

---

# Leichtbaukonzepte anhand einfacher Strukturelemente

---

Andreas Öchsner

# Leichtbaukonzepte anhand einfacher Strukturelemente

Neuer didaktischer Ansatz mit zahlreichen  
Übungsaufgaben

Andreas Öchsner  
Esslingen University of Applied Sciences  
Esslingen am Neckar, Baden-Württemberg  
Deutschland

ISBN 978-3-662-58505-4      ISBN 978-3-662-58506-1 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58506-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Leichtbaukonzepte können als Anwendung klassischer Ingenieurkonzepte und Disziplinen zur Reduzierung des Strukturgewichts verstanden werden. Hierbei kommen insbesondere Grundkenntnisse aus der technischen Mechanik, der Werkstoffkunde, der Fertigungstechnologie als auch der Konstruktionslehre zum Einsatz. Neben klassischen Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie oder im Automobilbau erstrecken sich diese heutzutage auch auf recht unterschiedliche Bereiche, wie zum Beispiel auf Sportgeräte oder medizinische Prothesen. Aufgrund des reduzierten Gewichts kann im Transportwesen eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und somit auch eine Reduzierung von Schadstoffen erzielt werden. Damit ergeben sich ökonomische wie auch ökologische Vorteile.

In der Ingenieurpraxis werden jedoch in der Regel recht komplexe Systeme, auch unter der Verwendung kommerzieller Programmpakete, optimiert. Zur Einführung der unterschiedlichen Leichtbaukonzepte im Rahmen eines Hochschulingenieurstudiums kann jedoch auch zuerst auf einfache Strukturelemente, die im Rahmen der technischen Mechanik vorgestellt werden, zurückgegriffen werden. Die einfachsten Elemente sind hierbei Stäbe und Balken, die neben Federn den eindimensionalen Strukturelementen zugerechnet werden. Anhand dieser Elemente können recht anschaulich Fragestellungen zur Werkstoffauswahl und der geometrischen Gestaltung und Optimierung von lasttragenden Strukturen diskutiert werden. Somit bietet dieses Lehrbuch eine einfache und umfassende „Anleitung“ zur Anwendung der unterschiedlichen Leichtbaukonzepte, wobei der Schwerpunkt auf dem Stoff- und Formleichtbau, beziehungsweise der Kombination dieser beiden Konzepte, liegt. Angemerkt sei hier, dass zum gleichen Thema auch eine kompakte Darstellung als *essential* zur Verfügung steht, siehe Öchsner (2018).

Wird im Rahmen einer Leichtbauvorlesung auf die klassischen eindimensionalen Strukturelemente zurückgegriffen, werden die Grundlagen der technischen Mechanik weiter gefestigt und ein Beitrag zur vertikalen Integration des Ingenieurwissens geleistet.

November 2018

Andreas Öchsner

---

## **Literatur**

1. Öchsner A (2018) Leichtbaukonzepte: Eine Einführung anhand einfacher Strukturelemente für Studierende. Springer, Wiesbaden

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung und Motivation</b> .....	1
Literatur .....	3
<b>2 Grundlagen der Festigkeitslehre</b> .....	5
2.1 Stab: Zug-, Druck- und Torsionsbelastung .....	5
2.2 Biegebalken .....	8
2.2.1 Theorie nach Euler-Bernoulli .....	8
2.2.2 Theorie nach Timoshenko .....	11
2.2.3 Theorie nach Levinson .....	15
2.3 Vergleichsspannungshypothesen .....	18
2.4 Übungsaufgaben .....	21
Literatur .....	24
<b>3 Stoffleichtbau</b> .....	25
3.1 Problemstellung .....	25
3.2 Abschätzung mittels Leichtbaukennzahl .....	27
3.3 Abschätzung mittels spezifischer Energieabsorption .....	40
3.4 Übungsaufgaben .....	50
Literatur .....	52
<b>4 Formleichtbau</b> .....	55
4.1 Abschätzung mittels Leichtbaukennzahl .....	55
4.2 Abschätzung mittels spezifischer Energieabsorption .....	65
4.3 Übungsaufgaben .....	66
Literatur .....	70
<b>5 Stoff- und Formleichtbau: Grundlagen von Sandwichelementen</b> .....	71
5.1 Einführende Bemerkungen .....	71
5.2 Biegebeanspruchung .....	72
5.3 Zug-/Druckbeanspruchung .....	75
5.4 Schubbeanspruchung .....	76

