicht direkt auf der Bauteilebene, sondern erst auf Systemebene feststellbar. Ein technisches Beispiel sind adaptive Flügелеlemente bei Flugzeugen. Diese morphende Flügelkante ist mit ihrer kompletten Aktuatorik deutlich schwerer als ein starrer Flügel, aber durch den reduzierten Luftwiderstand wird weniger Treibstoff benötigt. Das führt zu niedrigeren Betriebskosten und auch einem geringeren Gesamtabfluggewicht als bei einem vergleichbaren Flugzeug mit starren Flügeln. Ein biologisches Beispiel sind die Muskeln der Vögel. Die meisten Lebewesen zerkleinern die Nahrung im Mund und mit dem Speichel startet auch schon dort die Verdauung. Im Unterschied dazu findet bei Vögeln die Zerkleinerung und Verdauung der Nahrung erst im Magen statt, der dafür spezielle Muskelzellen besitzt. Dieser

Muskelmagen ist damit schwerer als ein normaler Magen, jedoch spart sich der Vogel dadurch Zähne, Kiefer und Kaumuskel. In der Gesamtmassenbilanz ist der Vogel damit leichter und konnte zusätzlich das Gewicht näher zum Schwerpunkt bringen, was das Flugverhalten verbessert. Deshalb sollten Leichtbau-Maßnahmen hinsichtlich Kosten und Gewicht immer auf Systemebene und nicht auf Bauteilebene verglichen werden.

Jede Veränderung hat zwei Seiten. Beispielsweise sind Pinguine für das Tauchen optimierte Vögel und damit Tauchspezialisten, die dafür aber nicht mehr fliegen können. Jede Anpassung und Optimierung ist damit auch immer eine Spezialisierung.

### MERKSATZ

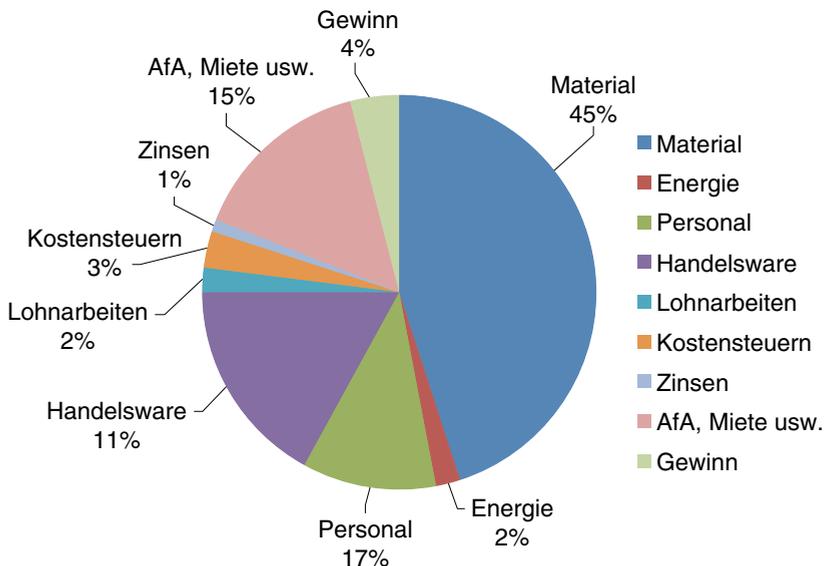
Die drei Leichtbau-Leitlinien helfen zu entscheiden, ob Leichtbau-Maßnahmen umgesetzt werden sollen:

1. Leichtbau-Leitlinie: Leichtbau nur bei ökonomischem Vorteil, kein Selbstzweck.
2. Leichtbau-Leitlinie: Immer Vollkosten statt Einzelkosten vergleichen.
3. Leichtbau-Leitlinie: Jede Optimierung ist eine Spezialisierung.

