



## Vorwort

Gerhard Hoenow, Thomas Meißner

Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau

Bauteile - Baugruppen - Maschinen

ISBN: 978-3-446-42214-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42214-8>

sowie im Buchhandel.

# Vorwort

Dieses Buch entstand aus dem wesentlichen Inhalt der langjährigen Lehrveranstaltung *Gestaltungslehre* für Maschinenbaustudenten der TU Dresden. An der seit 1991 bestehenden Fachhochschule Lausitz in Senftenberg – Land Brandenburg – wurde diese Gestaltungslehre mit der Berufung von Herrn Prof. Dr. *Meißner* seit 1994 in wesentlichen Teilen auch zum Inhalt der Lehre für die Grundlagen der Konstruktion. Hauptanliegen des Buches ist es, insbesondere den künftigen Konstrukteuren des Maschinenbaus und natürlich auch allen anderen Studierenden auf dem Gebiet des Maschinenbaus eine praxisingerechte Gestaltungslehre zu vermitteln und damit eine Lücke zu schließen. Diese Lücke besteht darin, dass der hier behandelte Inhalt in der Maschinenelementeliteratur meist nur fragmentarisch enthalten ist, andererseits in der fertigungstechnischen Literatur vorrangig aus der Blickrichtung des Fertigungstechnikers dargestellt und damit den Bedürfnissen der Konstrukteure weniger angemessen ist. Die beiden Schwerpunkte des Buches stellen erstens das Gestalten unter Berücksichtigung der auf die Maschinenteile wirkenden Kräfte dar (Abschnitt 3) und zweitens das fertigungsgerechte Gestalten von der Teilefertigung (Abschnitt 4) bis zum Fügen und zur Baugruppenmontage (Abschnitt 5). Da es nicht möglich ist, in einem gut handhabbaren Buch die gesamte Palette der fertigungstechnischen Anforderungen zu behandeln, wurde der Bereich der kleineren Fertigungsmengen (Einzel- und Kleinserienfertigung) als Grundlage bevorzugt.

Dem Leser wird empfohlen, sich mit dem ersten Durcharbeiten einen Überblick zu verschaffen, um das Buch dann beim Bearbeiten von konstruktiven Übungsaufgaben ständig heranzuziehen. Für den Konstrukteur im Bereich der oben genannten Fertigungsmengen wird es auch ein guter Begleiter in der betrieblichen Konstruktionspraxis sein. Insbesondere wird der Wert des Buches darin gesehen, bei der Herausbildung des beruflichen Erfahrungsschatzes des Konstruktionseinsteigers eine systematische Hilfe zu leisten und das nicht allein den einsatzbedingten Zufällen zu überlassen. Die Verfasser möchten mit dem vorgelegten Buch zum Erfahrungsaustausch anregen und versichern hiermit, dass Hinweise und Vorschläge aufgeschlossen entgegengenommen werden.

Das Buch wäre nicht entstanden ohne die intensiven Hinweise von Herrn Dr.-Ing. *Bernd Platz* – über viele Jahre Oberassistent des Verfassers Hoenow – und seine Bemerkungen über die weiter oben erwähnte Lücke in der Literatur für den Maschinenbaukonstrukteur. Dafür gebührt unserem Freund *Bernd Platz* besonderer Dank. Weiterhin haben mitgewirkt: Frau Dipl.-Ing. *Ina Meißner* beim Umsetzen umfangreicher handschriftlicher Aufzeichnungen, Frau *Mandy Ehrlich* beim Aufbereiten vieler Bilder, Herr *Christian Schreiber* beim Erstellen zeichnerischer Darstellungen und das STUDIO WIR DRESDEN unter besonderer Mitwirkung von Herrn Diplomfotografiker *Andreas Meschke* bei der Anfertigung vieler fotografischer Abbildungen. Allen genannten Mitarbeitern sei hiermit herzlich gedankt. Nicht unerwähnt bleiben darf die freundschaftliche Unterstützung des Herrn Dr.-Ing. *Harry Thonig* der Firma Trumpf Sachsen GmbH. Ebenfalls sei Herrn *Jochen Horn* vom Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag für die gute Zusammenarbeit gedankt.

