

**Die Formelsammlungen sind teilweise stark veraltet (Vorlesungsinhalte aus vergangenen Semestern, alte Normen...) und sollten lediglich als Hilfestellung zum Verfassen eigener Formelsammlungen dienen. Kontrolliert auf jeden Fall die Formeln, es haben sich auch Fehler eingeschlichen.**

# Grundlagen des Stahlbaus

## Formelsammlung

Jan Höffgen

2. Mai 2014

Diese Zusammenfassung wurde auf der Basis der Bachelor-Vorlesung  
*Grundlagen des Stahlbaus*  
und der zugehörigen Übung im WS 2012/13 erstellt.

Verweise in *Schneider Bautabellen für Ingenieure* beziehen sich auf die 19. Auflage.

Kein Anspruch auf Vollständigkeit oder Fehlerfreiheit.  
Wer einen Fehler findet, melde ihn mir bitte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Allgemeines</b>	<b>3</b>
1.1 Stahlsorten . . . . .	3
1.2 Beanspruchungen . . . . .	3
1.3 Beanspruchbarkeit . . . . .	3
<b>2 Einstufung von Querschnitten</b>	<b>3</b>
2.1 Klassifizierung . . . . .	3
2.2 Grenzmomente . . . . .	3
2.2.1 Elastisches Widerstandsmoment . . . . .	3
2.2.2 Plastisches Widerstandsmoment . . . . .	4
<b>3 Tragsicherheitsnachweise</b>	<b>4</b>
3.1 Zugstäbe . . . . .	4
3.2 Biegebeanspruchte Bauteile ohne Stabilitätsgefährdung . . . . .	4
3.2.1 Spannungsnachweise für Querschnitte der QK 3 . . . . .	4
3.2.2 Querschnittsnachweis für QK 1,2,3 . . . . .	5
<b>4 Schraubenverbindungen</b>	<b>5</b>
4.1 Kategorien und Festigkeitsklassen . . . . .	5
4.2 Grenzwerte von Rand- und Lochabständen . . . . .	6
4.3 Beanspruchungsnachweise . . . . .	6
4.3.1 Schraubenkräfte beim Anschluss von Biegemomenten und Kräften . . . . .	6
4.3.2 Beanspruchung rechtwinklig zur Schraubenachse . . . . .	7
4.3.3 Beanspruchung in Richtung der Schraubenachse (Zug) . . . . .	8
4.3.4 Nachweise bei (biegesteifer) Verbindung zweier I-Träger . . . . .	8
<b>5 Verbindungen mit Schweißnähten</b>	<b>8</b>
5.1 Kehlnähte . . . . .	8
5.1.1 Tragfähigkeit von Kehlnähten - vereinfachtes Verfahren . . . . .	9
5.1.2 Schnittgrößenverteilung: Anschluss I-Profi . . . . .	9
5.2 Halskehlnähte von T- und I-Profilen . . . . .	9
<b>6 Stabilitätsgefährdete stabförmige Bauteile</b>	<b>9</b>
6.1 (Biege-) Knicken von Stäben unter zentrischer Druckbeanspruchung . . . . .	9
6.2 Biegedrillknicken bei reiner Momentenbelastung um $y$ . . . . .	10
6.2.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren im Hochbau . . . . .	10
6.2.2 Biegedrillknicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren . . . . .	11
6.3 Auf Biegung und Druck beanspruchte Bauteile . . . . .	12
6.3.1 Ersatzstabverfahren . . . . .	12
6.3.2 Nachweis mit Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung . . . . .	14
<b>7 Bestimmung des Schubmittelpunktes M mit der Querkraftmethode</b>	<b>16</b>
<b>8 Biegesteife Rahmenecken (Stirnplattenverbindungen)</b>	<b>17</b>

# 1 Allgemeines

## 1.1 Stahlsorten

- Charakteristische Festigkeitswerte für Baustähle mit  $t \leq 40\text{mm}$  (S8.4)

	$f_y \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right]$	$f_u \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right]$	$E \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right]$	$\tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$
S235	235	360	210 000	135.68
S355	355	490	210 000	204.96
S450	440	550	210 000	254.03
S460	460	540	210 000	265.58

## 1.2 Beanspruchungen

- Lastkombination:  $E_d = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} \oplus \gamma_P P_k \oplus \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$  (S3.4)
- $\gamma_G = 1.35$ ,  $\gamma_Q = 1.5$  (ungünstige Auswirkungen) (S3.5)
- $\psi_{0,Wind} = 0.6$ ,  $\psi_{0,Schnee, < 1000m} = 0.5$ ,  $\psi_{0,Nutzlast} = 0.7$  (S3.5)
- Grenzzustand der Gebrauchtauglichkeit:  $\gamma_i = 1.0$
- Außergewöhnliche Kombination:  $E_{d,A} = \sum_j G_{kj} \oplus P_k \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$

## 1.3 Beanspruchbarkeit

- Beanspruchbarkeiten aus den Widerstandsgrößen:  $f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_{Mi}}$ ,  $f_{u,d} = \frac{f_{u,k}}{\gamma_{Mi}}$  (S8.7)

Bemessungssituation	$\gamma_{M0}$	$\gamma_{M1}$	$\gamma_{M2}$
Ständige & vorübergehende Bemessungssituation	1.00	1.10	1.25
Außergewöhnliche Bemessungssituation	1.00	1.00	1.15

- $\gamma_{M0}$ : Beanspruchbarkeit von Querschnitten
- $\gamma_{M1}$ : Beanspruchbarkeit bei Stabilitätsversagen
- $\gamma_{M2}$ : Beanspruchbarkeit von Querschnitten bei Bruchversagen infolge Zugbeanspruchung

# 2 Einstufung von Querschnitten

## 2.1 Klassifizierung

- Genormte Träger der Stahlsorten S235, S275, S355, S460: Ablesen der Querschnittsklasse aus Schneider S. 8.73 ff
- Sonst: Berechnung über Abmessungen (S8.165 ff): Schneider S. 8.9

## 2.2 Grenzmomente

### 2.2.1 Elastisches Widerstandsmoment

1. Bestimmung des Schwerpunkts:  $z_s = \frac{\sum A_i \cdot z_{si}}{\sum A_i}$  (einheitliche Stahlsorte)
2. Bestimmung von  $I_y$
3. Bestimmung von  $W_{el} = \frac{I_y}{z_{\max}}$
4. Elastisches Grenzmoment:  $M_{y,el,Rd} = f_{yd} \cdot W_{el,y}$

### 2.2.2 Plastisches Widerstandsmoment

- Plastische Nulllinie = Flächenhalbierende (eine Stahlsorte)
- Bestimmung der plastischen Nulllinie (verschiedene Stahlsorten)
  1. Annahme NL im Steg → Koordinate  $\tilde{x}$  ab Flanschunterkante
  2. idealisierten Spannungsverlauf (Rechtecke für Druck, Zug mit Höhe  $h_i = f_{y d, i}$ ) zeichnen
  3. Kräftegleichgewicht:  $\sum F_{Zug} = \sum F_{Druck}$  mit  $\sum F_i = \sum A_i(x) \cdot f_{y d, i}$
- Berechnung der Momente der Querschnittabschnitte in Tabelle:
 

i	$f_{y d, i}$	$A_i$	$F_i = A_i \cdot f_{y d, i}$	$z_i$ (Hebelarm)	$M_i = F_i \cdot z_i$
- Plastisches Widerstandsmoment:  $M_{pl, y, Rd} = \sum M_i$