## 2.2 Kosten

### 2.2.1 Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe

Kosten sind ganz entscheidend – deshalb lohnt es sich, die Kostenstruktur des verarbeitenden Gewerbes anzuschauen. Die Informationen hierzu sind über destatis [18] offen zugänglich und die Daten in Bild 2.3 beziehen sich auf das Jahr 2013. An erster Stelle stehen mit 45% die Materialkosten, gefolgt von den Personalkosten mit 17% der Gesamtkosten. Somit stellen die Materialkosten den größten Kostenblock im produzierenden Gewerbe dar.



**Bild 2.3** Darstellung der Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe

## 2.2.2 Zusammenhang von Gewicht zu Kosten eines Produktes

Nach dem Blick auf die Kostenstruktur des verarbeitenden Gewerbes werden nun die Kosten in Abhängigkeit vom Leichtbaugrad eines Produktes betrachtet. Mit einer gewissen Abstraktion setzen sich die Gesamtkosten aus den Hauptkostenblöcken Material, Fertigung und Engineering zusammen. Die Gesamtkosten zeigen, wie in Bild 2.4 dargestellt, einen «L-förmigen» Verlauf mit einem theoretischen Minimum als preiswerteste Umsetzung [44, S. 3]. Je nach unternehmens-internen und externen Randbedingungen kann diese konstruktive Lösung unterschiedlich ausfallen. Soll das Bauteil leichter als die preiswerteste Lösung werden, muss die Fertigung, das Engineering oder die Materialwahl überarbeitet werden. Kann beispielsweise das Werkstück genauer gefertigt werden, können andere Strukturen konstruiert und mit geringeren Toleranzen umgesetzt werden, wodurch der Materialbedarf sinkt. Das Bauteil wird leichter und die Materialkosten sinken etwas, aber da die Investitionen der leistungsfähigeren Fertigungsanlage umgelegt werden, wird das Produkt meist teurer.

Wird mehr Material verwendet als nötig, spricht man von Schwerbau – wenn z.B. noch alte, aber konservative Annahmen verwendet werden –, oder es wird anstatt eines benötigten 2,5-mm-Blechtes ein 4-mm-Blech verwendet, da dies gerade im Lager vorrätig war und damit das Bauteil überdimensioniert wird. Oft sind eine realistischere Auslegung und eine entsprechende Fertigung nicht teurer, es wird aber Material gespart, wodurch die Gesamtkosten sinken.

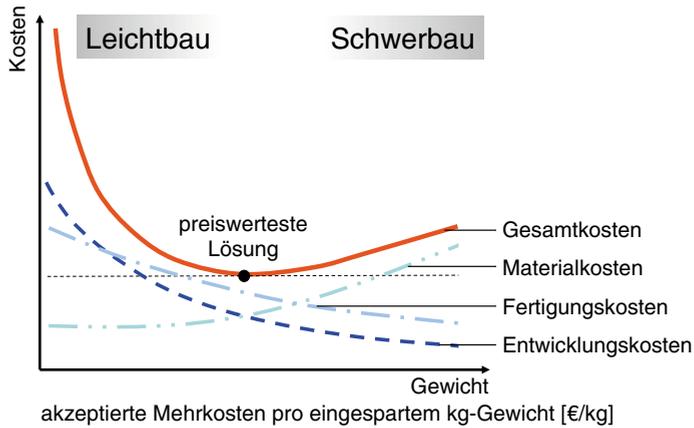
Gewichtsreduktionen durch Leichtbau-Maßnahmen werden je nach Branche unterschiedlich bewertet, was anhand der akzeptierten Mehrkosten pro eingespartem Kilogramm Gewicht ersichtlich wird. Dieser Wert entspricht den wirtschaftlichen Vorteilen des gesamten Produktlebenszyklus – wie ein geringerer Kraftstoffverbrauch oder ein durch eine Performancesteigerung gerechtfertigter höherer Verkaufspreis. Als Richtwert entspricht ein eingespartes Kilogramm Gewicht in der Raumfahrt 5000 €, in der Luftfahrt sind es noch 500 € und im Schienenverkehr 50 €. Bei dem klassischen Kfz wird ein eingespartes Kilogramm Gewicht gerade mit 7 € bewertet, was auch ein Grund dafür ist, warum die Fahrzeuggewichte tendenziell eher zunehmen. Bei der Elektromobilität wird die Reichweite besonders über die eingebauten Akkumulatoren limitiert, die selber sehr schwer sind. Hier wirkt sich auch über die Sekundäreffekte ein Gewichtssparen sehr positiv auf die Reichweite aus, weshalb ein eingespartes Kilogramm hier 15 € wert ist. Diese Richtwerte [44, S. 9; 26, S. 50] sind ein erster Anhaltspunkt, um zu entscheiden, ob eine Leichtbau-Maßnahme zielführend ist.