*Gerhard Hoenow*

*Thomas Meißner*

## Vorwort zur 3. Auflage

Die vorangegangenen Auflagen dieses Buches sollten eine Lücke füllen, wie dem Vorwort zur ersten Auflage entnommen werden kann. Inwieweit ist dieses Vorhaben gelungen? Von den Lesern und Kollegen, die dem Verlag ihre Meinung mitgeteilt haben, gibt es verschiedene Auffassungen – wie sollte es auch anders sein. Die Mehrzahl der Urteile bestätigt vor allem den Lückenschluss, die zweckmäßige Eingrenzung des uferlosen Stoffes und die Praxisnähe. Hervorgehoben wird auch die Abhandlung des kraftgerechten Gestaltens (s. Abschnitt 3) als wichtiges Gebiet für den angehenden Konstrukteur. Damit werden bei kraftbeanspruchten Bauteilen bereits die ersten Entwurfsschritte richtig gelenkt, so dass die nachfolgenden Berechnungen lediglich für die genaue Dimensionierung erforderlich sind. Weiterhin wird festgestellt, dass viele gute und wichtige Beispiele benannt werden und die vielen Abbildungen (Skizzen, Zeichnungen, Fotografien) jedes Thema gut verständlich machen. Gliederung, Inhalt und Regeln sind unkonventionell und originell. Sie stellen einen guten Beitrag für die Lehrbarkeit der konstruktiven Grundlagen für den Einsteiger dar und sind für den Fachmann und als Nachschlagewerk sinnvoll und zweckmäßig. Und wenn gar die Feststellung getroffen wird: „... für den Konstruktionsinteressierten liest es sich wie ein spannender Roman...“, dann dürfte die ursprüngliche Zielstellung im Wesentlichen erreicht sein.

*Gerhard Hoenow*

*Thomas Meißner*



Leseprobe

Gerhard Hoenow, Thomas Meißner

Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau

Bauteile - Baugruppen - Maschinen

ISBN: 978-3-446-42214-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42214-8>

sowie im Buchhandel.

# 3 Kraftgerechtes Gestalten – ein zentrales Anliegen

## Allgemeine Vorbemerkungen

Unter kraftgerechtem Gestalten soll das Entwerfen von Maschinenteilen unter Berücksichtigung der Hauptbeanspruchungsart des Maschinenbaus – der Einwirkung von Kräften und Momenten – verstanden werden. Da die Beanspruchung durch ein Moment immer auf eine Kraft, am Hebelarm angreifend, zurückgeführt werden kann, wird hier grundsätzlich nur mit dem Begriff „*kraftgerechtes Gestalten*“ gearbeitet.

Dass eine Maschinenbaukonstruktion so ausgeführt sein muss, dass sie durch mechanische Beanspruchung nicht zu Bruch gehen darf, ist für jedermann selbstverständlich. Dieses „Zu-Bruch-gehen“ kann bedeuten: Zerstörung eines Bauteiles durch zu hohe

- Zugbeanspruchung
- Druckbeanspruchung
- Biegebeanspruchung
- Torsionsbeanspruchung oder
- beliebige Kombinationen vorstehender Beanspruchungsarten.

Eine nicht so selbstverständliche Art des Versagens von Maschinenteilen kann *unzulässig große Verformung* sein:

- Dehnung durch Zug (selten)
- Stauchung durch Druck (sehr selten)
- Durchbiegung
- Verdrehung durch Torsion
- Stabilitätsverlust (Knicken, Beulen, ...)
- Schwingungen (meist Resonanzen, hier nicht betrachtet)

In der Regel wird daher von sehr vielen Maschinenteilen eine hohe Steifigkeit gefordert. Verschiedentlich wird anstelle des Begriffs Steifigkeit mit dem Begriff Starrheit gearbeitet. Da starr als nicht verformbar gedeutet werden kann, ist dieser Begriff falsch, denn es gibt keinen Werkstoff, der sich unter Einwirkung von Kräften nicht verformt. (Diese Tatsache ist jederzeit mit entsprechenden Messmitteln nachweisbar, bleibt aber dem bloßen Auge häufig verborgen.) Es gibt nur leicht verformbare und schwerer verformbare Werkstoffe. Daher wird hier stets mit dem Begriff Steifigkeit gearbeitet und die Forderung nach hoher Steifigkeit ist der Forderung nach geringer Verformung gleichzusetzen.

Welche Beziehungen bestehen zwischen dem kraftgerechten Gestalten und dem Fachgebiet Technische Mechanik? Die Technische Mechanik beschäftigt sich mit der Berechnung von Spannungen oder Verformungen ausgehend von gegebenen Maschinenteilen. Das *kraftgerechte Gestalten* liegt im Konstruktionsprozess *vor dieser Berechnungsphase* und erhebt den Anspruch, die Grobgestalt eines Maschinenteiles weitgehend den herrschenden Kräften so anzupassen, dass mit möglichst geringem Werkstoffaufwand der gewünschte Effekt erreicht wird. Dabei geht es nicht um extreme Leichtbauforderungen, wie sie z. B. der Flugzeugbau stellt, bei denen die minimale Masse der Bauteile durch hohen fertigungstechnischen Aufwand und zum Teil hochwertige Werkstoffe erkauft wird, sondern um geringe

Masse bei **möglichst minimalen Gesamtkosten für Werkstoff/Halbzeug, Teilefertigung und Montage.**

Bevor der Konstrukteur mit dem kraftgerechten Gestalten beginnt, sollte er sich über folgende Hinweise bzw. Fragen Klarheit verschaffen:

- Sind Spannungen oder Verformungen die kritische Größe?
- Übersicht schaffen über Kräfte und Reaktionskräfte nach Größenordnung, Dynamik, Hauptrichtung und eventuelle Nebenkraftrichtungen!
- Übersicht schaffen über „berufstypische Umgangsformen“ des
  - Bedienungspersonals (Facharbeiter, ungelernter Bediener) und
  - Wartungs-, Reinigungs- und Reparaturpersonals
 beim Umgang mit der Maschine/Gerät.

