F.3.1.3 Tri-lineares Modell

(1) Bei einem tri-linearen Modell mit Verfestigung [Bild F.2 a)] dürfen die folgenden Beziehungen angesetzt werden:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{für} \quad 0 < \varepsilon \le \varepsilon_p \tag{F.3}$$

$$\sigma = f_p + E_1 (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad \text{für} \quad \varepsilon_p < \varepsilon \le \varepsilon_e \tag{F.4}$$

$$\sigma = f_e + E_2 (\varepsilon - \varepsilon_e) \quad \text{für} \quad \varepsilon_e < \varepsilon \le \varepsilon_{uni} \tag{F.5}$$

Dabei ist

f_p die konventionelle elastische Proportionalitätsgrenze [siehe F.3.1.2(3)];

f_e die konventionelle Elastizitätsgrenze [siehe F.3.1.2(3)];

ε_p die zur Spannung f_p gehörende Dehnung;

ε_e die zur Spannung f_e gehörende Dehnung;

ε_{uni} die zur Zugfestigkeit f_{max} gehörende Dehnung;

E der Elastizitätsmodul;

E_1 der Verfestigungsmodul im ersten Verfestigungsbereich;

E_2 der Verfestigungsmodul im zweiten Verfestigungsbereich.

(2) Bei dem „ideal plastischen“ Modell [Bild F.2 b)] sollten plastische Verformungen ohne Verfestigung ($E_2 = 0$) im Dehnungsbereich von ε_e bis ε_{uni} betrachtet werden.

(3) Wenn die oben genannten Parameter nicht exakter bestimmt werden können, dürfen für die beiden in Bild F.2 a) und Bild F.2 b) dargestellten Modelle folgende Werte angenommen werden:

f_p $= f_{0,01}$;

f_e ist der Nennwert von f_o (siehe Abschnitt 5);

f_{max} ist der Nennwert von f_u (siehe Bild F.2 a) und Abschnitt 5) oder f_e [siehe Bild F.2 b)];

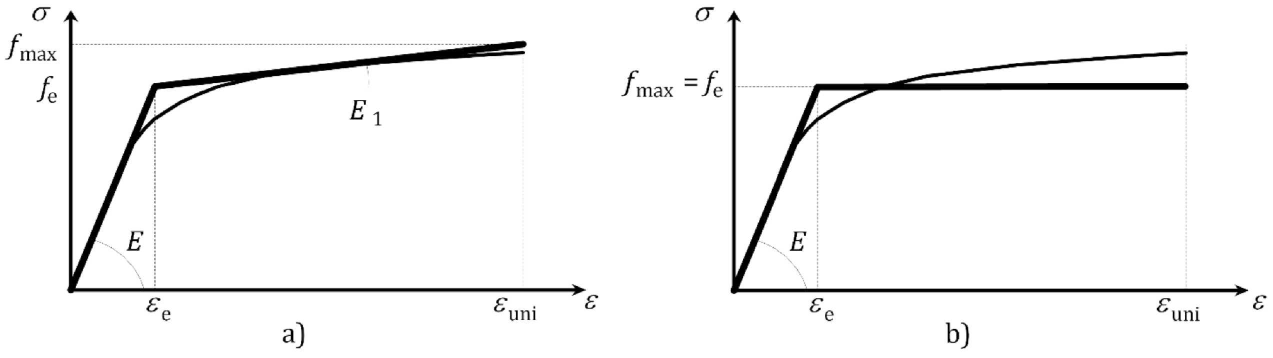
ε_{uni} $= 0{,}5\varepsilon_u$ (ungefähr);

ε_u ist der charakteristische Wert der Bruchdehnung, siehe Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4;

ε_p $= f_{0,01}/E$;

E_1 $= (f_e - f_p)/(\varepsilon_e - \varepsilon_p)$;

E_2 $= (f_{max} - f_e)/(\varepsilon e_{uni} - \varepsilon_e)$ in Bild F.2 a).