Außerhalb dieser Richtwerte für Investitionsgüter werden für Konsumgüter Unsummen schon für marginale Gewichtsvorteile gezahlt. Besonders im Sport und Hobbybereich spielt neben dem reinen Gewichtsvorteil auch das Image eine große Rolle. Ganz dem Motto «Karbon statt Kondition» folgend, werden im Hobbysportbereich immer mehr Bauteile aus karbonfaserverstärktem Kunststoff hergestellt.

### MERKSATZ

Leichtbau kann die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit eines Bauteils deutlich erhöhen; trotzdem sollten Leichtbau-Maßnahmen nicht alleine wegen des Selbstzwecks umgesetzt werden.





**Bild 2.4** Zusammenhang von Gewicht und Kosten für Leichtbau im Vergleich zu Schwerbau und akzeptierte Mehrkosten pro eingespartem Gewicht (nach [43, S. 4])

## 2.3 Leichtbau-Begriffe

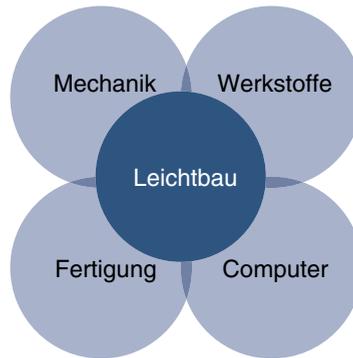
Der Leichtbau ist eine Ingenieurwissenschaft, die interdisziplinär die Erkenntnisse der Technischen Mechanik, der Werkstoffkunde und der Fertigungstechnik verwendet und von den Möglichkeiten leistungsfähiger Computer profitiert (Bild 2.5) [44, S. 2].

- Die Technische Mechanik besitzt als alte Wissenschaftsdisziplin fundierte analytische Modelle zur Beschreibung mechanischer Vorgänge. Historisch konnten damit vorwiegend rein akademische Beispiele oder einfache Demonstratoren, wie ein Kranhaken, händisch berechnet werden. Auf dieses vorhandene Wissen kann aufgebaut werden und dank der leistungsfähigen Computer kann es nun auch industriell genutzt werden.
- Viele neuentwickelte Werkstoffe mit neuen Eigenschaften können prozesssicher verarbeitet werden und ermöglichen so neuartige Anwendungen. So ist eine der ersten Entscheidungen heutzutage, welcher Werkstoff verwendet werden soll, da diese Entscheidung maßgeblich das Design beeinflusst.
- Die Fertigung erlaubt heute ein Design mit sehr geringen Fertigungsrestriktionen, z.B. öffnet die Additive Fertigung neue Handlungsfelder und wird z.B. in der Luftfahrt schon eingesetzt.
- Erst durch leistungsfähige Computer können die theoretischen Grundlagen auf beliebige Leichtbauteile angewendet werden. Angefangen bei den Mehrkörper-Simulationen zur Ermittlung der Lasten bis zur Fatigue-Auslegung kann nun mit präziseren Modellen gerechnet werden, wodurch kleinere Unsicherheitsfaktoren verwendet werden können.