5.5	Technischer Sandwich . . . . .	78
5.5.1	Biegebeanspruchung . . . . .	79
5.5.2	Zug-/Druckbeanspruchung. . . . .	90
5.5.3	Schubbeanspruchung . . . . .	91
5.5.4	Biegung von Sandwichbalken . . . . .	94
5.6	Übungsaufgaben. . . . .	102
	Literatur. . . . .	105
<b>6</b>	<b>Stoff- und Formleichtbau: Grenzbeanspruchung und Optimierung von Sandwichelementen . . . . .</b>	<b>107</b>
6.1	Grenzbeanspruchung . . . . .	107
6.1.1	Globales Instabilitätsversagen . . . . .	108
6.1.2	Schubversagen der Verbindungsschicht. . . . .	113
6.1.3	Lokales Knittern der Druckdeckschicht (Biegelastfall). . . . .	115
6.1.4	Lokales antisymmetrisches Knittern beider Deckschichten (Drucklastfall) . . . . .	117
6.1.5	Lokales symmetrisches Knittern beider Deckschichten (Drucklastfall) . . . . .	124
6.2	Optimaldimensionierung von Sandwichbalken . . . . .	129
6.2.1	Zug- oder Druckbelastung . . . . .	129
6.2.2	Biegebelastung. . . . .	136
6.3	Übungsaufgaben. . . . .	143
	Literatur. . . . .	152
<b>7</b>	<b>Weitere Leichtbaukonzepte und Berechnungsmethoden . . . . .</b>	<b>153</b>
	Literatur. . . . .	157
<b>8</b>	<b>Kurzlösungen zu den Übungsaufgaben. . . . .</b>	<b>159</b>
8.1	Kapitel 2. . . . .	159
8.2	Kapitel 3. . . . .	165
8.3	Kapitel 4. . . . .	169
8.4	Kapitel 5. . . . .	179
8.5	Kapitel 6. . . . .	183
	Literatur. . . . .	202
	<b>Anhang A: Mechanik und Mathematik . . . . .</b>	<b>203</b>
	<b>Anhang B: Computerprogramme . . . . .</b>	<b>213</b>
	<b>Sachverzeichnis. . . . .</b>	<b>223</b>

---

## Über den Autor

**Professor Dr.-Ing. Andreas Öchsner, D.Sc.**

Leichtbau/Struktursimulation

Hochschule Esslingen

University of Applied Sciences

Fakultät Maschinenbau

Deutschland

E-Mail: [andreas.oechsner@gmail.com](mailto:andreas.oechsner@gmail.com)

url: <https://scholar.google.com/citations?user=-jQHnjUAAAAJ&hl=en>



---

# Formelzeichen und Abkürzungen

In den folgenden Aufstellungen sind die wichtigsten Formelzeichen und Abkürzungen erläutert, die im Verlaufe des vorliegenden Buches Verwendung finden.

## **Lateinische Formelzeichen** (Großbuchstaben)

$A$	Fläche, Querschnittsfläche
$A_s$	Schubfläche
$AG$	Schubsteifigkeit
$B_1$	Faktor
$B'_1$	Faktor
$C$	Konstante
$E$	Elastizitätsmodul
$\overline{EA}$	mittlere Dehnsteifigkeit
$\overline{EI}_y$	mittlere Biegesteifigkeit
$F$	Kraft, Vergleichsspannungshypothese
$F_G$	Gewichtskraft
$F_K$	kritische Kraft (Knickkraft)
$G$	Schubmodul
$I$	axiales Flächenmoment 2. Ordnung
$I_p$	polares Flächenmoment 2. Ordnung
$L$	Länge
$M$	Leichtbaukennzahl, Moment
$N$	Normalkraft
$Q$	Querkraft
$R_{p0,2}$	0,2-%-Dehngrenze
$SEA$	spezifische Energieabsorption
$V$	Volumen