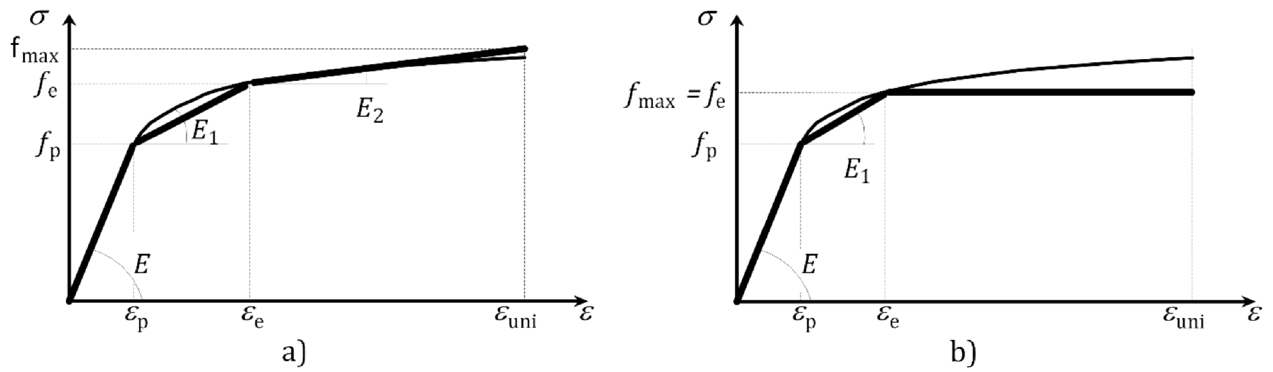


a) **b)**

Legende

f_e	konventionelle Elastizitätsgrenze [siehe F.3.1.2(3)]
f_{max}	Nennwert von f_u [siehe Bild F.2 a) und Abschnitt 5] oder von f_e [siehe Bild F.2 b)]
ε_{uni}	zur Zugfestigkeit f_{max} gehörende Dehnung
E_1	Verfestigungsmodul im ersten Verfestigungsbereich

Bild F.1 — Bi-lineare Modelle



a) **b)**

Legende

f_p	konventionelle elastische Proportionalitätsgrenze [siehe F.3.1.2(3)]
f_e	konventionelle Elastizitätsgrenze [siehe F.3.1.2(3)]
f_{max}	Nennwert von f_u [siehe Bild F.2 a) und Abschnitt 5] oder von f_e [siehe Bild F.2 b)]
ε_{uni}	zur Zugfestigkeit f_{max} gehörende Dehnung
ε_p	zur Spannung f_p gehörende Dehnung
E_1	Verfestigungsmodul im ersten Verfestigungsbereich
E_2	Verfestigungsmodul im zweiten Verfestigungsbereich

Bild F.2 — Tri-lineare Modelle

F.3.2 Kontinuierliche Modelle

F.3.2.1 Allgemeines

(1) Diese Modelle beruhen auf der Annahme, dass das Werkstoffgesetz (σ-ε-Gesetz) durch eine stetige Kurve beschrieben wird, die den elastischen, den inelastischen und den plastischen Bereich zusammen erfasst. Solche Modelle können normalerweise das verfestigende Werkstoffverhalten vollständig beschreiben.

(2) Aufgrund dieser Annahme darf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung allgemein beschrieben werden, entweder durch

— kontinuierliche Modelle der Form $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ oder

— kontinuierliche Modelle der Form $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$.

F.3.2.2 Kontinuierliche Modelle der Form $\sigma = \sigma(\varepsilon)$

(1) Wenn das Werkstoffgesetz $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ angesetzt wird, ist es hilfreich, drei getrennte Bereiche zu identifizieren, die auf folgende Weise definiert werden können [siehe Bild F.3 a)]:

— Bereich 1: elastisches Verhalten;

— Bereich 2: inelastisches Verhalten;

— Bereich 3: verfestigendes Verhalten.

(2) In jedem der drei Bereiche wird das Werkstoffverhalten durch andere Spannungs-Dehnungs-Beziehungen dargestellt, mit denen sich an den Übergangsstellen ein stetiger Verlauf ergeben muss. Entsprechend dieser Annahme darf die Spannungs-Dehnungs-Beziehung folgendermaßen dargestellt werden [Bild F.3 b)]:

Bereich 1 für $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p$ mit $\varepsilon_p = 0{,}5\bar{\varepsilon}_e$ und $\bar{\varepsilon}_e = f_e/E$

$$\sigma = E\varepsilon \tag{F.6}$$

Bereich 2 für $\varepsilon_p < \varepsilon \leq 1{,}5\,\bar{\varepsilon}_e$

$$\sigma = f_e\left(-0{,}2 + 1{,}85\frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}_e} - \left(\frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}_e}\right)^2 + 0{,}2\left(\frac{\varepsilon}{\bar{\varepsilon}_e}\right)^3\right) \tag{F.7}$$