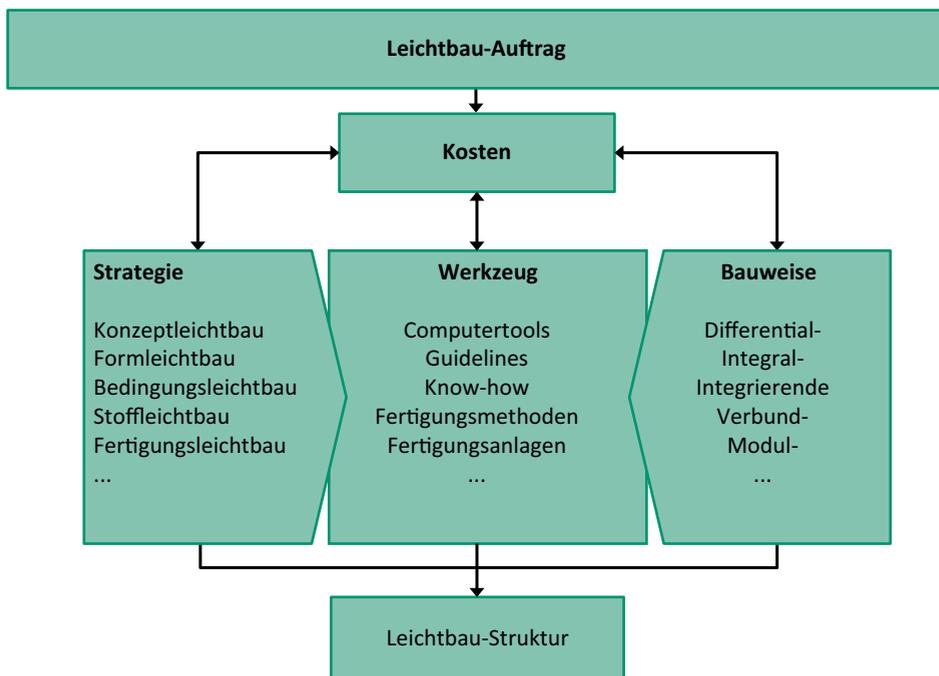
### TIPP

Siehe dazu auch Buchtitel KLAHN / MEBOLDT, *Entwicklung und Konstruktion für die Additive Fertigung* [42]



**Bild 2.5** Leichtbau ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Mechanik, Werkstoffkunde, Fertigungstechnik und leistungsfähigen Rechnern

Vom Auftrag zum fertigen Produkt können unterschiedlichste Vorgehensweisen sinnvoll sein. In der Literatur werden diese Wege nicht einheitlich bezeichnet, aber sie können in drei Gruppen eingeteilt werden: gewählte Strategie, verwendetes Werkzeug und erhaltenes Konzept. Diese stehen in Interaktion (Bild 2.6) und können in der Reihenfolge a) Strategie, b) Werkzeug und c) Konzept ablaufen oder in einer anderen beliebigen Reihenfolge. Entscheidend sind die Kosten, da die Leichtbau-Struktur besonders gut bei wirtschaftlichem Vorteil umsetzbar ist. Die verschiedenen Leichtbau-Strategien, Tools und Konzepte sind in der Regel nicht so linear wie in Bild 2.6 dargestellt und beeinflussen sich untereinander. So können durch neue Materialien andere Fertigungsverfahren verwendet werden, wodurch sich eine leichtere Bauweise realisieren



**Bild 2.6** Überblick und Einordnung der Leichtbau-Strategien, -Werkzeuge, -Bauweisen

lässt. So ermöglichen z.B. neue Gussmaterialien eine dünnwandige Gussgestaltung, wodurch anstatt einer konventionellen Blechbauweise mit den Fügeflanschen eine schlanke organische Form gegossen werden kann. Oder in der Additiven Fertigung eröffnen die geringen Fertigungsrestriktionen neue Gestaltungsmöglichkeiten, wodurch nun hochintegrierte, komplexe Formen hergestellt werden können.

### 2.3.1 Leichtbau-Strategien

Die Leichtbau-Strategie beschreibt den Weg, wie das Leichtbauziel erreicht werden soll bzw. welcher Bauteilaspekt verändert wird.