## 3 Tragsicherheitsnachweise

### 3.1 Zugstäbe

- $N_{t, Rd} = \min\{N_{pl, Rd}, N_{u, Rd}\}$ 
    - Nachweis im Bruttoquerschnitt:  $N_{pl, Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
    - Nachweis im Nettoquerschnitt:  $N_{u, Rd} = \frac{0.9 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ 
      - \* Nachweis im Nettoquerschnitt kann entfallen, wenn  $\frac{A}{A_{net}} < 0.72 \frac{f_{u, k}}{f_{y, k}}$
    - Winkelprofile mit einschenkligem Anschluss (S8.15)
      - \*  $N_{pl, Rd}$  muss nicht berechnet werden
      - \* 1 Schraube:  $N_{u, Rd} = \frac{2.0 \cdot (e_2 - 0.5 d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$
      - \* 2 Schrauben:  $N_{u, Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$
      - \* 3+ Schrauben:  $N_{u, Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ 
        - o  $d_0$ : Lochdurchmesser,  $e$ : Abstand Lochmittelpunkt - Rand,  $p$ : Abstand Lochmittelpunkt - Lochmittelpunkt; 1:  $\parallel$  Stabachse, 2:  $\perp$  Stabachse
- |             | $p_1 \leq 2.5 \cdot d_0$ | $2.5 \cdot d_0 < p_1 < 5.0 \cdot d_0$                         | $p_1 \geq 5.0 \cdot d_0$ |
|-------------|--------------------------|---|--------------------------|
| o $\beta_2$ | 0.4                      | $0.4 + \frac{0.3}{2.5 \cdot d_0} \cdot (p_1 - 2.5 \cdot d_0)$ | 0.7                      |
| $\beta_3$   | 0.5                      | $0.5 + \frac{0.2}{2.5 \cdot d_0} \cdot (p_1 - 2.5 \cdot d_0)$ | 0.7                      |
- o ungleichschenklige Winkel: Berechnung mit Nettofläche eines entsprechenden Winkelprofils mit einer Schenkellänge gleich der kleineren Schenkellänge

### 3.2 Biegebeanspruchte Bauteile ohne Stabilitätsgefährdung

- keine äußeren Druck-Normalkräfte vorhanden
- Knicken und Biegedrillknicken sind ausgeschlossen

#### 3.2.1 Spannungsnachweise für Querschnitte der QK 3

- bei konservativer Berechnung auch für QK 1 und 2 anwendbar
- Nachweis der maximalen Normalspannung:  $\left| \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} \cdot z - \frac{M_z}{I_z} \cdot y \right| \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$
- Nachweis der maximalen Schubspannung (bei einachsiger Biegung um  $y$ :  $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$ )
  - Beanspruchung:  $\tau_{Ed}(z) = \frac{V_{z, Ed} \cdot S_y(z)}{I_y \cdot t_w} \Rightarrow \max \tau_{Ed} = \frac{V_{z, Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t_w}$ 
    - \* für I- und H-Profile:  $\max \tau_{Ed} = \frac{V_{z, Ed}}{A_w} = \frac{V_{z, Ed}}{h_w \cdot t_w}$  (falls  $\frac{A_f}{A_w} \geq 0.6$ ),  $A_w$ : Fläche des Steges
    - \* für Rechteckquerschnitte:  $\max \tau_{Ed} = 1.5 \cdot \frac{V_{z, Ed}}{A}$  mit  $A = b \cdot t$

- Beanspruchbarkeit:  $\tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$
- Nachweis über das Fließkriterium (wenn in einem Querschnitt Normal- und Schubkräfte vorliegen)
  - $\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3 \cdot \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1.0$ 
    - \* Sonderfall:  $\sigma_{z,Ed} = 0 \Rightarrow$  Vergleichsspannung  $\sigma_{v,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} \stackrel{?}{\leq} \sigma_{Rd}$
  - Vergleichsspannungsnachweis an der maßgebenden Stelle längs des Trägers und dort an der maßgebenden Stelle des Trägers
    - \* Wenn nicht ermittelbar, wo die maximalen Spannungen auftreten, (konservativ) vereinfacht mit beiden Maxima rechnen

**3.2.2 Querschnittsnachweis für QK 1,2,3**

- Allgemeiner Nachweis für QK 1,2,3:  $\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1.0$  (S8.14)
  - QK3: Elastische Randmomente, QK 1,2: plastische Randmomente (S8.73f)
  - Bedingungen:  $V_{Ed} < 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$  und Schubbeulen nicht maßgebend  $\left(\frac{h_w}{t_w} < 72 \frac{\varepsilon}{\eta}\right)$ 
    - \*  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
    - \*  $\eta = 1.2$  für Anwendungen des Hochbaus für Stahlgüten bis S460,  $\eta = 1.0$  für Anwendungen des Brückenbaus und Stahlgüten höher als S460

**4 Schraubenverbindungen**

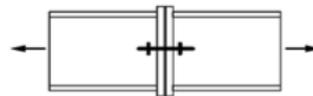
**4.1 Kategorien und Festigkeitsklassen**

- Kategorienbeschreibung und -nachweise: S8.52

Bez.	Kategorie	Schraubenfestigkeitsklasse	
A	Scher-/Lochleibungsverbindung	4.6 – 10.9	
B	Gleitfeste Verbindung im GZG	8.8 – 10.9	
C	Gleitfeste Verbindung im GZT	8.8 – 10.9	
D	Zugverbindung nicht vorgespannt	4.6 – 10.9	
E	Zugverbindung vorgespannt	8.8 – 10.9	



Scher-/Lochleibungsverbindung (Kategorie A)



Zugverbindung (Kategorie D und Kategorie E)

Festigkeitsklasse	4.6	5.6	8.8	10.9	a.b
Streckgrenze $f_{yb}$	240	300	640	900	$a \cdot b \cdot 10 \left[\frac{N}{mm^2}\right]$
Zugfestigkeit $f_{ub}$	400	500	800	1000	$a \cdot 100$

## 4.2 Grenzwerte von Rand- und Lochabständen

1. Bestimmung des Lochdurchmessers:  $d_0 = d + \Delta d$  (S8.54)

Lochart	Schraubengröße							
	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
normal	1 mm	2 mm				3 mm		

$d_0 = d + \Delta d$   
 $d_0 =$  Lochdurchmesser  
 $d =$  Schaft- bzw. Gewindedurchmesser  
 $\Delta d =$  Nennlochspiel (DIN EN 1090-2, Tabelle 11)

2. Überprüfung der Rand- und Lochabstände (S8.53, auch versetzte Lochanordnung)

Rand – und Lochabstände	Minimum (red. Lochleibungs-Tragfähigkeit)	Minimum (max. Lochleibungs-Tragfähigkeit)	Maximum
$p_1$	$\geq 2,2 \cdot d_0$	$\geq 3,75 \cdot d_0$	$\leq 14 \cdot t$ $\leq 200 \text{ mm}$
$e_1$	$\geq 1,2 \cdot d_0$	$\geq 3,0 \cdot d_0$	$\leq 4 \cdot t + 40 \text{ mm}$
$e_2$	$\geq 1,2 \cdot d_0$	$\geq 1,5 \cdot d_0$	$\leq 4 \cdot t + 40 \text{ mm}$
$p_2$	$\geq 2,4 \cdot d_0$	$\geq 3,0 \cdot d_0$	$\leq 14 \cdot t$ $\leq 200 \text{ mm}$

