

#### Allgemeines

Die Tragwerksberechnung von stählernen Tragwerken, die aus stabförmigen Bauteilen zusammengesetzt sind, erfolgt nach den Grundsätzen und Regeln der DIN EN 1993-1-1, „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“.

Stabförmige Bauteile können durch die drei elementaren Beanspruchungen Zug- oder Drucknormalkraft ( $N$ ), Querkraft ( $V$ ) und Biegemoment ( $M$ ) beansprucht werden, siehe **Bild 1**.

Eine reine Normalkraftbeanspruchung liegt beispielsweise in Aussteifungsverbänden, Fachwerkkonstruktionen und je nach Ausführung in Stützen vor, siehe **Bild 2**.

Eine Querkraft- und Biegebeanspruchung erfährt jedes Bauteil, das nicht ausschließlich in seiner Längsachse belastet wird, z. B. Riegel einer Hallenkonstruktion, Deckenträger im Geschossbau oder Hauptträger einer Brücke, siehe **Bild 3**.

Üblicherweise erfolgt ein Bauteilnachweis nach DIN EN 1993-1-1 indem die auf die Bauteile einwirkenden Schnittgrößen den zulässigen Grenzschnittgrößen des jeweiligen Bauteils gegenübergestellt werden. Die einwirkenden Bemessungswerte der Beanspruchungen dürfen die Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten im betrachteten Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht überschreiten. Somit wird eine Einwirkung einem Widerstand gegenübergestellt, wobei der Widerstand größer oder gleich der Einwirkung sein muss:

$$\text{Einwirkung } E_d \leq \text{Widerstand } R_d.$$

#### Bauteilnachweise

Der Nachweis eines Bauteils gliedert sich in vier Schritte:

- (1) Ermittlung der Beanspruchung (Einwirkung),
- (2) Klassifizierung des Querschnitts,
- (3) Ermittlung der Beanspruchbarkeit (Widerstand),
- (4) Nachweis des Bauteils durch Gegenüberstellung von Beanspruchung (Einwirkung) und Beanspruchbarkeit (Widerstand, ggf. mit Interaktionen).

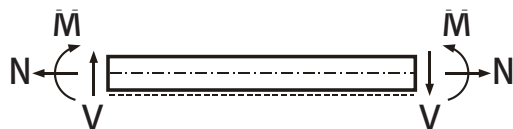


Bild 1 Elementare Beanspruchungen

#### Querschnittsklassifizierung

Um die Einflüsse aus örtlichem Beulen von druckbeanspruchten Querschnittsteilen zu berücksichtigen, werden Querschnitte in die folgenden vier Querschnittsklassen unterteilt, siehe auch **Bild 4**:

- QKL1: Querschnitte der Klasse 1 können plastische Gelenke mit ausreichendem Rotationsvermögen für plastische Bemessung ausbilden.
- QKL2: Querschnitte der Klasse 2 können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, haben aber aufgrund örtlichen Beulens nur eine begrenzte Rotationskapazität.
- QKL3: Querschnitte der Klasse 3 erreichen die Streckgrenze bei Druckbeanspruchung in der ungünstigsten Querschnittsfaser, können aber wegen örtlichen Ausbeulens die plastischen Reserven nicht nutzen.
- QKL4: Als Querschnitte der Klasse 4 werden alle Querschnitte eingestuft, die nicht den Klassen 1 bis 3 zugeordnet werden können. Bei diesen Querschnitten müssen Momenten- und Drucktragfähigkeit unter Berücksichtigung des örtlichen Ausbeulens bestimmt werden.

Die Einstufung eines Querschnitts erfolgt in der Regel nach der ungünstigsten Klasse eines seiner druckbeanspruchten Teile. Die Berechnung der Beanspruchbarkeiten sowie die erforderlichen Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind, in Abhängigkeit der Querschnittsklassen, in **Tabelle 1** dargestellt.

Wird ein Bauteil gleichzeitig durch mehrere unterschiedliche Beanspruchungen belastet, ist für Querschnitte der Klassen 1 und 2 gegebenenfalls eine Interaktion der einzelnen Tragfähigkeiten erforderlich (z. B. Querkraft - Biegung, Querkraft - Normalkraft - Biegung). In **Bild 5** ist ein vereinfachtes Ablaufdiagramm zur Ermittlung der plastischen Tragfähigkeiten von I- und H-Profilen unter Berücksichtigung der Interaktion angegeben. Die Interaktionsregeln zur Bestimmung der abgeminderten Tragfähigkeiten können DIN EN 1993-1-1 entnommen werden.