- **Konzept-, System- oder Funktionsleichtbau:** Die Wahl des Konzeptes bestimmt maßgeblich die Produkteigenschaften und damit auch das Gewicht. Ein Teilsystem wird z.B. durch Funktionsintegration schwerer, dafür kann aber ein anderes Teilsystem weggelassen werden, wodurch das Gesamtsystem leichter wird.
- **Formleichtbau oder konstruktiver Leichtbau:** Leichtbau-Maßnahmen, die mit mechanischen Erkenntnissen gewonnen werden, verändern die Form eines Bauteils, weshalb diese Leichtbau-Strategie als Formleichtbau bezeichnet wird. Also Leichtbau-Ersparnis durch kraftflussgerecht gestaltete Bauteile.
- **Bedingungsleichtbau:** Die Einflussfaktoren, die auf Bauteil wirken, werden genau analysiert und mit dieser Erkenntnis wird das Bauteil dann gestaltet, z.B. unterschiedliche Crash-Anforderungen in den USA, Europa und China.
- **Stoffleichtbau:** Der verwendete Werkstoff wird durch einen Werkstoff mit besseren spezifischen Eigenschaften substituiert. Dies ist meist mit einer Geometrieänderung verbunden. Wenn z.B. Stahl durch leichtere Werkstoffe wie Aluminium oder Kunststoff ersetzt wird, werden bei gleichen mechanischen Anforderungen die Wandstärken dicker. Oder der verwendete Stahl wird durch einen hochfesten Stahl ausgetauscht, wodurch bei gleichen mechanischen Anforderungen die Wandstärken dünner ausgeführt werden können. Die Wandstärken können auch dann dünner gestaltet werden, wenn ein Material mit einer geringeren Qualitätsstreuung verwendet wird.
- **Fertigungsleichtbau:** Alle Leichtbau-Maßnahmen, die bei der Herstellung, Fertigung und Montage durchgeführt werden können, werden als Fertigungsleichtbau bezeichnet. Eine Drehmaschine mit geringerer Fertigungstoleranz z.B. benötigt weniger Sicherheiten, weshalb die Struktur mit dünneren Wandstärken ausgelegt werden kann. Neue Verbindungstechniken, vor allem Kleben, Laserstrahlschweißen und Reibrührschweißen erschließen ein großes Leichtbau-Potenzial, da nun doppelte Wandstärken an der Verbindung und die Verbindungsmittel wie Schrauben und Nieten gespart werden können. Des Weiteren führen Nieten und Schrauben zu Spannungskonzentrationen und zusätzlichen Kerbspannungen, die bei alternativen Verfahren nicht mehr berücksichtigt werden müssen.
- **Weitere Strategien:** Neben den hier vorgestellten Leichtbau-Strategien gibt es noch weitere Vorgehensweisen, wie Sparleichtbau und viele mehr.

### 2.3.2 Leichtbau-Werkzeuge

Werkzeuge, mit denen das Leichtbauziel erreicht werden kann, sind klassische Computertools wie die FEM-Programme, bessere Fertigungsmethoden und Maschinen, aber auch Know-how. Hierbei sind einerseits das im Betrieb akkumulierte Wissen und die gesammelte Erfahrung, aber

natürlich auch das persönliche Know-how des Ingenieurs zu nennen. Auf die konstruktiven Werkzeuge, wie CAD-Programme und Computertools, wird in Abschnitt 5.3 detaillierter eingegangen. Die positiven Eigenschaften neuer Fertigungsmethoden und bessere Fertigungsmaschinen wurden schon bei dem Fertigungsleichtbau vorgestellt.

### 2.3.3 Leichtbau-Bauweisen

Die so erhaltenen Leichtbau-Strukturen lassen sich wieder in verschiedene Bauweisen einteilen. Als generelle Bauweisen kann zwischen der Differential- und der Integralbauweise unterschieden werden. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es noch Zwischenstufen, die jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen [17, S. 41; 36, S. 70; 44, S. 17].

Die Differentialbauweise ist eine klassische Vorgehensweise, die das Prinzip **Trennung der Funktionen (TdF)** verfolgt. Die Struktur wird aus mehreren Einzelteilen additiv zusammengesetzt, die jeweils nur eine maßgebliche Funktion erfüllen. Dies sind einfache Einzelteile und Halbzeuge, die i. d. R. durch Kraftschluss (Schrauben, Nieten) oder Stoffschluss (Kleben, Schweißen) zusammengesetzt werden.