-  $t$  ist die Dicke des dünnsten außen liegenden Blechs.  
 - keine Beschränkung der Maximalwerte für Rand- und Lochabstände, außer:  
 • bei druckbeanspruchten Bauteilen zur Verhinderung des lokalen Beulens  
 • zur Vermeidung von Korrosion von Bauteilen, die dem Wetter oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt sind  
 • bei zugbeanspruchten Bauteilen zur Vermeidung von Korrosion  
 - lokales Beulen braucht nicht nachgewiesen werden, wenn  $p_1/t < 9\epsilon$

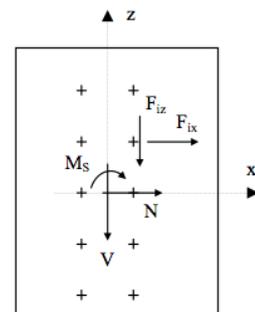
- Minimalwerte der Lochabstände für Schraubengrößen bei paralleler Anordnung

[mm]	$d_0$	$p_1$		$p_2$		$e_1$		$e_2$	
		red. LL	max. LL						
M12	13	28,6	48,8	31,2	39,0	15,6	39,0	15,6	19,5
M16	18	39,6	67,5	43,2	54,0	21,6	54,0	21,6	27,0
M20	22	48,4	82,5	52,8	66,0	26,4	66,0	26,4	33,0
M22	24	52,8	90,0	57,6	72,0	28,8	72,0	28,8	36,0
M24	26	57,2	97,5	62,4	78,0	31,2	78,0	31,2	39,0
M27	30	66,0	112,5	72,0	90,0	36,0	90,0	36,0	45,0
M30	33	72,6	123,8	79,2	99,0	39,6	99,0	39,6	49,5
M36	39	85,8	146,3	93,6	117,0	46,8	117,0	46,8	58,5

## 4.3 Beanspruchungsnachweise

### 4.3.1 Schraubenkräfte beim Anschluss von Biegemomenten und Kräften

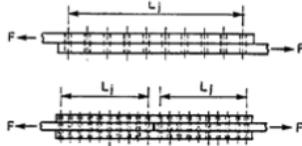
- Schraubenkräfte sind in den äußeren Schrauben am größten
- Beanspruchung in x-Richtung:  $F_{ix} = \frac{N}{n} + \frac{z_i}{\sum r_i^2} \cdot M_s$
- Beanspruchung in z-Richtung:  $F_{iz} = \frac{V}{n} + \frac{x_i}{\sum r_i^2} \cdot M_s$ 
  - $n$  Schrauben,  $r_i$ : Abstand der Schraube  $i$  vom Schwerpunkt der Schraubengruppe ( $r_i^2 = x_i^2 + z_i^2$ ),  $x_i, z_i$ : Abstand der Schraube  $i$  in x/z-Richtung vom SP
- Schraubenkraft in der Schraube  $i$ :  $F_i = \sqrt{F_{ix}^2 + F_{iz}^2}$



## 4.3.2 Beanspruchung rechtwinklig zur Schraubenachse

## • Versagen durch Abscheren

- Beanspruchbarkeit je Scherfuge:  $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_{(s)}}{\gamma_{M2}}$ 
  - \* Schaft der Schraube in Scherfuge: Schaftquerschnittsfläche  $A$ ,  $\alpha_v = 0.6$
  - \* Gewinde der Schraube in Scherfuge: Spannungsquerschnittsfläche  $A_s$ ,  $\alpha_v = 0.6$  für SFK 4.6, 5.6, 8.8,  $\alpha_v = 0.5$  für SFK 10.9
- Nachweis:  $\frac{F_{v,Ed}}{n \cdot m \cdot F_{v,Rd}} \leq 1$  ( $n$  Schrauben,  $m$  Scherfugen)
- einfacher: S8.54, Tafel 8.54c
- Lange Anschlüsse
  - \* Für  $L_j > 15 \cdot d$ : Abminderung der Abschertragfähigkeit aller Verbindungsmittel mit Faktor  $\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15 \cdot d}{200 \cdot d}$ ,  $0.75 \leq \beta_{Lf} \leq 1.0$



## • Versagen durch Lochleibung

- Beanspruchbarkeit  $F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$

	In Krafrichtung	Quer zur Krafrichtung
am Rand liegende Schrauben	$\alpha_b = \min \left\{ \left( \frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left( \frac{f_{ub}}{f_u} \right); 1,0 \right\}$	$k_1 = \min \left\{ \left( \frac{2,8 \cdot e_2}{d_0} - 1,7 \right); \left( \frac{1,4 \cdot p_2}{d_0} - 1,7 \right); 2,5 \right\}$
Innen liegende Schrauben	$\alpha_b = \min \left\{ \left( \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} \right); \left( \frac{f_{ub}}{f_u} \right); 1,0 \right\}$	$k_1 = \min \left\{ \left( \frac{1,4 \cdot p_2}{d_0} - 1,7 \right); 2,5 \right\}$

Bei großem statt normalem Lochspiel ist die Lochleibungstragfähigkeit mit dem Faktor 0,8 abzumindern.

- \* Sonderfall: einschnittig, ungestützte Verbindung:  $F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$
- Nachweis:  $\frac{F_{v,Ed}}{\sum_{i>1} F_{b,Rd,i}} \leq 1$
- bei schräg angreifenden Schraubenkräften: Nachweis für Kraftkomponenten parallel und senkrecht zum Rand
- besser: Ablesen aus S8.57 (normales Lochspiel), S8.58 (Passschrauben) → Anwendbarkeit nachweisen, je nach Stahlsorte und Dicke anpassen (Tabellenwert für 10mm Bauteildicke, S 235) (S8.56)

## • Nachweis der verschraubten Bauteile bei reiner Zugbeanspruchung: siehe Abschnitt 3.1

## • Blockversagen einer Schraubengruppe (S8.60)

- Symmetrisch angeordnete Schraubengruppe unter zentrischer Belastung:  $V_{eff1,Rd} = \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$
- Schraubengruppe unter exzentrischer Belastung:  $V_{eff2,Rd} = 0,5 \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$ 
  - \*  $A_{nt}$ : zugbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche
  - \*  $A_{nv}$ : schubbeanspruchte Nettoquerschnittsfläche

### 4.3.3 Beanspruchung in Richtung der Schraubenachse (Zug)

- Reine Zugbeanspruchung
  - Beanspruchbarkeit (Grenzzugkraft je Schraube):  $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ 
    - \*  $k_2 = 0.63$  für Senkschrauben,  $k_2 = 0.9$  sonst
    - \* besser: S8.55
  - Nachweis:  $\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1$
- Interaktionsnachweis bei Beanspruchung durch Zug und Abscheren:  $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$
- Durchstanzen
  - Beanspruchbarkeit (Grenzdurchstanzkraft je Schraube):  $B_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ 
    - \* besser: S8.55, an Blechdicke anpassen
    - \*  $d_m$ : Mittelwert aus Eckmaß  $\min e$  und Schlüsselweite  $s$  des Schraubenkopfes oder der Mutter
    - \*  $t_p$ : Blechdicke unter dem Schraubenkopf oder der Mutter
  - Nachweis:  $\frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \leq 1$