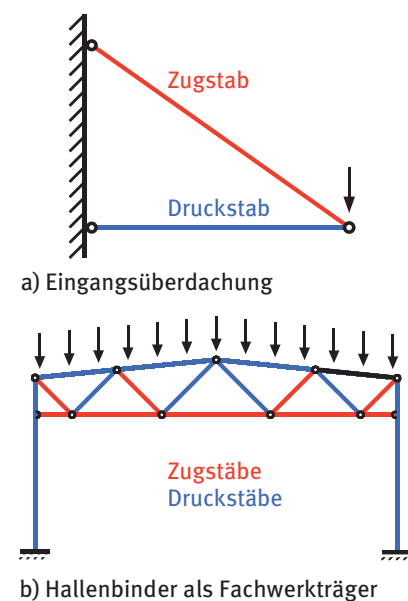
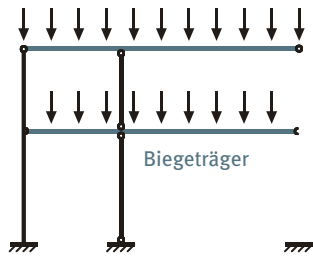
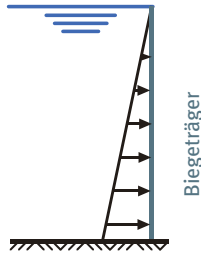


Bild 2 Normalkraftbeanspruchte Stäbe



a) Deckenträger



b) Stützwandträger

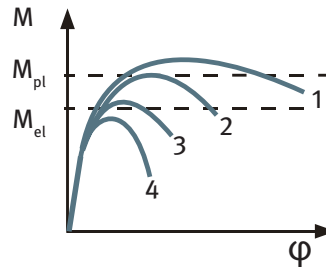
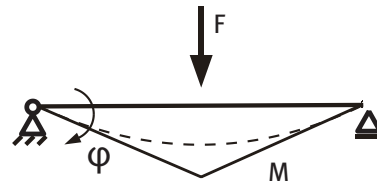


Bild 3 Biegeträger

Bild 4 Querschnittsklassifizierung

Beanspruchung	Nachweis	Beanspruchbarkeit
<p>Zug</p>	$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$	$N_{t,Rd} = \min \begin{cases} N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \\ N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_n \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \end{cases}$ <p>A: Querschnittsfläche                      A<sub>eff</sub>: Effektive Querschnittsfläche unter Berücksichtigung von lokalem Beulen                      A<sub>n</sub>: Nettoquerschnittsfläche unter Berücksichtigung von Lochschwächungen                      A<sub>v</sub>: Wirksame Schubfläche                      f<sub>y</sub>: Streckgrenze                      f<sub>u</sub>: Zugfestigkeit                      I: Flächenträgheitsmoment                      S: Statisches Moment                      t: Blechdicke                      V<sub>Ed</sub>: Einwirkende Querkraft                      W<sub>el</sub>: Elastisches Widerstandsmoment                      W<sub>eff</sub>: Effektives, elastisches Widerstandsmoment unter Berücksichtigung von lokalem Beulen</p>
<p>Druck (ohne Stabilität)</p>	$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0$	$N_{c,Rd} = \begin{cases} \text{QKL 1-3: } N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \\ \text{QKL 4: } N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \end{cases}$
<p>Biegung</p>	$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0$	<p>QKL 1-2: <math>M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}</math>                      QKL 3: <math>M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}</math>                      QKL 4: <math>M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}</math></p>
<p>Querkraft</p>	<p>QKL 1-2: <math>\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0</math>                      QKL 3: <math>\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})} \leq 1,0</math></p>	$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\gamma_{M0} \cdot \sqrt{3}}$ $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t}$ <p>W<sub>pl</sub>: Plastisches Widerstandsmoment</p>

Für Walzprofile können die Beanspruchbarkeiten  $V_{pl,Rd}$ ,  $N_{pl,Rd}$ ,  $M_{el,Rd}$  und  $M_{pl,Rd}$  aus Tabellen entnommen werden, siehe zum Beispiel „Stahlbau im Blick“ oder „Schneider Bautabellen“. Dabei sind die jeweils berücksichtigten Teilsicherheitsbeiwerte gemäß DIN EN 1993 - 1 - 1:2010 - 12 sind in Tabelle 2 dargestellt. Zur Berechnung der wirksamen Schubflächen siehe Tabelle 3.