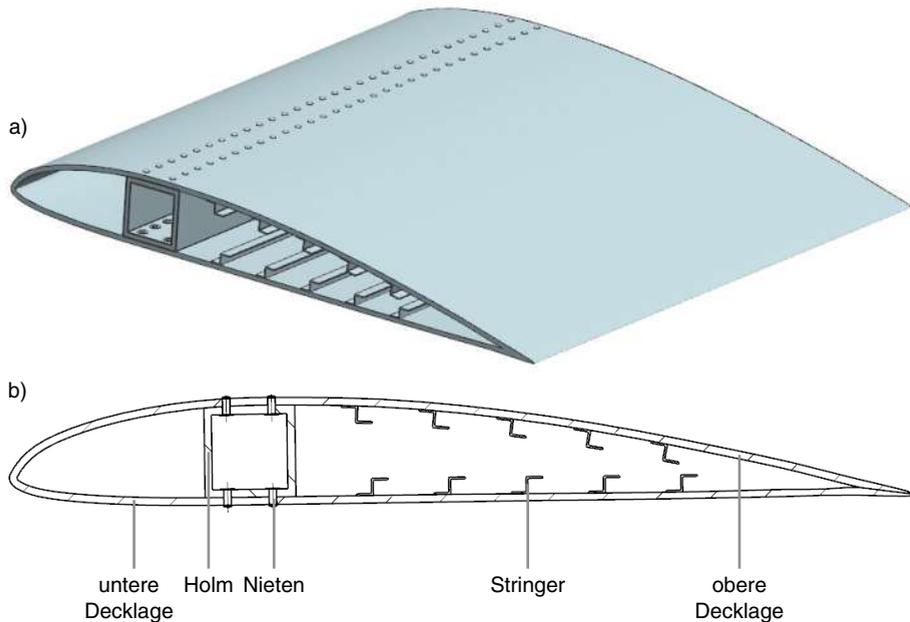
Vor- und Nachteile der Differentialbauweise:

- + Jedes Einzelteil kann auf seine Funktion ausgelegt werden
- + Verschiedene Werkstoffe sind kombinierbar
- + Halbzeuge können verwendet werden, was zu geringeren Kosten führt
- + Fail-Safe-Philosophie: Ein Riss kann sich nicht durch das ganze Bauteil fortpflanzen, die Halbzeuge dienen als Rissstopper
- + Reparaturfähig, einzelne schadhafte Einzelteile können gut getauscht werden
- + Rezyklierbarkeit, was vom Gesetzgeber zunehmend auch immer stärker gefordert wird
- o Fügestellen wirken als Dämpfer
- Verbindungen sind kritische Bereiche: a) zusätzliche Kerbspannungen durch Bohrungen für Schrauben bzw. Nieten, b) die Spalte an den Fügestellen können zu Korrosion und Quellung führen
- Erhöhter Materialaufwand durch Überlappungen, Fügeflansche, Schrauben und Nieten, was mehr Gewicht bedeutet
- Erhöhter Montageaufwand

[36, S. 70; 44, S. 17]

In Bild 2.7 ist als Beispiel für die Differentialbauweise ein Rotorblatt dargestellt. Es setzt sich aus den Einzelteilen obere und untere Decklage, Holm und den Stringern zusammen und ist mittels verschiedener Verbindungslösungen realisiert worden. So ist der Holm mittels Nieten an den Decklagen befestigt, während die Stringer angeklebt sind.