**Lateinische Formelzeichen** (Kleinbuchstaben)

$a$	geometrische Abmessung
$b$	geometrische Abmessung
$c$	Dämpferkonstante, Integrationskonstante
$d$	Durchmesser
$f$	Funktion
$g$	Erdbeschleunigung, Funktion
$h$	geometrische Abmessung
$h_c$	mittlere Sandwichdicke
$\Delta h$	Schichtdicke (Sandwich)
$\Delta h^D$	Deckschichtdicke (Sandwich)
$\Delta h^{D,n}$	längenspezifische Deckschichtdicke (Sandwich)
$\Delta h^K$	Kerndicke (Sandwich)
$\Delta h^{K,n}$	längenspezifische Kerndicke (Sandwich)
$k_s$	Federsteifigkeit, Geometrie- und Stoffparameter, Schubfließgrenze, Schubkorrekturfaktor
$k_t$	Zugfließgrenze
$k_t^{\text{init}}$	Anfangsfließgrenze auf Zug
$m$	Masse, längenspezifisches Moment
$m^n$	längenbezogene Masse
$p$	Streckenlast in $x$ -Richtung
$q$	Streckenlast in $z$ -Richtung
$r$	Radius
$s$	geometrische Abmessung
$t$	geometrische Abmessung
$u$	Verschiebung
$w$	geometrische Abmessung
$x$	räumliche Koordinate
$y$	räumliche Koordinate
$z$	räumliche Koordinate

**Griechische Formelzeichen** (Großbuchstabe)

$\Theta$	Argument ( $\Theta = \frac{2\pi \Delta h^K}{\lambda}$ )
$\Pi$	Verzerrungs- oder Formänderungsenergie

**Griechische Formelzeichen** (Kleinbuchstabe)

$\alpha$	Faktor, Winkel
$\varepsilon$	Verzerrung
$\gamma$	Gleitwinkel
$\gamma_{aB}$	Bruchgleitung

$\varepsilon$	Verzerrung
$\varepsilon_A$	Bruchdehnung
$\varepsilon_{A_t}$	totale Bruchdehnung (inkl. elast. Anteil)
$\varepsilon_{p0,2t}$	0,2-%-Dehngrenze (korrespondierend zu $R_{p0,2}$ )
$\kappa$	Krümmung
$\lambda$	Faktor, Wellenlänge
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\rho$	Dichte
$\pi$	volumenspezifische Verzerrungsenergie
$\pi^{el}$	elastischer Anteil der volumenspezifischen Verzerrungsenergie
$\pi^{pl}$	plastischer Anteil der volumenspezifischen Verzerrungsenergie
$\pi^s$	spezifische Gestaltänderungsenergie
$\pi^o$	spezifische Volumenänderungsenergie
$\sigma$	Spannung, Normalspannung
$\sigma_{cr}$	kritische Spannung
$\sigma_{eff}$	Vergleichsspannung
$\sigma_i$	Hauptspannung ( $i = 1, 2, 3$ )
$\tau$	Schubspannung
$\tau_{aB}$	Zugscherfestigkeit
$\tau_p$	Scherfließgrenze
$\phi$	Drehwinkel, Verdrehung, Torsionswinkel
$\varphi_F$	Faservolumenanteil
$\varphi$	Drehwinkel, Verdrehung

### Mathematische Symbole

× Multiplikationszeichen

### Indizes, hochgestellt

... <sup>D</sup>	Deckschicht
... <sup>E</sup>	Euler
... <sup>el</sup>	elastisch
... <sup>K</sup>	Kern
... <sup>pl</sup>	plastisch

**Indizes, tiefgestellt**

...a	außen
...b	Biegung
...D	Deckschicht
...i	innen
...K	Kern
...m	Mittelwert
...max	Maximalwert
...ref	Referenz
...s	Schub
...t	Torsion, Zug
...c	Zentrum

**Abkürzungen**

1D	eindimensional
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
UD	unidirektional