*Extreme Gegensätzlichkeiten bestehen zwischen Feinmechanik und Bergbau/ Bauwesen. Ist mit Besteigen, Mitfahren oder dergleichen an dafür nicht vorhergesehenen Bereichen zu rechnen? Reinigungskräfte haben kein „Maschinengefühl“, müssen aber Schmutz aus jedem Winkel entfernen (denke an Maschinen für Lebensmittelindustrie, Medizintechnik usw.)*

- Jede konstruktive Bearbeitung einer bestehenden Maschine sollte auch zu einer Leistungssteigerung führen. Schlussfolgerungen über die Proportionen kraftbeanspruchter Bauteile müssen die jeweiligen Entwicklungstendenzen berücksichtigen.

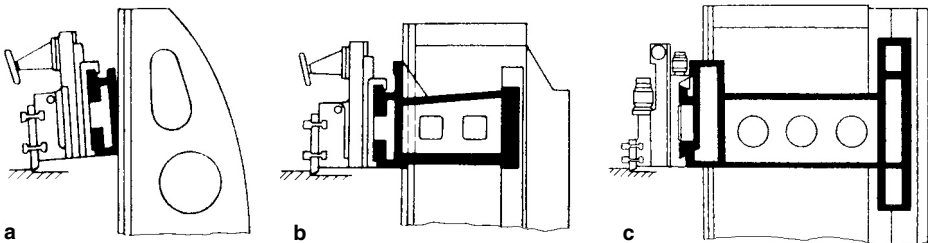


Bild 3.1 Meißelträger (Querbalken) von Langhobelmaschinen

Die Entwicklung der Querschnitte des Querbalkens von 1910 (a) bis 1960 (c). Schlussfolgerungen über die Proportionen kraftbeanspruchter Bauelemente müssen die Entwicklungstendenzen berücksichtigen!

### 3.1 Die Grundregeln des kraftgerechten Gestaltens steifer Maschinenteile

Die erste Grundregel lautet:

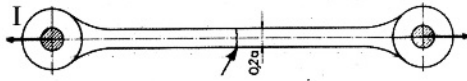
**K1: Leite Kräfte auf kurzen und direkten Wegen!**

Zur Ergänzung lässt sich formulieren:

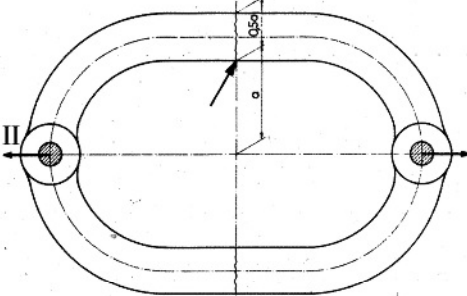
**K1.1: Zug ist die ökonomischste Beanspruchungsart!**

**K1.2: Jede vermiedene Kraftumlenkung beseitigt werkstoffaufwändige bzw. verformungsungünstige Biegung!**

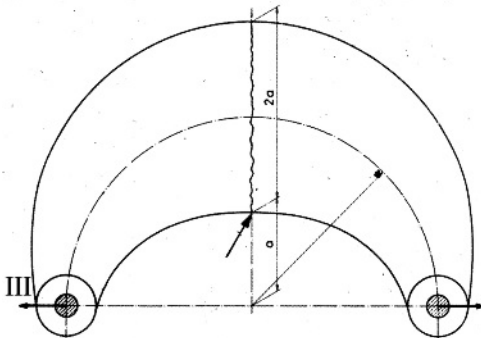
Die folgenden Bilder mit ihren Erläuterungen dürften ausreichend zum Verständnis dieser Regeln beitragen.



**Fall I** – Zwischen den Kraftangriffspunkten ist eine direkte Verbindung möglich: Geringster Werkstoffaufwand – Zugbeanspruchung



**Fall II** – Keine direkte Kraftleitung möglich, aber das Hindernis (nicht dargestellt) kann beidseitig umfasst werden: Werkstoffaufwand wächst durch Biegeanteile.



**Fall III** – Muss ein Hindernis einseitig umgangen werden, wächst der Werkstoffaufwand bei gleicher Maximal-Beanspruchung an den mit Pfeil markierten Stellen auf den 10fachen Wert.