Die Integralbauweise ist eine moderne Konstruktions-Vorgehensweise, die das Prinzip der Funktionsintegration und Einstückigkeit verfolgt (Bild 2.8). Durch das Wegfallen von Fügestellen und der Integration von Funktionen führt diese Bauweise zu sehr spezialisierten und leichten Bauteilen. Paradebeispiel für die Integralbauweise sind biologische Strukturen, die zusätzlich meist hochgradig multifunktional aufgebaut sind – wie ein Insektenbein –, in die Sensoren, Aktoren und Stützfunktionen integriert sind. Bei technischen Strukturen kann die Herstellung z.B. als einstückige Strangpresslösung, subtraktiv aus dem «Vollen» gefräst oder mittels Faserverbundwerkstoffe erfolgen.

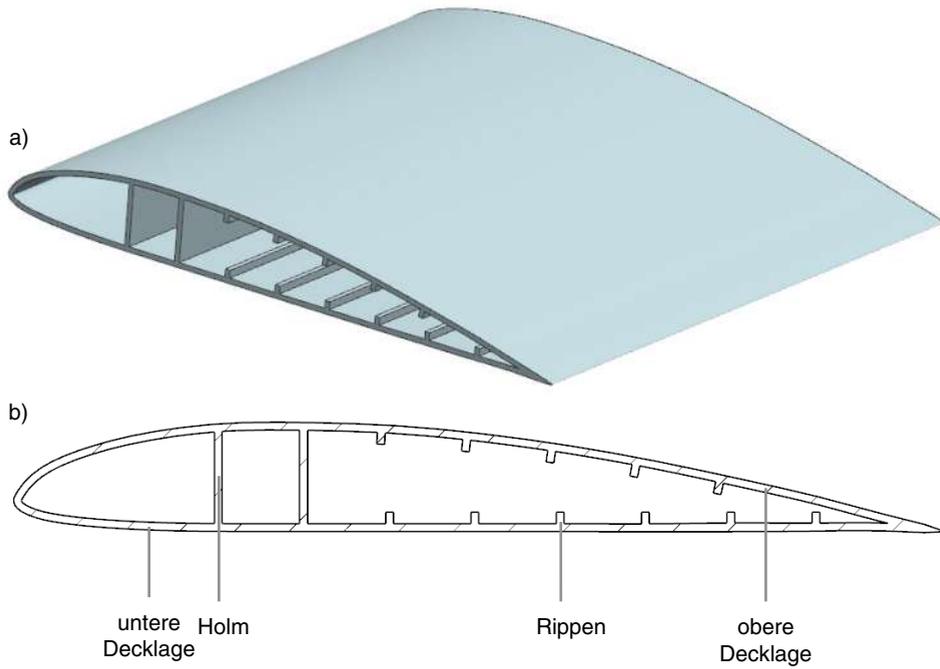


**Bild 2.7** Differentialbauweise eines Rotorblattes  
a) 3D-Darstellung, b) Querschnittszeichnung

Vor- und Nachteile der Integralbauweise:

- + Minimales Gewicht
- + Geringer Montageaufwand
- + Keine Verbindungsstellen, was bei Korrosion, Hygiene und Dichtheit vorteilhaft ist
- 0 Geringe Strukturdämpfung
- Meist nur gleichartiger Materialeinsatz
- Keine Verwendung von Halbzeugen und damit Spezialwerkzeuge nötig, was zusätzliche Kosten verursacht
- Nicht schadenstolerant: Riss kann sich durch das ganze Bauteil fortpflanzen
- Aufwendige Reparatur
- Rezyklierbarkeit, was vom Gesetzgeber zunehmend auch immer stärker gefordert wird

Zwischen diesen beiden Extrembauweisen gibt es noch Zwischenbauweisen, wie Hybridbauweise, Verbundbauweise, integrierende Bauweise, Modulbauweise und weitere. Die Modulbauweise ist dadurch charakterisiert, dass einzelne Module mit wenigen Schnittstellen zu anderen Modulen jeweils separat gebaut werden können und anschließend nur noch zusammengesetzt werden müssen. Bei komplexen Systemen ist es sinnvoll, diese in kleinere Subsysteme zu gliedern und sie dann mit möglichst wenigen Schnittstellen zu verbinden [36, S. 71].



**Bild 2.8** Integralbauweise eines Rotorblattes  
a) 3D-Darstellung, b) Querschnittszeichnung