Tabelle 1 Nachweise unter elementaren Beanspruchungen

Teilsicherheitsbeiwert	Wert	Beanspruchbarkeit von
$\gamma_{M0}$	1,0	Querschnitten (unabhängig von der Querschnittsklasse)
$\gamma_{M1}$	1,1	Bauteilen bei Stabilitätsversagen (bei Anwendung von Bauteilnachweisen)
$\gamma_{M2}$	1,25	Querschnitte bei Bruchversagen infolge von Zugbeanspruchung

Tabelle 2 Teilsicherheitswerte  $\gamma_{M}$  im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Querschnitt	$A_v$
1 Gewalzte Profile mit I- und H- Querschnitten Lastrichtung parallel zum Steg	$A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \geq \eta \cdot h_w \cdot t_w$
2 Gewalzte Profile U- Querschnitten Lastrichtung parallel zum Steg	$A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f$
3 Gewalzte Profile mit T- Querschnitten Lastrichtung parallel zum Steg	$0,9 \cdot (A - b \cdot t_f)$
4 Geschweißte Profile mit I- und H- und Kastenquerschnitten Lastrichtung parallel zum Steg	$\eta \cdot \Sigma (h_w \cdot t_w)$
5 Geschweißte Profile mit I- und H- und Kastenquerschnitten Lastrichtung parallel zum Flansch	$A - \Sigma (h_w \cdot t_w)$
6 Gewalzte Rechteckhohlquerschnitte mit gleichförmiger Blechdicke: Belastung parallel zur Trägerhöhe	$A \cdot h / (b + h)$
Belastung parallel zur Trägerbreite	$A \cdot b / (b + h)$
7 Rundhohlquerschnitte und Rohre mit gleichförmiger Blechdicke	$2 \cdot A / \pi$
Der Wert $\eta$ darf auf der sicheren Seite liegend zu $\eta = 1,0$ angesetzt werden	