Bild 3.2 Anschauliche Darstellung zur Grundregel des kraftgerechten Gestaltens nach Leyer [25]: Leite Kräfte auf direkten Wegen!

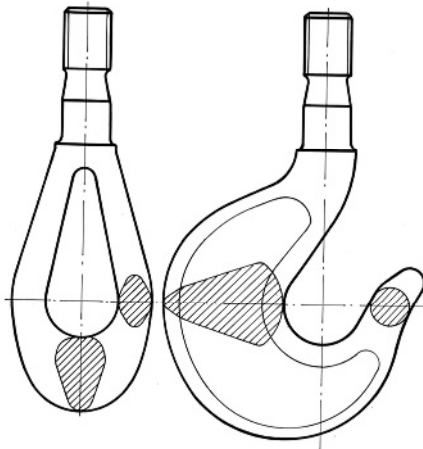


Bild 3.3 Lasthaken und Lastöse [25]

Die Lastöse entspricht der Variante II und der Lasthaken der Variante III nach Bild 3.2.

Der Werkstoffaufwand spricht eindeutig für die Lastöse. Infolge der schlechten Handhabbarkeit ist jeder Kran mit dem werkstoffaufwändigen Kranhaken ausgerüstet.

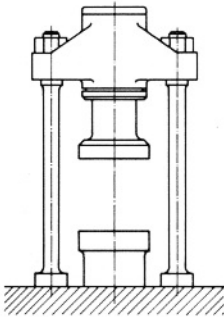


Bild 3.4 Pressgestell – Schema [25]

Praktisches Beispiel für Fall II nach Bild 3.2

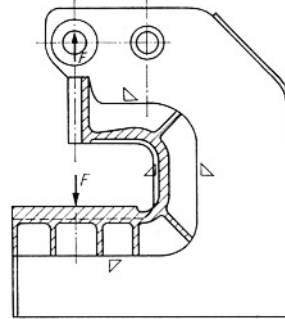
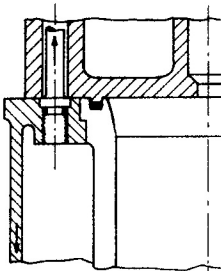
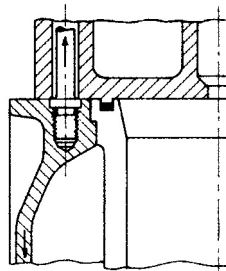


Bild 3.5 C-Gestell [27]

Praktisches Beispiel für Fall III.



Links: Ungünstige Kraftleitung, die Schraubenkräfte werden über Biegebeanspruchung in die Wand geleitet



Rechts: Die Biegebeanspruchung ist weitgehend herabgesetzt.

Bild 3.6 Zylinderkopfverschraubung [25]

## K2: Strebe bei nicht vermeidbarer Biegung kurze Biegelängen an!

Auch diese Regel wird mit Hilfe der Bilder Bild 3.7 bis Bild 3.11 so illustriert, dass keine weiteren Erklärungen notwendig sind.

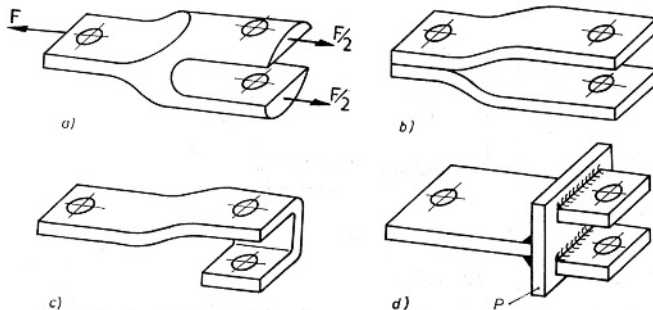


Bild 3.7 Gabelförmige Verbindungsstücke – Varianten [40]

- Für Einzelfertigung aus dem „Vollen“ (Rundstab) gearbeitet; die Zugkraft  $F$  wird im Verbindungsstück gut geleitet, Biegebeanspruchung ist gering
- Kraftgerechte Blechkonstruktion aus zwei einfachen Blechteilen hergestellt
- Unbefriedigende einteilige Blechkonstruktion, die Gestaltung widerspricht der Forderung nach direkter Kraftleitung
- Unbefriedigende Schweißkonstruktion, Biegung der Platte  $P$  erfordert höheren Werkstoffaufwand, außerdem ist die Anzahl der Schweißnähte zu kritisieren



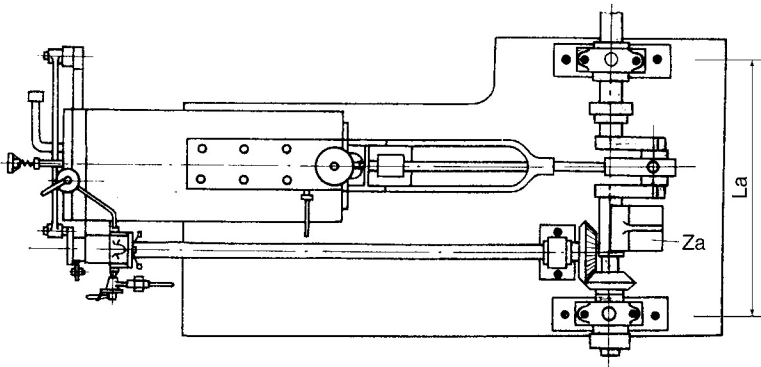


Bild 3.8 Ottosche Versuchs-Viertaktmaschine (1876) [38]

Der Lagerabstand  $L_a$  ist sehr groß, offensichtlich musste eine zusätzliche Abstützung **ZA** die unzulässig große Verformung der Kurbelwelle begrenzen.

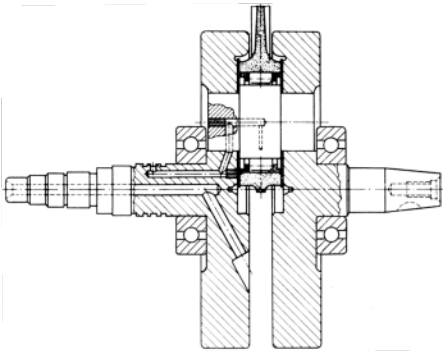


Bild 3.9 Kurbelwelle eines Einzylinderkompressors.

Die axiale Baulänge ist extrem kurz, die Lager sind in die Kurbelwangen „hineingebaut“.

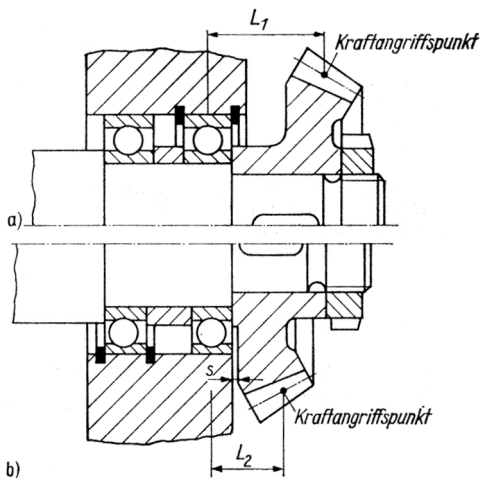
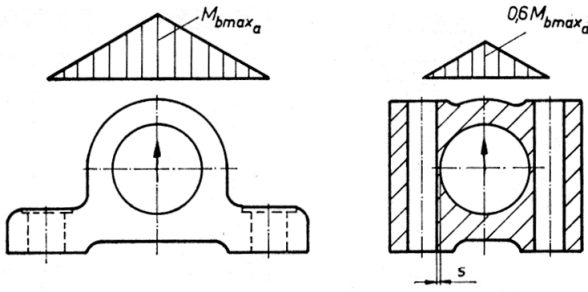


Bild 3.10 Kegelradlagerung

- a) ältere Konstruktion
- b) neue Konstruktion

Die Biegebeanspruchung kann erheblich eingeschränkt werden, wenn die Kraglänge  $L$  möglichst kurz gehalten wird. Moderne Konstruktionen zeichnen sich durch extrem kurze Kraglängen  $L_2$  aus. Der Abstand  $s$  wird teilweise  $< 1$  mm ausgeführt.



a) ältere Konstruktion

b) der extrem verkleinerte Abstand der Befestigungsschrauben verringert das maximale Biegemoment

Bild 3.11 Lagerbock bei abhe-  
abhebender Beanspruchung

Der Abstand  $s$  wird heute bis auf 1 mm herabgesetzt. (Die Pfeile zeigen die Krafrichtung an.)

**K3: Ordne jeder Beanspruchungsart den entsprechenden materialökonomischen Querschnitt zu!**

Beanspruchungsart	geeignete Profile	Bemerkungen
<p>Zug</p>	<p>beliebig</p> <p>Auf billige Halbzeuge zurückgreifen!</p>	<p>Querschnitt beliebig wählbar, da nur beanspruchte Flächen-größe und Werkstoff von Bedeutung sind.</p>
<p>Druck</p>	<p>beliebig,</p> <p>ist aber schlecht</p>	<p>Länge der Bauteile im Vergleich zum Querschnitt sollte klein bleiben – Knickgefahr!</p>
<p>Druck mit Knickgefahr</p>		<p>Bei langen schlanken Bauteilen ist der Nachweis der Sicherheit gegen Knicken zu führen!</p>
<p>Biegung</p>	<p>zäh (duktil) z. B. Stahl</p> <p>Zugseite spröde z. B. Gusseisen</p> <p>Druckseite</p>	<p>Nach Möglichkeit solche Profile verwenden, die weit von der neutralen Faser entfernt Material aufweisen. Für Gusswerkstoffe mehr Material auf der Zugseite anordnen!</p> <p>ist ungünstig!</p>
<p>Torsion</p>		<p>Bei Torsion geschlossene Hohlprofile verwenden!</p> <p><b>I</b> ist ungünstig!</p>

Tafel 3.1 Zuordnung von Bauteilquerschnitten zu Beanspruchungsarten

Die Bedeutung der bewussten Zuordnung von Profil- bzw. Querschnittsformen wird noch deutlicher bei der Betrachtung der wesentlichen Geometrieinflüsse auf Spannung und Verformung.

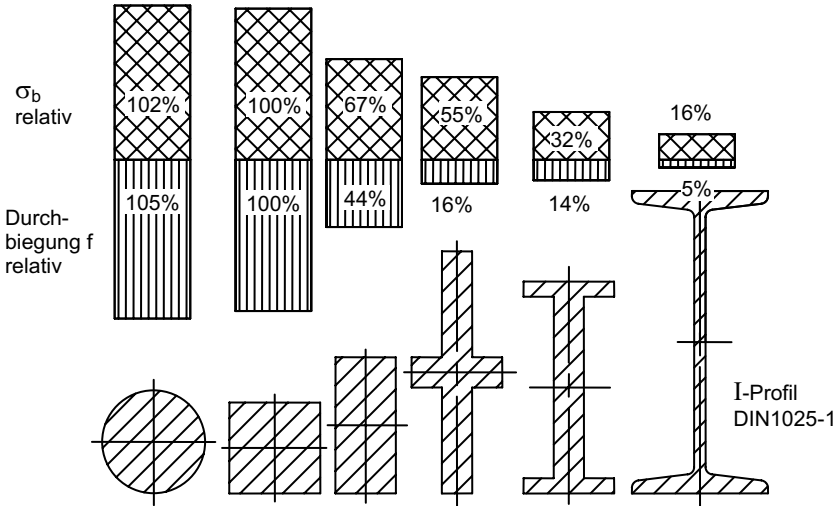
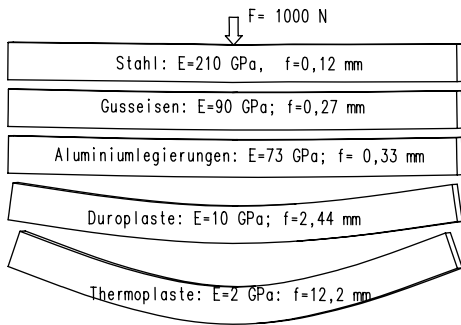


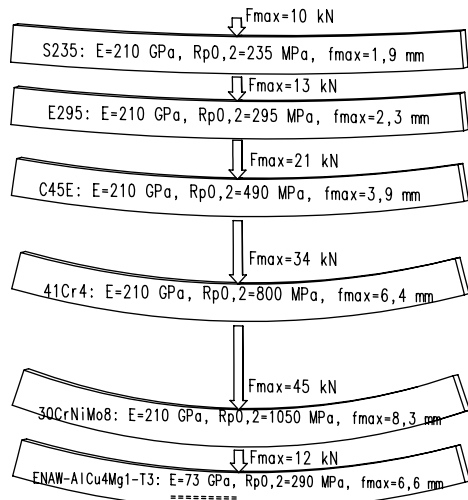
Bild 3.12 Vergleich der relativen Biegespannungen ( $\sigma_b$ ) und Durchbiegungen ( $f$ ) von Kragbalken mit verschiedenen Profilen gleichen Flächeninhalts



Balken auf zwei Stützen, Stützweite  $l = 500$  mm, Höhe  $h = 40$  mm, Breite  $b = 20$  mm durch Querkraft  $F = 1$  kN um  $f$  durchgebogen (vergrößert dargestellt)

Beachte:  
 - Beanspruchung bei Raumtemperatur  
 - Kunststoffe neigen zum Kriechen, besonders bei höheren Temperaturen (Durchbiegung wird mit der Zeit größer)

Bild 3.13 Durchbiegung verschiedener Werkstoffe bei gleicher Last



Balkenquerschnitt:  $b = 20$  mm,  $h = 40$  mm  
 Stützweite:  $l = 500$  mm

Bild 3.14 Durchbiegung bei verschiedener Streckgrenze (ENAW-AlCu4Mg1-T3 zum Vergleich)

Bei der Biegung sind rechnerische Dimensionierungen oft einfach, aber die Wahl einer günstigen Basisgeometrie erspart Aufwand.

Hinsichtlich der Wahl des Werkstoffs sind Festigkeit **und** Verformungsverhalten zu beachten. So steigt beispielsweise bei gleicher Last die Durchbiegung, wenn der Elastizitätsmodul sinkt (Bild 3.13). Mit höherer Festigkeit steigen elastische Verformbarkeit und zulässige Kraft. Übersteigt die vorhandene Spannung die ertragbare Spannung (z. B. die Biegefließgrenze), kann also ein festerer Werkstoff gewählt werden (Bild 3.14). Ist jedoch die Durchbiegung zu groß, bringt das bei gleicher Geometrie keinen Erfolg! Es ist ein Werkstoff mit höherem Elastizitätsmodul oder eine steifere Geometrie zu wählen (siehe Bild 3.18 und Bild 3.12).

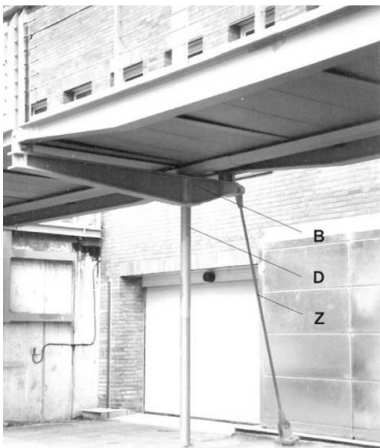
Während ein Torsionsmoment in einem Abschnitt konstant ist, wächst ein Biegemoment mit dem Hebelarm. So tritt die im Bild 3.14 genannte Maximalbeanspruchung nur in der Mitte auf, an den Auflagern ist hier die Biegespannung Null.

Ergänzung:

**K3.1: Biegeträger sollten dem Biegemomentenverlauf angepasst werden!**

**K3.2: Beachte Größeneinfluss und Herstellbarkeit bzw. Herstattaufwand!**

Neben Bild 3.13 und Bild 3.14 sollen die folgenden Bilder zur Ausprägung und zum Verständnis des kraftgerechten Gestaltens beitragen.

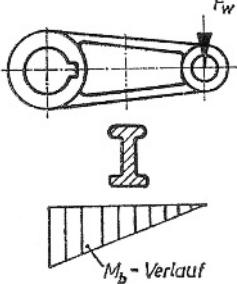
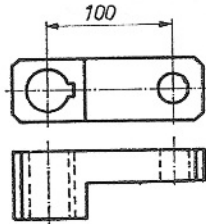
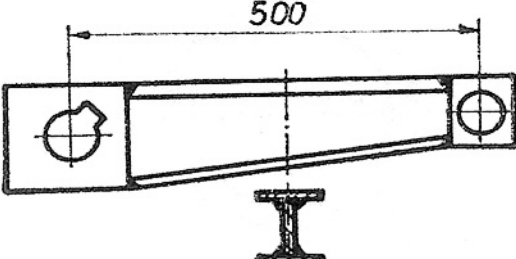
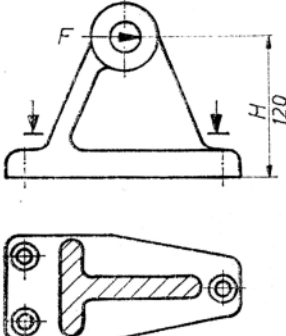
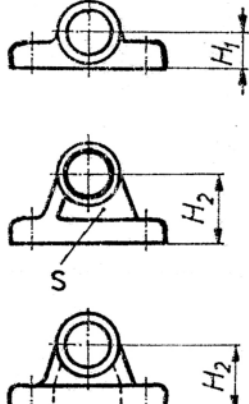
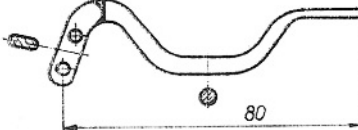



*Bild 3.15 Stütze für einen Laufsteg*

Druckbeanspruchter Stab **D** als Rohr ausgeführt, Zugstab **Z** (Rundstahl mit angeschweißten Ösen), Biegeträger **B** (Schweißkonstruktion)

Der Biegeträger **B** ist sehr gut dem Biegemomentenverlauf angepasst.

Die folgende Tafel zeigt die beispielhafte Anwendung der Regel **K3.2**.