### 4.3.4 Nachweise bei (biegesteifer) Verbindung zweier I-Träger

1. Schwerpunkt der Schraubengruppe (Symmetrieachsen oder Schwerpunktberechnung mit Fläche "1" pro Schraube)
2. Einwirkungen:  $N_d$ ,  $M_d$  über Flanschaschen aufgenommen,  $V_d$ ,  $M_s$  (aus Querkraft infolge Exzentrizität  $e$ ), über Steglaschen aufgenommen
3. Meistbeanspruchte Schraube in der Steglasche: Ecke des Randes mit Spannung aus Moment in Richtung der angreifenden Querkraft
  - Schraubenkraft: siehe Abschnitt 4.3.1
4. Normalkraft im Flansch:  $N_{res,d} = \frac{N_d}{2} \pm \frac{M_d}{h-t_f}$
5. Abscheren
6. Lochleibung (Steg: in Komponenten aufgeteilt)
7. Blockversagen im Steg
8. Nachweis der Steglaschen: Bestimmung von  $I_y$ ,  $W_y$ ,  $A_{net}$  (jeweils beide Bleche zusammen), Spannungsnachweise wie in 3.2.1
  - maximale Normalspannung mit  $M_S$
  - Schubspannung mit  $V_d$
  - Vergleichsspannungsnachweis
9. Nachweis der Flanschaschen

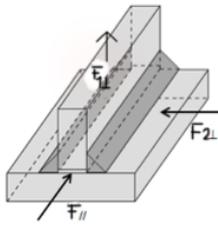
## 5 Verbindungen mit Schweißnähten

### 5.1 Kehlnähte

- Schweißnahtdicke  $a_w \geq \max\{3mm; \sqrt{\max t} - 0.5\}$
- Schweißnahtlänge  $l_w \geq \max\{30mm; 6 \cdot a_w\}$
- bei Überlappungsstößen:  $l_w \leq 150 \cdot a_w$
- wirksame Nahtlänge:  $l_{eff} = l_w$ , falls Nahtenden voll ausgeführt, sonst  $l_{eff} = l_w - 2a$
- wirksame Kehlnahtfläche  $A_w = \sum a_w \cdot l_{eff}$  (konzentriert in Wurzellinie angenommen)

5.1.1 Tragfähigkeit von Kehlnähten - vereinfachtes Verfahren

- Beanspruchung:  $N_{\perp,Ed} = \frac{F_{1\perp,Ed}}{l_w} \left[ \pm \frac{M_{Ed} \cdot 6}{l_{eff}^2} \right]$ ,  $V_{\perp,Ed} = \frac{F_{2\perp,Ed}}{l_w}$ ,  $V_{\parallel,Ed} = \frac{F_{\parallel,Ed}}{l_w}$   
 $\Rightarrow F_{w,Ed} = \sqrt{N_{\perp,Ed}^2 + V_{\perp,Ed}^2 + V_{\parallel,Ed}^2}$



- Widerstand  $F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \cdot a$  ( $F_{w,Rd}$  bzw. aus S8.68 bzw.  $\beta_w, f_u$  aus S8.67)
- Nachweis:  $F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$
- spannungsbasiertes Verfahren durch Division des kräftebasierten Verfahrens durch  $a_w$

5.1.2 Schnittgrößenverteilung: Anschluss I-Profi

- Nähte am Zugflansch:  $F_{\perp,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{y,Ed}}{h-t_f} \leq N_{pl,f,Rd} = \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
- Nähte am Druckflansch:  $F_{\perp,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{y,Ed}}{h-t_f} \leq N_{pl,f,Rd} = \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
- Nähte am Steg:  $F_{\parallel,Ed} = V_{z,Ed}$
- Über Spannungen besser:  $\sigma_{\perp,Ed,max} = \frac{M_{y,Ed}}{I_{w,y}} \cdot z_{max} \leq f_{vwd} = \sigma_{w,Rd}$  mit  $I_{w,y} = \frac{a \cdot l_{eff}^3}{12}$

5.2 Halskehlnähte von T- und I-Profilen

1. Bestimmung von  $S = A \cdot \text{Hebelarm}$  der angeschlossenen Gurtfläche (eine)
2. Bestimmung von  $I$  des Gesamtquerschnitts
3.  $\sigma_{w,Ed} = \tau_{\parallel} = \frac{V \cdot S}{I \cdot \sum a} \leq \sigma_{w,Rd}$

6 Stabilitätsgefährdete stabförmige Bauteile

6.1 (Biege-) Knicken von Stäben unter zentrischer Druckbeanspruchung

1. Bestimmung der Querschnittsklasse
2. Bestimmung der maßgebenden Haupttrichtung
  - Ausweichen rechtwinklig zu beiden Achsen
  - Ermittlung der Knicklängen  $L_{cr} = \beta_y \cdot L$  mit Knicklängenbeiwert  $\beta$

	$\beta = 2$	$\beta = 1$	$\beta = 0,7$	$\beta = 0,5$	$\beta = 1$
$N_{cr}$	$\frac{\pi^2 \cdot EI}{4 \cdot L^2}$	$\frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$	$\frac{\pi^2 \cdot EI}{0,49 \cdot L^2}$	$4 \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$	$\frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$
$L_{cr}$	2L	L	0,7L	0,5L	L

- Ermittlung des bezogenen Schlankheitsgrades  $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rd}}{N_{cr,Rd}}} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \lambda_1}$  mit Trägheitsbeiwert  $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$  (für Walzprofile:  $\bar{\lambda}$  aus S 8.26,  $i$  aus S 8.73)

Stahlgüte	S235	S275	S355	S420	S460
Materialbeiwert $\lambda_1$	93.9	86.8	76.4	70.2	67.1

- Zuordnung des Querschnitts zu einer Knicklinie (S 8.25)
- Ermittlung des Abminderungsfaktors  $\chi$ 
  - für  $\bar{\lambda} \leq 0.2$  :  $\chi = 1.0$
  - für  $\bar{\lambda} > 0.2$  :  $\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0$  mit  $\Phi = 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right]$  oder aus S 8.26

Knicklinie	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
$\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

- Maßgebende Hauptrichtung: Knicken um Achse mit kleinerem Abminderungsfaktor

3. Nachweis gegen Biegeknicken:  $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0$

- $N_{b,Rd} = \chi \cdot N_{pl,Rd} = \chi \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$  oder: ablesen von  $N_{b,Rd}$  aus S 8.27

## 6.2 Biegedrillknicken bei reiner Momentenbelastung um $y$

- Keine BDK-Gefährdung bei Hohlrohrprofilen und ausgesteiften I-Profilen

### 6.2.1 Vereinfachtes Nachweisverfahren im Hochbau

1. Ermittlung des Schlankheitsgrads  $\bar{\lambda}_f$  des druckbeanspruchten Flansches:  $\bar{\lambda}_f = \frac{k_c \cdot L_c}{i_{f,z} \cdot \lambda_1}$

Momentenverteilung	$k_c$
<p><math>\psi = 1</math></p>	1,0
<p><math>\max M</math> <math>\psi \cdot \max M</math></p> <p><math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

- $L_c$ : Abstand der seitlichen Abstützungen am Obergurt
- |                             |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| Stahlgüte                   | S235 | S275 | S355 | S420 | S460 |
| Materialbeiwert $\lambda_1$ | 93.9 | 86.8 | 76.4 | 70.2 | 67.1 |
- $i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{f,z}}{A_f + \frac{1}{3} \cdot A_{w,c}}}$  (gewalzte QS: S 8.73ff)
  - $I_{f,z}$ : Trägheitsmoment des Flansches um die schwache Achse des Gesamtquerschnitts
  - $A_f$ : Querschnittsfläche des druckbeanspruchten Flansches
  - $A_{w,c}$ : Querschnittsfläche des druckbeanspruchten Teil des Steges

2. Keine BDK-Gefährdung, wenn  $\bar{\lambda}_f \leq \bar{\lambda}_{c0} \cdot \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}$

- Grenzschlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_{c0} = 0.5$

- $M_{c,Rd} = \frac{W_y \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$  ( $W_{y,el}$  oder  $W_{y,pl}$  in Abhängigkeit der QK)

3. vereinfachter Nachweis des Druckgurtes auf Knicken mit  $\bar{\lambda}_f$  anstatt  $\bar{\lambda}_{LT}$ :  $M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd}$

- $M_{b,Rd} = k_{fl} \cdot \chi \cdot M_{c,Rd} \leq M_{c,Rd}$  (Walzprofile, S235: Ablesen aus S 8.36f)
  - Anpassungsfaktor  $k_{fl} = 1.1$
  - $\chi$  mit  $\bar{\lambda}_f$  aus Knicklinien: (S 8.26)
    - \* geschweißte Träger: KL d und zusätzlicher NW, dass  $\frac{h}{t_f} \leq 44 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
    - \* für alle anderen Fälle KL c
- Wenn nicht erfüllt, Ersatzstabverfahren (S 8.33f)

### 6.2.2 Biegedrillknicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren

1. ideales Biegedrillknickmoment:  $M_{cr} = \zeta \cdot \underbrace{\frac{\pi^2 \cdot EI_z}{l^2}}_{N_{cr,z}} \cdot \left( \sqrt{c^2 + 0.25 \cdot z_p^2} + 0.5 \cdot z_p \right)$  (nur für Einfeldträger

mit beidseitiger Gabellagerung bei doppelsymmetrischem, gleichbleibendem Querschnitt)

- $\zeta$ : Momentenbeiwert

Momentenverlauf				
$\zeta$	1,00	1,12	1,35	1,77 - 0,77 · $\psi$

- $z_p$ : Abstand des Angriffspunktes einer Querlast vom Querschnittsschwerpunkt (auf der Biegezugseite positiv)
- $l$ : Abstand der Gabellager
- $c^2 = \frac{I_w + 0.039 \cdot l^2 \cdot I_T}{I_z}$ : Quadrat des Drehradius
- $I_w, I_T$ : Wölb-/Torsionsflächenmoment 2. Grades (ablesen oder gegeben)
- Vereinfachend für Trägerhöhen  $h \leq 600mm$ :  $M_{cr} = 1.32 \cdot b \cdot t \cdot \frac{EI_y}{l \cdot h^2}$

2.  $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$

3. Ablesen von  $\chi_{LT}$  aus Schneider Tabelle 8.35; wahlweise für

(a) Biegedrillknicken gewalzter QS oder gleichartiger geschweißter QS ( $\chi_{LT} \leq \min\{1.0; 1/\bar{\lambda}_{LT}^2\}$ )

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

– Wenn  $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4$  oder  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2 = 0.16$  kein BDK-Nachweis erforderlich

(b) Biegedrillknicken für den allgemeinen Fall ( $\chi_{LT} \leq 1.0$ )

Querschnitt	Grenzen	Knicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
andere Querschnitte	—	d

– Wenn  $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{LT,0} = 0.2$  oder  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq \bar{\lambda}_{LT,0}^2 = 0.04$ , kein BDK-Nachweis erforderlich

- Optional:  $\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \leq \min\{1.0; \bar{\lambda}_{LT}^{-2}\}$  mit  $f = 1 - 0.5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.89^2)] \leq 1.0$
- 4.  $M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$  (Walzprofile, S235: Ablesen aus S 8.36f)
- 5. NW:  $M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd}$

### 6.3 Auf Biegung und Druck beanspruchte Bauteile

- Berücksichtigung der Auswirkungen aus Theorie II. Ordnung nicht erforderlich, wenn  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0.1$  oder  $\frac{n_{Ed} \cdot w'(x)}{M'(x)} \leq 0.1$

#### 6.3.1 Ersatzstabverfahren

1. Bestimmung der Querschnittsklasse (Abschnitt 2.1)
2. Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung:  $M_{Ed,max}, N_{Ed,max}$  (Maßgebende Beanspruchungen)
3. Stabilitätsnachweis der Stütze
  - Einachsige Biegung mit Druckkraft
    - $\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$
    - $\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$
  - Zweiachsige Biegung mit oder ohne Druckkraft
    - $\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$
    - $\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}/\gamma_{M1}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}/\gamma_{M1}} \leq 1$
    - $\Delta M = 0$  für QK 1/2/3
4. Werte ausschließen, z.B. keine BDK-Gefährdung, Fußnoten beachten!
5. Charakteristische Werte der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der QK:  $N_{Rk} = f_y \cdot A$ ;  $M_{[y/z],Rk} = f_y \cdot W_{[y/z]}$ 
  - Für QK 1/2:  $W = W_{pl}$ , QK 3:  $W = W_{el}$
  - Bemessungs-Tabellenwerte ( $Rd$ ) entsprechen charakteristischen Werten, da  $\gamma_{M0} = 1.0$
6. Zuordnung des Querschnitts zu einer Knicklinie (S 8.25)
7. Bestimmung der Abminderungsfaktoren  $\chi_{[y/z]}$  für Biegeknicken in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{[y/z]} = \frac{L_{cr,[y/z]}}{i_{[y/z]} \cdot \lambda_1}$  aus Schneider S. 8.26
  - |                             |      |      |      |      |      |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|
| Stahlgüte                   | S235 | S275 | S355 | S420 | S460 |
| Materialbeiwert $\lambda_1$ | 93.9 | 86.8 | 76.4 | 70.2 | 67.1 |
8. Bestimmung des Abminderungsfaktors  $\chi_{LT}$  aus  $\bar{\lambda}_{LT}$  für BDK-KL mit Schneider Tabelle 8.35 (siehe Abschnitt 6.2.2)

9. Bestimmung der Interaktionsbeiwerte  $k_{ij}$

- verdrehsteife Bauteile (Hohlrohrprofile oder ausgesteifte Querschnitte) [Tabelle B.1]

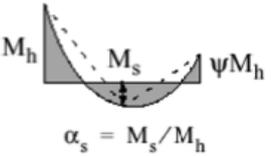
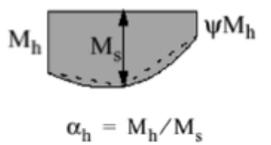
Bemessungsannahmen			
Interaktionsbeiwerte	Art des Querschnitts	elastische Querschnittswerte der Klasse 3, Klasse 4	plastische Querschnittswerte der Klasse 1, Klasse 2
$k_{yy}$	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	$C_{my} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
$k_{yz}$	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	$k_{zz}$	$0,6 k_{zz}$
$k_{zy}$	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
$k_{zz}$	I-Querschnitte	$C_{mz} \left( 1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left( 1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left( 1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left( 1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	rechteckige Hohlquerschnitte		$C_{mz} \left( 1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left( 1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$

Für I- und H-Querschnitte und rechteckige Hohlquerschnitte, die auf Druck und einachsige Biegung  $M_{y,Ed}$  belastet sind, darf der Beiwert  $k_{zy} = 0$  angenommen werden.

- verdrehweiche Bauteile (offene Querschnitte, deren Verdrehung nicht behindert ist)

Bemessungsannahmen		
Interaktionsbeiwerte	elastische Querschnittswerte der Klasse 3, Klasse 4	Plastische Querschnittswerte der Klasse 1, Klasse 2
$k_{yy}$	$k_{yy}$ aus Tabelle B.1	$k_{yy}$ aus Tabelle B.1
$k_{yz}$	$k_{yz}$ aus Tabelle B.1	$k_{yz}$ aus Tabelle B.1
$k_{zy}$	$\left[ 1 - \frac{0,05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[ 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$	$\left[ 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$  für $\bar{\lambda}_z < 0,4$ :  $k_{zy} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$
$k_{zz}$	$k_{zz}$ aus Tabelle B.1	$k_{zz}$ aus Tabelle B.1

- äquivalente Momentenbeiwerte  $c_m$

Momentenverlauf	Bereich		$C_{my}$ und $C_{mz}$ und $C_{mLT}$	
			Gleichlast	Einzellast
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
$-1 \leq \psi < 0$		$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1 + 2\psi)$	$\boxed{AC} 0,90 + 0,10\alpha_h(1 + 2\psi) \boxed{AC}$
Für Bauteile mit Knicken in Form seitlichen Ausweichens sollte der äquivalente Momentenbeiwert als $C_{my} = 0,9$ bzw. $C_{mz} = 0,9$ angenommen werden.				
$C_{my}$ , $C_{mz}$ und $C_{mLT}$ sind in der Regel unter Berücksichtigung der Momentenverteilung zwischen den maßgebenden seitlich gehaltenen Punkten wie folgt zu ermitteln:				
Momentenbeiwert	Biegeachse	In der Ebene gehalten		
$C_{my}$	y-y	z-z		
$C_{mz}$	z-z	y-y		
$C_{mLT}$	y-y	y-y		

- Wenn Bauteil nicht an beiden Enden gelagert (EF 1):  $c_m = 0.9$

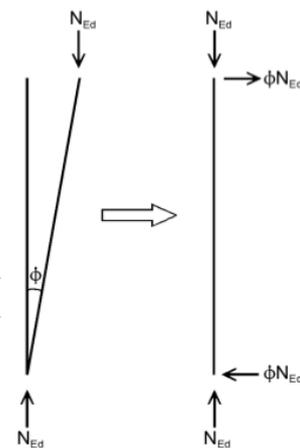
10. Nachweis (s. o.)

### 6.3.2 Nachweis mit Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung

1. Ansetzen von Imperfektionen und Ersatzlasten

- Vorverdrehung

- Vorverdrehung (für einteilige Stäbe):  $\phi = \frac{1}{200} \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$
- $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$  ( $h$  in [m]),  $\frac{2}{3} \geq \alpha_h \geq 1.0$
- $\alpha_m = \sqrt{0.5 \cdot (1 + \frac{1}{m})}$  ( $m$ : Anzahl der Stützen in einer Reihe, die eine Vertikalbelastung größer als 50% der durchschnittlichen Stützenlast tragen)



• Vorverkrümmung

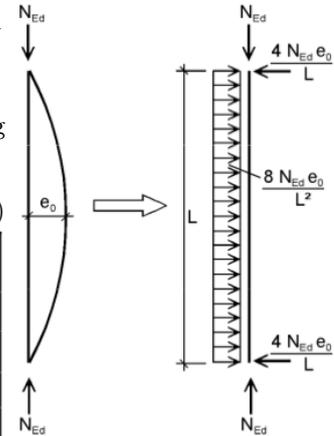
- Vorverkrümmung nur berücksichtigen, wenn mindestens ein Bauteilende eingespannt oder biegesteif verbunden ist und

$$\bar{\lambda} > 0.5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}$$

- \*  $\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \lambda_1}$  für die maßgebende Richtung, Berechnung von  $L_{cr} = 1 \cdot L$  (beidseitig gelenkig gelagert)

- Zuordnung des Querschnitts zu einer Knicklinie (S8.25)

Knicklinie nach Tabelle 6.2	elastische Berechnung	plastische Berechnung
	$e_{0,d}L$	$e_{0,d}L$
a <sub>0</sub>	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100



2. Berechnung der Auflagerkräfte und Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung mit Berücksichtigung der Imperfektionen  $\Rightarrow$  maßgebende Bemessungsbeanspruchung  $M_{[y/z],Ed}^I, V_{Ed}^I, N_{Ed}^I$

3. Berechnung des Dischinger-Faktors  $\alpha = \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,Rd}}}$

- $N_{cr,Rd} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{[y/z]}}{L_{cr,[y/z]}^2 \cdot \gamma_{M1}}$  (für die maßgebende Biegerichtung)

4. Berechnung der maßgebenden Bemessungsschnittgrößen nach Theorie II. Ordnung

- $N_{Ed}^{II} = N_{Ed}^I$
- $V_{Ed}^{II} = \alpha \cdot V_{Ed}^I$
- $M_{Ed}^{II} = \alpha \cdot M_{Ed}^I$

5. Nachweis Ausweichen in der Tragwerksebene = Spannungsnachweis (QK 3) [Abschnitt 3.2.1] bzw. Querschnittsnachweis (QK 1/2) [Abschnitt 3.2.2] mit Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung

- Spannungsnachweis: Nachweis der maximalen Normalspannung, Nachweis der maximalen Schubspannung, Vergleichspannungsnachweis

6. Nachweis Ausweichen senkrecht aus der Tragwerksebene (Biegeknicken) [Abschnitt 6.1]

7. Nachweis BDK am Einzelstab mit Schnittgrößen aus Theorie II. Ordnung [Abschnitt 6.2.1 bzw. 6.2.2]

## 7 Bestimmung des Schubmittelpunktes M mit der Querkraftmethode

**y-Koordinate des Schubmittelpunktes:**

- Sonderfall: y-Achse ist Symmetrieachse (d. h.  $z_s$  ist bekannt)

⇒ Schubmittelpunkt liegt auf y-Achse

**z-Koordinate des Schubmittelpunktes:**

- Sonderfall: z-Achse ist Symmetrieachse (d. h.  $y_s$  ist bekannt)

⇒ Schubmittelpunkt liegt auf z-Achse

### 1. Ermittlung der Koordinate des Schwerpunktes S

- $y_s = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}$

- $z_s = \frac{\sum A_i \cdot z_i}{\sum A_i}$

### 2. Ermittlung des Koordinate - Blechdicken - Verlaufes

- $z \cdot t$ -Verlauf bestimmen, d. h.  $z$ -Koordinate mal Blechdicke

- $y \cdot t$ -Verlauf bestimmen, d. h.  $y$ -Koordinate mal Blechdicke

### 3. Integrationsweg $s$ festlegen

- $s$ : Ortskoordinate
- Hauptweg festlegen
- Nebenwege führen zum Hauptweg hin
- Es gibt mehrere richtige Möglichkeiten

### 4. Ermittlung des statischen Momentes S

- Ermittlung aus  $z \cdot t$ -Verlauf:

- $S_y = \int z dA = \int z \cdot t ds$

- Freie Enden  $S_y(s) = 0$

- Ermittlung aus  $y \cdot t$ -Verlauf:

- $S_z = \int y dA = \int y \cdot t ds$

- Freie Enden  $S_z(s) = 0$

### 5. Ermittlung der resultierenden Schubkräfte $T^*$

- $T^* = \frac{V_z}{I_y} \cdot \int S_y ds$

- Schubkrafttrichtung:

- $S_y > 0 \Rightarrow T^*$  in Richtung  $+s$

- $S_y < 0 \Rightarrow T^*$  in Richtung  $-s$

- $T^* = \frac{V_y}{I_z} \cdot \int S_z ds$

- Schubkrafttrichtung:

- $S_z > 0 \Rightarrow T^*$  in Richtung  $+s$

- $S_z < 0 \Rightarrow T^*$  in Richtung  $-s$

### 6. Momentengleichgewicht $\sum M = 0$

(d. h. wenn diese Bedingung erfüllt ist, greift Querkraft  $V_z$  bzw.  $V_y$  im Schubmittelpunkt an)

- Momentengleichgewicht um beliebigen Punkt bilden (Punkt sinnvoll wählen, z. B. M) und dabei annehmen, dass Querkraft  $V_z$  in M angreift

⇒ Lage des Schubmittelpunktes M

- Momentengleichgewicht um beliebigen Punkt bilden (Punkt sinnvoll wählen, z. B. M) und dabei annehmen, dass Querkraft  $V_y$  in M angreift

⇒ Lage des Schubmittelpunktes M

## 8 Biegesteife Rahmenecken (Stirnplattenverbindungen)

- Bemessung von bündigen oder überstehenden Verbindungen mit jeweils zwei oder vier vertikalen Schraubenreihen (Typ IH 1-4)
- Nicht vergessen
  - Schweißnahtdicke  $a_w \geq \max\{3mm; \sqrt{\max t} - 0.5\}$
  - Schweißnahtlänge  $l_w \geq \max\{30mm; 6 \cdot a_w\}$

### 1. Schnittgrößenberechnung

(a) Zugkraft im Obergurt:  $Z_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{h-t_f} + \frac{N_{Ed}}{2}$  (Vorzeichen beachten)

(b) Druckkraft im Untergurt:  $D_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{h-t_f} - \frac{N_{Ed}}{2}$

(c) Querkraft:  $V_{Ed}$

### 2. Zugkraft $Z_{Ed}$ im Obergurt

#### (a) Anschluss Flansch-Riegel-Stirnplatte mit Kehlnähten (vgl. Abschnitt 5.1.1)

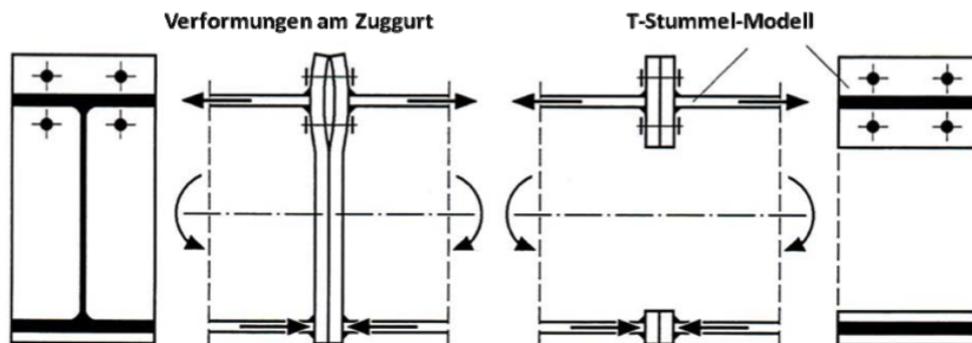
- Bestimmung der effektiven Kehlnahtlänge  $l_{eff}$
- Bestimmung von  $\sigma_{w,Rd} = f_{vw,d}$  aus S8.68b
- $\sigma_{\perp,Ed} = \frac{Z_{Ed}}{A_{w,F}} = \frac{Z_{Ed}}{l_{eff} \cdot a_F} \leq \sigma_{w,Rd} \rightarrow a_{F,erf}$

#### (b) Schrauben auf Zug

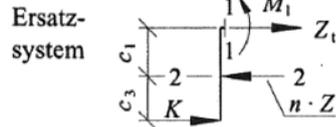
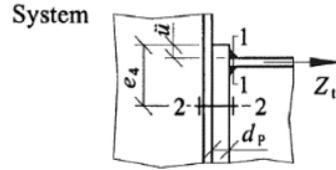
- Ermittlung der Kraft pro Schraube:  $F_{t,Ed} = \frac{Z_{Ed}}{n}$
- Wahl der Schraube aus S8.55a (Kat. E (vorgespannt))  $\rightarrow$  SFK 8.8 oder 10.9
- $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$

#### (c) Stirnplatte

- Stirnplatte biegt sich aufgrund der Belastung durch  $\rightarrow$  Berechnung des Biegemoments mit Ersatzsystem



Bündige Stirnplatte  
(Typ 1&2)

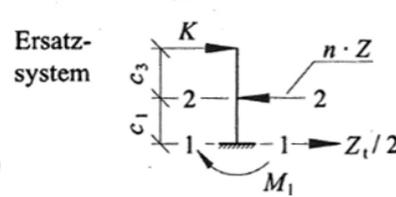
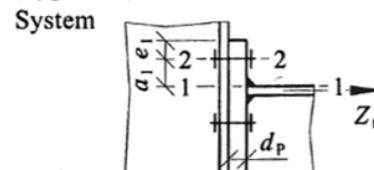


$$c_1 = e_4 - \ddot{u} - t - (D/4 + d_p/2) > 0$$

$$c_3 = D/2 + d_p$$

$D$  Scheibenaußendurchmesser nach Tafel 8.82a  
 $n$  Schraubenzahl im betrachteten Schnitt

Überstehende Stirnplatte  
(Typ 3&4)



$$c_1 = a_1 - a_f \sqrt{2} / 3 - (D + d_p) / 4 > 0$$

$$c_3 = e_1$$

$$a_f \text{ Dicke der Flanschkehlnaht}$$

– Bei symmetrischer Zugschraubenanordnung: Kragarm

- Angreifende Lasten
  - Frei verdrehbare Ränder: Kontaktkraft  $K$
  - Maximale Schraubenkräfte  $F_{t,Rd,res} = m \cdot F_{t,Rd}$  ( $m$  vertikale Schraubenreihen)
  - Abhängig von Ersatzsystem  $Z_{Ed}$  oder  $\frac{1}{2}Z_{Ed}$  (bei Symmetrie)
- Ermittlung der Kontaktkraft  $K$  über  $\sum H = 0$
- Berechnung der wirksamen Schraubenabstände  $c_1, c_3$ 
  - $D$  (bzw.  $\varnothing$ ) Umfang der Unterlegscheibe (S8.61b)
  - $d_p / t_p$ : Stirnplattendicke
- Berechnung der einwirkenden Momente  $M_1 = K \cdot (c_1 + c_3) - F_{t,Rd,res} \cdot c_1$  an Flansch ,  
 $M_2 = K \cdot c_3$  an Schrauben
- Widerstand der Stirnplatte:  $M_{pl,y,Rd}$ 
  - Plastisches Widerstandsmoment an der Stelle 1:  $W_{pl,y,1} = \frac{b_p \cdot t_p^2}{4}$
  - Plastisches Widerstandsmoment an der Stelle 2:  $W_{pl,y,2} = \frac{b_p^* \cdot t_p^2}{4} = \frac{(b_p - m \cdot d_0) \cdot t_p^2}{4}$ 
    - \*  $t_p$ : Stirnplattendicke (gewählt)
    - \*  $b_p$ : Stirnplattenbreite
    - \*  $d_0$ : Schraubenlochdurchmesser (S8.54a)
  - $M_{pl,y,Rd,i} = \frac{W_{pl,y,i} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$
- Nachweis:  $M_i \leq M_{pl,Rd,i}$

(d) Durchstanzen der Schrauben

- Beanspruchung je Schraube:  $F_{t,Ed}$  (s. o.)
- Grenzdurchstanzkraft:  $B'_{p,Rd} = B_{p,Rd} \cdot \min\{t_p, t_{F,vertikal}\}$  (S8.55b)
- Nachweis:  $F_{t,Ed} \leq B'_{p,Rd}$

### 3. Druckkraft $D_{Ed}$ am Untergurt

#### (a) Nachweis der Schweißnaht am Untergurt

- Bestimmung der effektiven Kehlnahtlänge  $l_{eff}$  (s. o.)
- Bestimmung von  $\sigma_{w,Rd} = f_{vw,d}$  aus S8.68
- $\sigma_{\perp,Ed} = \frac{D_{Ed}}{A_{w,F}} = \frac{D_{Ed}}{l_{eff} \cdot a_F} \leq \sigma_{w,Rd} \rightarrow a_F$

#### (b) Schweißnähte Steifen-Stütze

- Berechnung der Schweißnähte für den höher belasteten Flansch, Übernahme des Wertes für den anderen Flansch

##### i. Nachweis Schweißnaht Stützenflansch-Steife

- Druckkraft je Steife:  $D_{Ed,i} = \frac{1}{2} D_{Ed}$
- Effektive Kehlnahtlänge:  $l_{eff,sf} = 2 \cdot \left( \frac{b_s - t_w}{2} - e_1 - e_2 \right)$ 
  - \* Geschweißter Träger: Abstand außen:  $e_1 \approx 10mm$ ,  
Abstand innen:  $e_2 \approx 10mm \geq a_{HK,Träger}$
  - \* Walzprofil:  $e_1 \approx 10mm$ ,  $e_2 \geq r$
- $\sigma_{\perp,Ed} = \frac{D_{Ed,i}}{l_{eff} \cdot a_{Steife}} \leq \sigma_{w,Rd} = f_{vw,d} \rightarrow a_{Steife,erf}$

##### ii. Schweißnaht Stützensteg-Steife

- Druckkraft je Steife:  $D_{Ed,i} = \frac{1}{2} D_{Ed}$
- Moment infolge Druckkraft:  $M = \frac{1}{2} D_{Ed} \cdot e$  mit  $e = e_2 + \frac{1}{4} l_{eff,sf}$
- Kehlnahtlänge:  $l_{eff,ss} = h_{Steife} - e_2 \leq h_1$
- Schätzen von  $a$
- Widerstand der Schweißnaht
  - \*  $A_w = 2 \cdot l_{eff,ss} \cdot a$
  - \*  $W_w = 2 \cdot \frac{a \cdot l_{eff}^2}{6}$
- $\tau_{||,Ed} = \frac{D_{Ed}}{2 \cdot A_w}$
- $\sigma_{\perp,Ed} = \frac{M}{W_w}$
- $\sigma_{w,Ed} = \sqrt{\sigma_{\perp,Ed}^2 + \tau_{||,Ed}^2}$
- Nachweis:  $\sigma_{w,Ed} \leq \sigma_{w,Rd} = f_{vw,d} \rightarrow a$  iterativ berechnen

#### (c) Wahl der Steifen

- $t \geq 2 \cdot \max a$  der Kehlnähte an der Steife

### 4. Querkraft $V_{Ed}$ am Riegelsteg

#### (a) Schweißnaht Riegelsteg-Stirnplatte

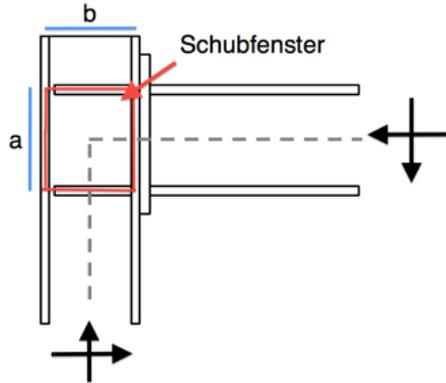
- $l_{eff,Steg} = 2 \cdot (h_{Steg} - 2 \cdot a_{HK,Träger}) = 2 \cdot (h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot r) \stackrel{bzw.}{=} 2 \cdot (h - 2 \cdot t_f - 2 \cdot a_F)$
- Nachweis:  $\tau_{||,Ed} = \frac{V_{Ed}}{l_{eff} \cdot a_{Steg}} \leq \sigma_{w,Rd} = f_{vw,d} \rightarrow a_{Steg,erf}$

#### (b) Schrauben im Druckbereich (siehe Abschnitt 4.3.2)

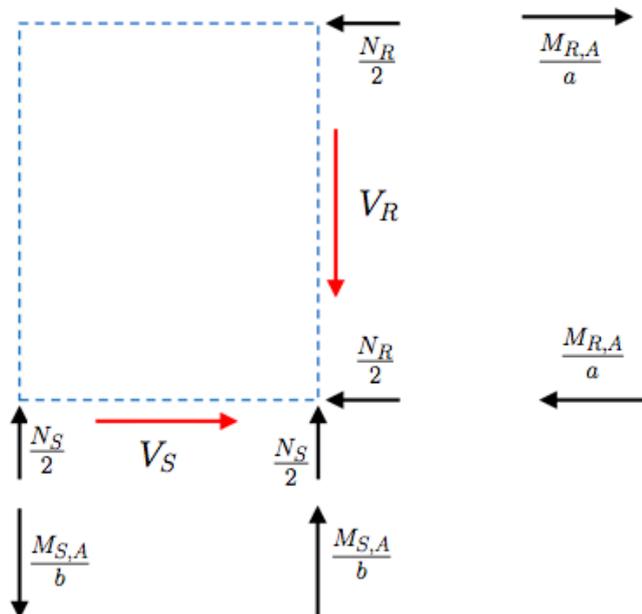
- Belastung:  $V_{Ed}$
- Abscheren:  $V_{Ed} \leq F_{v,Rd}$  (aus S8.54c je Schraube und Scherfuge)
- Lochleibung (S8.56f)
  - Überprüfung der Mindestabstände:  $e_2 \geq 1.5 \cdot d_0$ ,  $p_2 \geq 3.0 \cdot d_0$
  - Ablesen der Lochleibungsfestigkeit  $F_{b,Rd}$  je  $cm$  und Schraube (S8.57)
  - NW:  $V_{Ed} \leq n \cdot \min\{d_p; t_f, Stütze\} \cdot F_{b,Rd}$

5. Schubbeanspruchung des Eckblechs

- Abmessungen des Schubfensters: Höhe  $a = h_{Riegel} - t_{f,Riegel}$ , Breite  $b = h_{Stütze} - t_{f,Stütze}$



- Berechnung der Momente:  $M_{Riegel,A} = M_{Riegel} - V_{Riegel} \cdot \frac{b}{2}$ ,  $M_{Stütze,A} = M_{Stütze} - V_{Stütze} \cdot \frac{a}{2}$
- Schnittgrößen am Schubfeld



- Zusammenfassung der Schnittgrößen zu resultierenden (reinen) Schubkräften ( $R_o = R_u$ ,  $R_l = R_r$ )
- Berechnung des Schubflusses:  $T_o = T_u = \frac{R_o}{b}$ ,  $T_l = T_r = \frac{R_l}{a}$  [ $kN/cm$ ] ( $T_o = T_u = T_l = T_r$ )
- Berechnung der Schubspannung:  $\tau_{Ed} = \frac{T}{t_{w,Stütze}}$
- Schubwiderstand:  $\tau_{Rd} = \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$
- Nachweis:  $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd}$
- Vereinfachter Nachweis Beulsicherheit:  $\frac{a}{t_{w,Stütze}} \leq 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$ 
  - $a$ : Höhe des Eckblechs
  - $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
  - $\eta = 1.0$  für Anwendungen des Hochbaus für Stahlgüten bis S460,  $\eta = 1.2$  für Anwendungen des Brückenbaus und Stahlgüten höher als S460