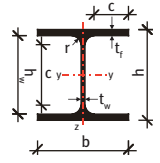


Tabella 3 Wirksame Schubfläche  $A_v$  gemäß DIN EN 1993-1-1:2010-12

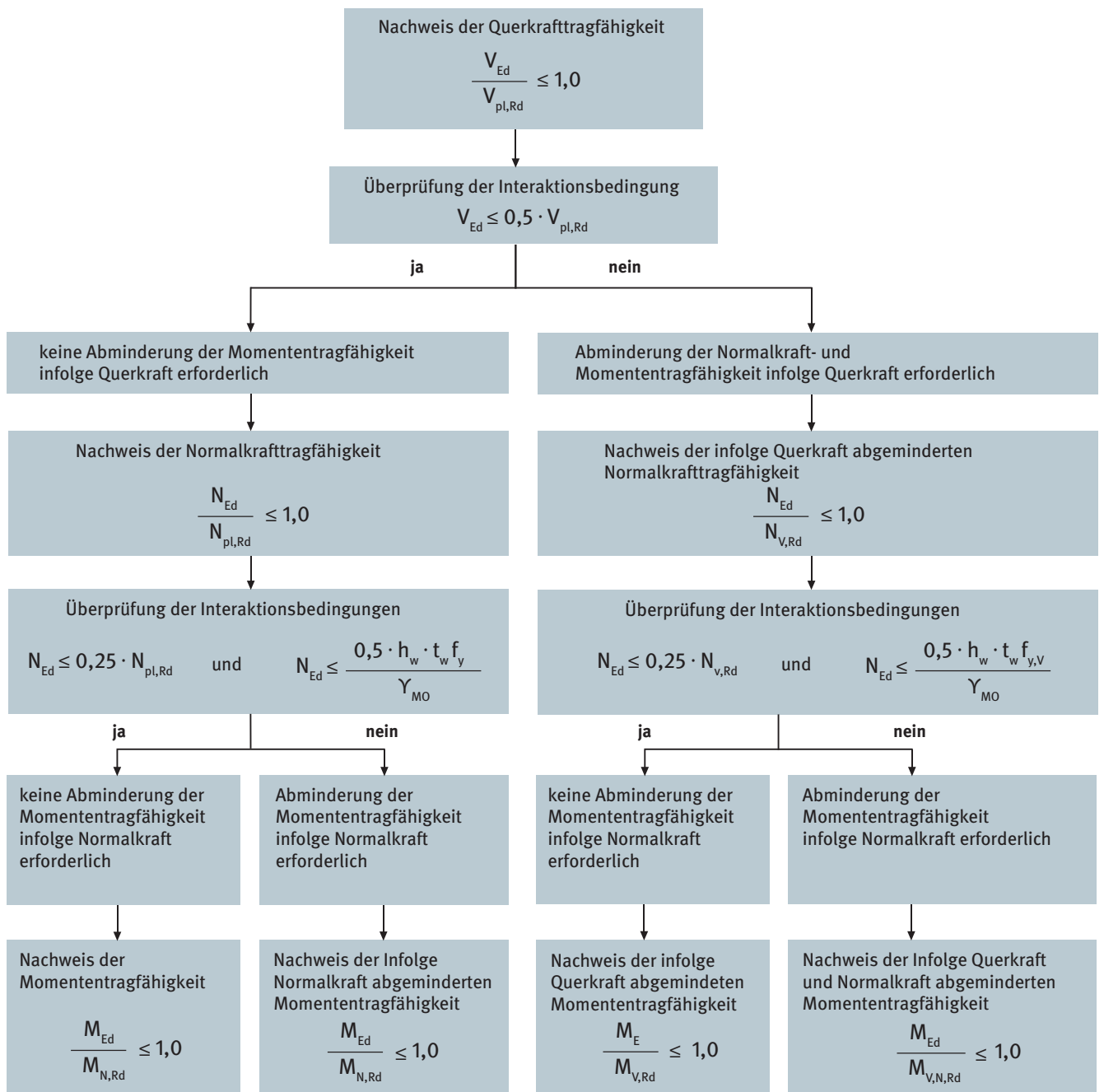


Bild 5 Vereinfachtes Ablaufdiagramm: Interaktion der vollplastischen Tragfähigkeiten von I- und H-Profilen bei gleichzeitiger Beanspruchung durch unterschiedliche Schnittgrößen

Wird ein Bauteil gleichzeitig durch mehrere unterschiedliche Beanspruchungen belastet, ist für Querschnitte der Klassen 1 und 2 gegebenenfalls eine Interaktion der einzelnen Tragfähigkeiten erforderlich (z. B. Querkraft - Biegung, Querkraft - Normalkraft - Biegung). In Bild 5 ist ein vereinfachtes Ablaufdiagramm zur Ermittlung der plastischen Tragfähigkeiten von I- und H-Profilen unter Berücksichtigung der Interaktion angegeben. Die Interaktionsregeln zur Bestimmung der abgeminderten Tragfähigkeiten können DIN EN 1993-1-1 entnommen werden.

Für Querschnitte der Klasse 3 darf das folgende Fließkriterium für den kritischen Punkt eines Querschnitts verwendet werden:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1,0.$$

Für Nachweise von Querschnitten der Klasse 4 unter kombinierten Beanspruchungen siehe DIN EN 1993-1-1 und DIN EN 1993-1-5.

### Stabilität

Für auf Druck beanspruchte, stabilitätsgefährdete Bauteile sind zusätzlich zu den Tragfähigkeitsnachweisen Stabilitätsnachweise zu führen (Knicken, Biegedrillknicken, Beulen). Nachweisverfahren gegen Knicken und Biegedrillknicken sind in DIN EN 1993-1-1 angegeben. Beulnachweise sind in DIN EN 1993-1-5 geregelt.

### Normen

- DIN EN 1993-1-1:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009
- DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- DIN EN 1993-1-5:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-5:2006 + AC:2009
- DIN EN 1993-1-5/NA:2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile

### Literatur

- Schneider, K.-J., Goris, A., Albert, A.: Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 19. Aufl. Köln: Werner Verlag 2010.
- Stranghöner, N.: Stahlbau im Blick. Das Handbuch für den Stahlbau. 1. Aufl. Düsseldorf: Stahlbau-Verl.-und-Service-GmbH 2010.
- Wagenknecht, G.: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3 – Band 1: Tragwerksplanung – Grundlagen, 4. vollst. überarbeitete Aufl. Berlin: Bauwerk Verlag 2011. Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung