HANSER

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.

© Carl Hanser Verlag, München

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.

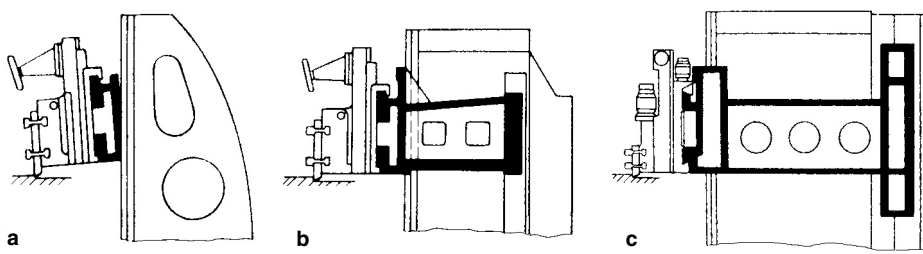


Bild 3.1 Meißelträger (Querbalken) von Langhobelmaschinen

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

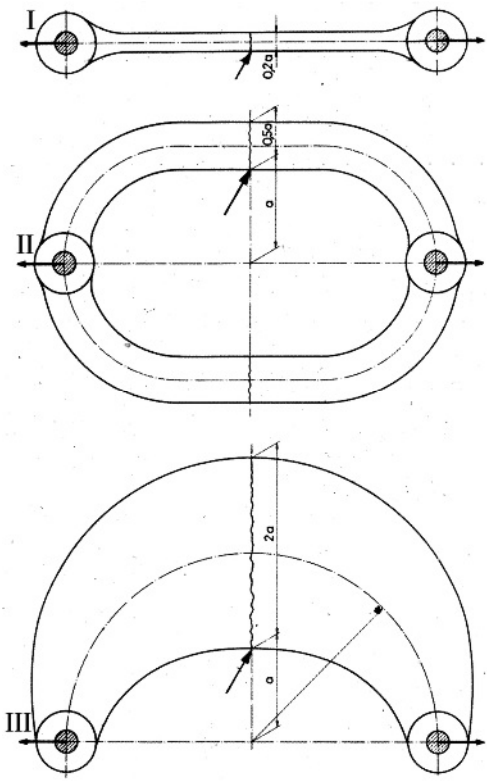
Die erste Grundregel lautet:

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!

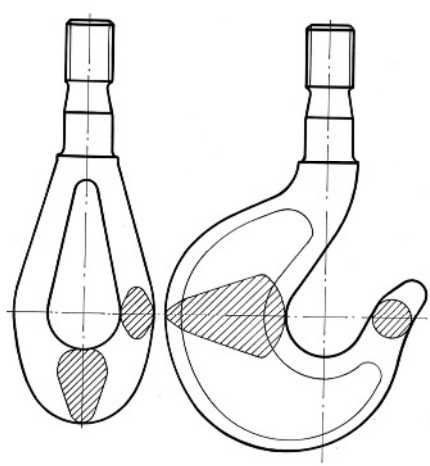


Bild 3.3 Lasthaken und Lastöse [25]

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.

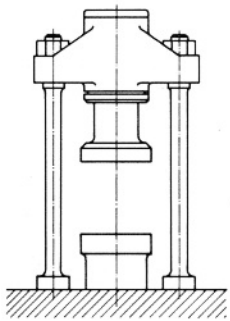


Bild 3.4 Pressengestell – Schema [25]

Praktisches Beispiel für Fall II nach Bild 3.2

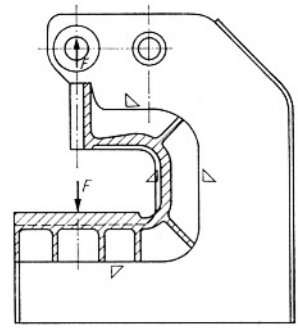
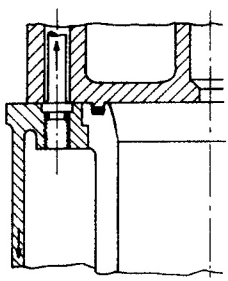
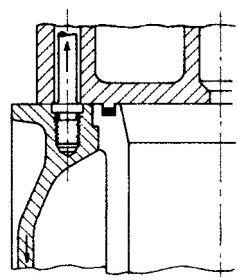


Bild 3.5 C-Gestell [27]

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.

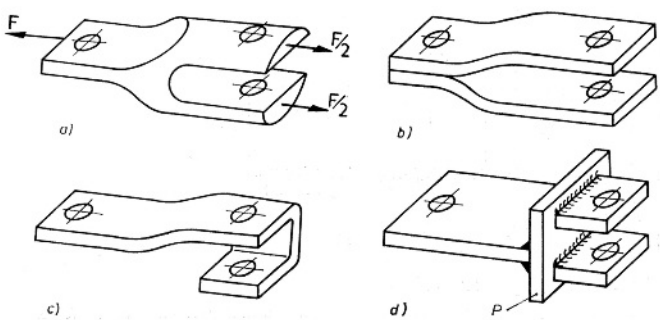


Bild 3.7 Gabelförmige Verbindungsstücke – Varianten [40]

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

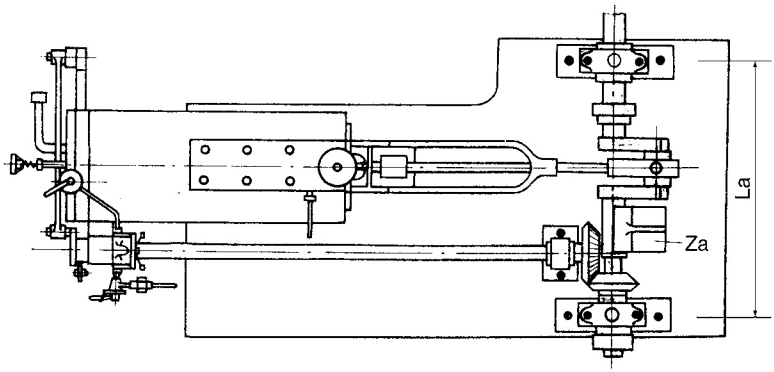


Bild 3.8 Ottosche Versuchs-Viertaktmaschine (1876) [38]

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

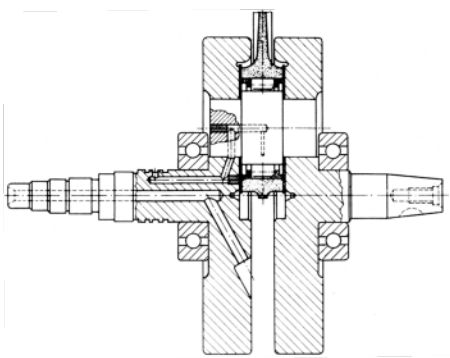


Bild 3.9 Kurbelwelle eines Einzylinder-kompressors.

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

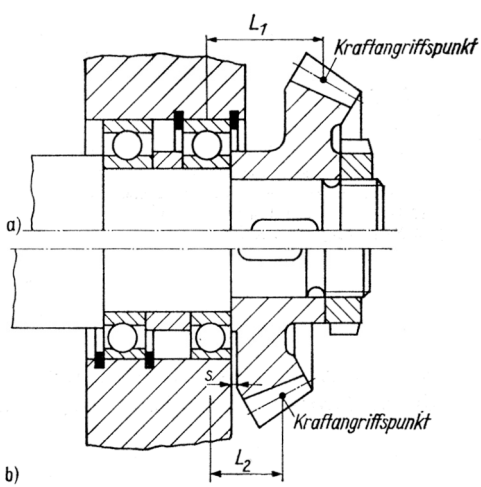


Bild 3.10 Kegelradlagerung

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 $\mathbf{L_2}$ aus. Der Abstand **s** wird teilweise < 1 mm ausgeführt.

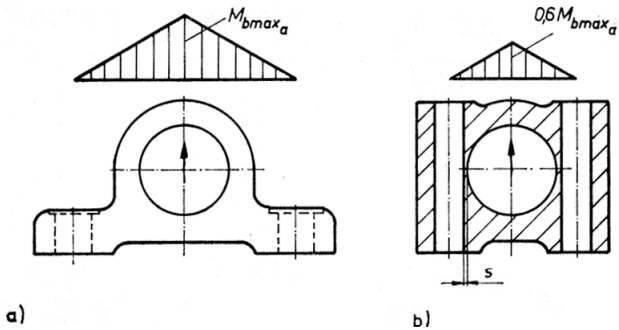


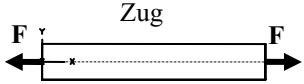
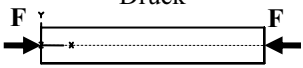
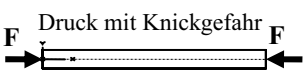
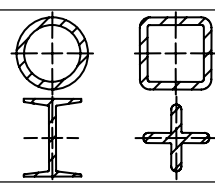
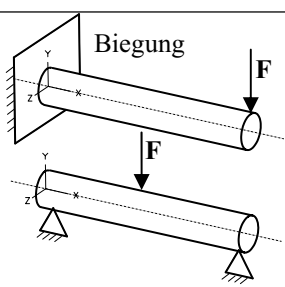
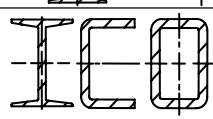
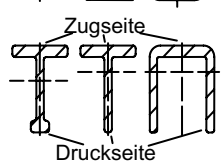
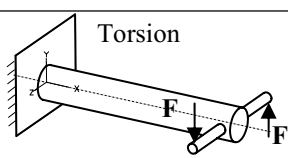
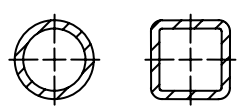
Bild 3.11 Lagerbock bei abhe- abhebender Beanspruchung

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

a) ältere Konstruktion

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

K3: Ordne jeder Beanspruchungsart den entsprechenden materialökonomischen Querschnitt zu!

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

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 Geometrieeinflüsse auf Spannung und Verformung.

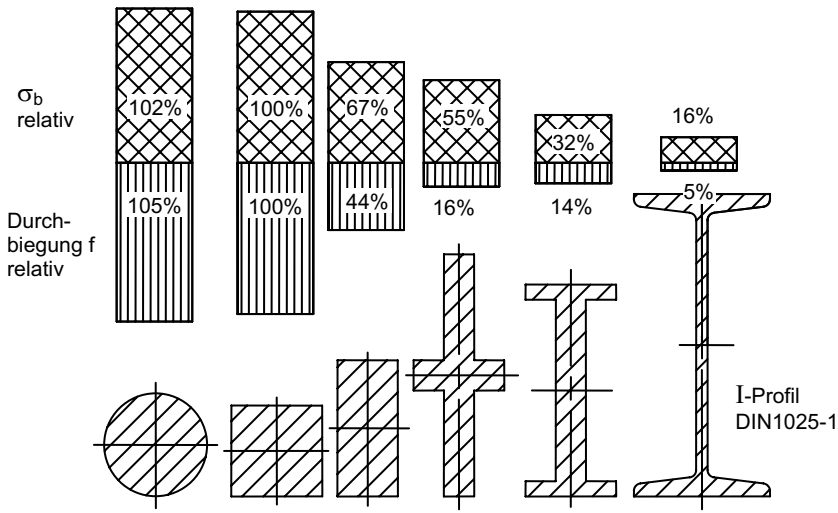


Bild 3.12 Vergleich der relativen Biegespannungen (σ_b) und Durchbiegungen (f) von Kragbalken mit verschiedenen Profilen gleichen Flächeninhalts

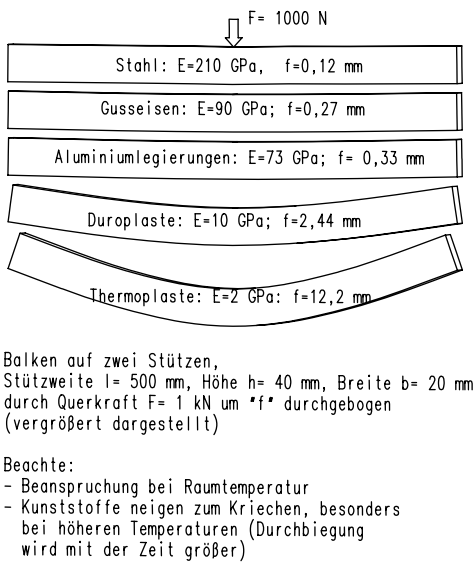


Bild 3.13 Durchbiegung verschiedener Werkstoffe bei gleicher Last

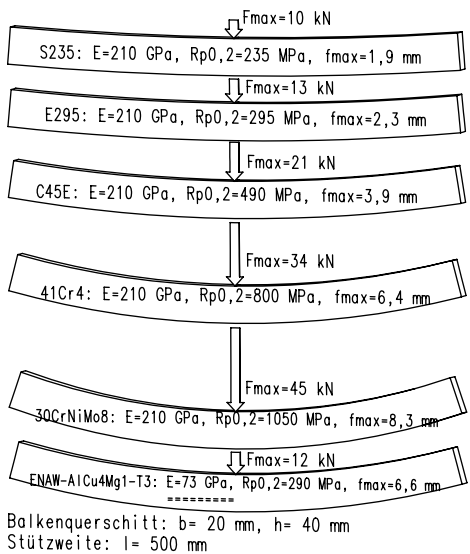


Bild 3.14 Durchbiegung bei verschiedener Streckgrenze (ENAW-AlCu4Mg1-T3 zum Vergleich)

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 Elastititätsmodul 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. Herstellaufwand!**

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

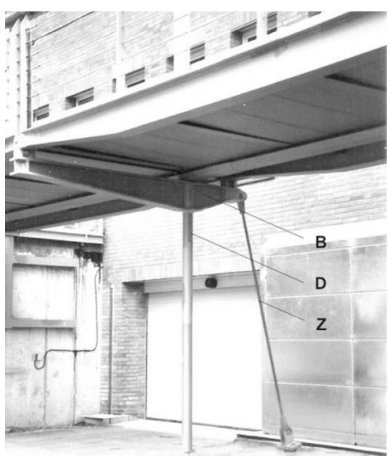
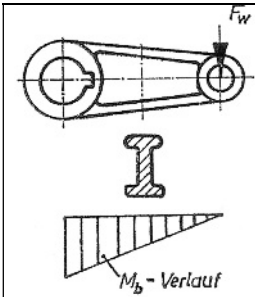


Bild 3.15 Stütze für einen Laufsteg

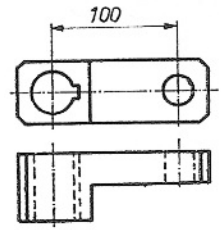
Druckbeanspruchter Stab **D** als Rohr ausgeführt, Zugstab **Z (**Rundstahl mit angeschweißten Ösen), Biegeträger **B** (Schweißkonstruktion)

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

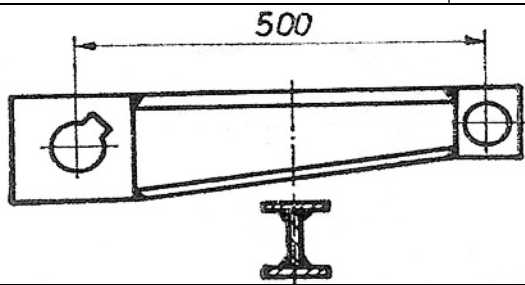
Die folgende Tafel zeigt die beispielhafte Anwendung der Regel **K3.2**.



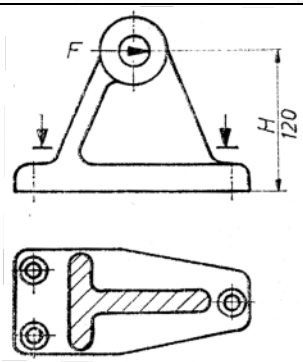
Hebel für Wechselbiegebeanspruchung, gesenkgeschmiedet oder gegossen



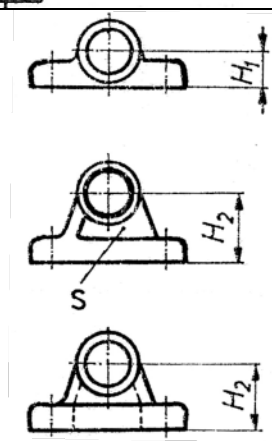
Hebel für gleiche Beanspruchung, aber als Einzelstück aus dem Vollen gearbeitet; Schmiedegesenk oder Modell für die Gussherstellung wären unrentabel



Hebel für Einzelfertigung und für die gleiche Beanspruchung wie die obigen Hebel; die Baugröße eignet sich zur Anwendung einer Schweißkonstruktion



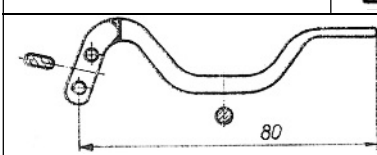
Lagerbock für Biegebeanspruchung - Gussausführung



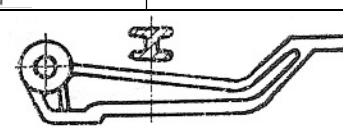
Lagerbock für den gleichen Zweck; durch die sehr geringe Bauhöhe H_1 ist das T-Profil (links) nicht herstellbar

Lagerbock mit einer Bauhöhe $H_1 < H_2 < H$; wird das beanspruchungsgünstige T-Profil verwendet, entsteht eine gießtechnisch schwierige Sandecke **S**.

Zweckmäßigere Ausführung für einen Lagerbock der Bauhöhe H_2; die Sandecke ist vermieden (Hohlkörper).



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.



Hebel für einen Aktenordner aus spritzgeformtem Thermoplast. Die sehr gute Formbarkeit dieses Werkstoffes lässt die Verwendung des biegegünstigen I-Profils zu.

Tafel 3.2 Herstell- und Größeneinfluss auf den Bauteilquerschnitt

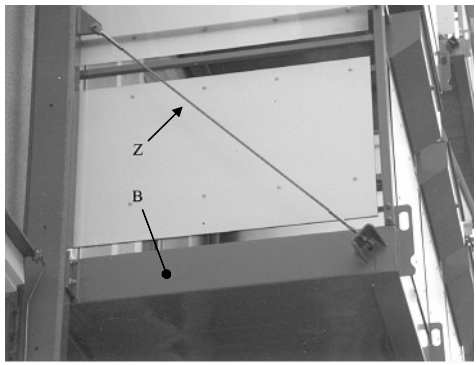


Bild 3.16 Balkongerüst, Stahlkonstruktion

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

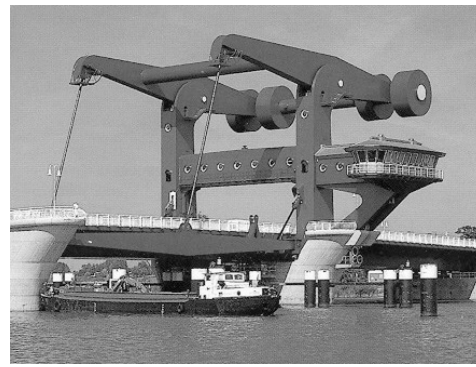


Bild 3.17 Klappbrücke

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

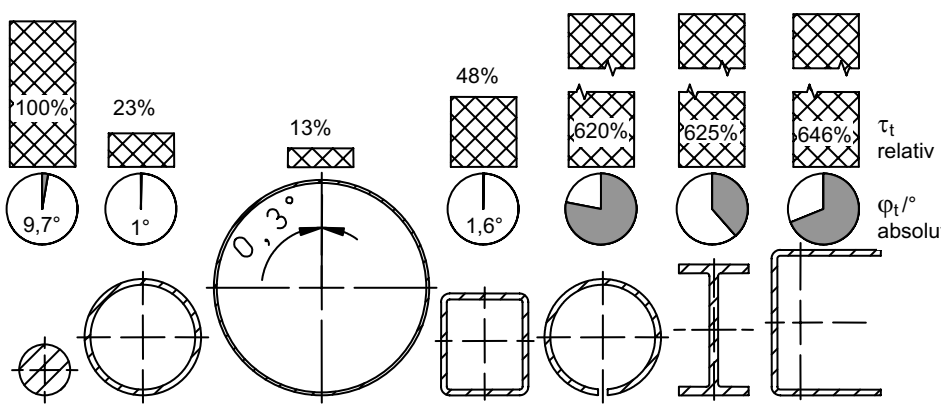


Bild 3.18 Vergleich der relativen Torsionsschubspannungen (τ_t) und der Verdrehwinkel (φ_t) für verschiedene Profile (gleicher Flächeninhalt A= 960 mm² bei einer identischen Belastung T= 2 kNm, zugrunde gelegt wurde eine freie Länge von 1 m)