 <p>Hebel für Wechselbiegebeanspruchung, gesenkgeschmiedet oder gegossen</p>	 <p>Hebel für gleiche Beanspruchung, aber als Einzelstück aus dem Vollen gearbeitet; Schmiedegesenk oder Modell für die Gussherstellung wären unrentabel</p>
 <p>Hebel für Einzelfertigung und für die gleiche Beanspruchung wie die obigen Hebel; die Baugröße eignet sich zur Anwendung einer Schweißkonstruktion</p>	
 <p>Lagerbock für Biegebeanspruchung - Gussausführung</p>	 <p>Lagerbock für den gleichen Zweck; durch die sehr geringe Bauhöhe <math>H_1</math> ist das T-Profil (links) nicht herstellbar</p> <p>Lagerbock mit einer Bauhöhe <math>H_2 &lt; H_1 &lt; H</math>; wird das beanspruchungsgünstige T-Profil verwendet, entsteht eine gießtechnisch schwierige Sanddecke <b>S</b>.</p> <p>Zweckmäßigere Ausführung für einen Lagerbock der Bauhöhe <math>H_2</math>; die Sanddecke ist vermieden (Hohlkörper).</p>
 <p>Einfacher Hebel für einen Aktenordner, geformt aus Draht, der die Verwendung des biegegünstigen I-Profils nicht zulässt; bei der hier vorliegenden geringen Beanspruchung ist das akzeptabel.</p>	 <p>Hebel für einen Aktenordner aus spritzgeformtem Thermoplast. Die sehr gute Formbarkeit dieses Werkstoffes lässt die Verwendung des biegegünstigen I-Profils zu.</p>

Tafel 3.2 Herstell- und Größeneinfluss auf den Bauteilquerschnitt

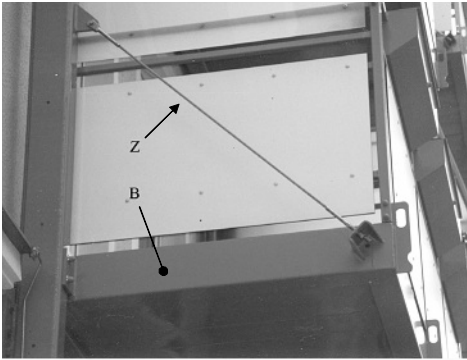


Bild 3.16 Balkongerüst, Stahlkonstruktion

Der geringe Durchmesser des Zugstabes **Z** macht den viel höheren Materialaufwand bei Biegung deutlich (**B** = biegebeanspruchter Träger)

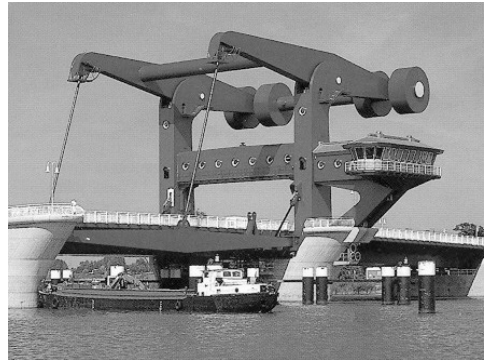


Bild 3.17 Klappbrücke

Der unterschiedliche Materialaufwand bei Zug- und Biegebeanspruchung ist deutlich erkennbar. Die oben liegenden Biegebalken mit den runden Gegengewichten sind dem Verlauf des Biegemoments angenähert. Der Materialaufwand ist mehrfach höher als bei den zugbelasteten Verbindungen zwischen Biegebalken und Brücke.

### Torsion und offener Querschnitt

Die Berechnung der Torsionsbeanspruchung und der Verdrehung von nicht kreisförmigen und offenen Querschnitten ist aufwendig, mit den Angaben nach Bild 3.18 soll ein Eindruck zum Verhalten verschiedener Profile vermittelt werden.

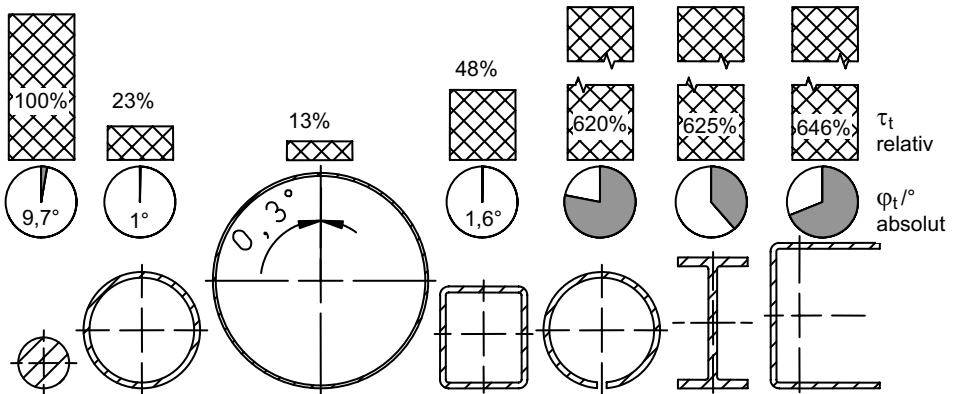


Bild 3.18 Vergleich der relativen Torsionsschubspannungen ( $\tau_t$ ) und der Verdrehwinkel ( $\phi_t$ ) für verschiedene Profile (gleicher Flächeninhalt  $A = 960 \text{ mm}^2$  bei einer identischen Belastung  $T = 2 \text{ kNm}$ , zugrunde gelegt wurde eine freie Länge von 1 m)