Bereich 3 für $1{,}5\bar{\varepsilon}_e < \varepsilon \leq \varepsilon_{uni}$

$$\sigma = f_e\left(\frac{0{,}85f_{max}}{f_e} - \left(\frac{1{,}5f_o}{\varepsilon E}\right)^{0{,}25}\left(\frac{0{,}85f_{max}}{f_e} - 1\right)\right) + \frac{E}{100}\left(\varepsilon - \frac{1{,}5f_o}{E}\right) \tag{F.8}$$

Dabei ist

f_e die konventionelle Elastizitätsgrenze;

f_{max} die Zugspannung bei dem Maximum der σ-ε-Kurve;

ε_e die zur Spannung gehörende Dehnung $f_e(\varepsilon_e = 1{,}5\bar{\varepsilon}_e)$;

ε_{uni} die zur Spannung f_{max} gehörende Dehnung;

E der Elastizitätsmodul.

(3) Wenn die oben genannten Parameter nicht genauer ermittelt wurden, dürfen die folgenden Werte angenommen werden:

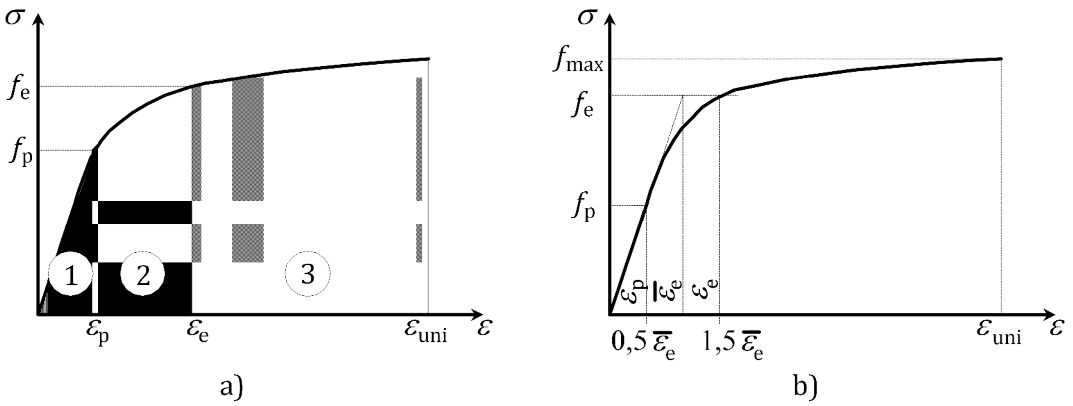
f_e ist der Nennwert von f_o (siehe Abschnitt 5);

f_{max} ist der Nennwert von f_u [siehe Bild F.1 a) und Abschnitt 5] oder von f_p [siehe Bild F.1 b)];

ε_{uni} $= 0{,}5\varepsilon_u$ (ungefähr);

ε_u ist der charakteristische Wert der Bruchdehnung, siehe Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4;

E ist der Nennwert des Elastizitätsmodul (siehe Abschnitt 5).



a) **b)**

Bild F.3 — Kontinuierliche Modelle der Form $\sigma = \sigma(\varepsilon)$

F.3.2.3 Kontinuierliche Modelle der Form $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$

(1) Für Aluminiumlegierungen kann die Spannungs-Dehnungs-Beziehung in der Form $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$ durch das Ramberg-Osgood-Modell beschrieben werden. Dieses Modell darf in folgender allgemeiner Form angegeben werden [siehe Bild F.4 a)]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{0,e}\left(\frac{\sigma}{f_e}\right)^n \tag{F.9}$$

Dabei ist

f_e die konventionelle Elastizitätsgrenze;

$\varepsilon_{o,e}$ als zur Spannung f_e gehörende bleibende Dehnung;

n der Exponent zur Charakterisierung des Verfestigungsgrads.

(2) Zur Ermittlung des Exponenten n ist zusätzlich zur konventionellen Elastizitätsgrenze f_e eine zweite Bezugsspannung f_x erforderlich. Unter der Annahme, dass [Bild F.4 b)]:

f_x die zweite Bezugsspannung ist;

$\varepsilon_{o,x}$ die zur Spannung f_x gehörende bleibende Dehnung ist, ergibt sich der Exponent n wie folgt:

$$n = \frac{\ln\left(\varepsilon_{0,e}/\varepsilon_{0,x}\right)}{\ln\left(f_e/f_x\right)} \tag{F.10}$$

(3) Als konventionelle Elastizitätsgrenze darf die Streckgrenze f_o angesetzt werden, die sich als der Wert bei einer bleibenden Dehnung von 0,2 % ergibt, d. h.:

$f_e = f_o$

$\varepsilon_{o,e} = 0{,}002$

und die Gleichung für das Modell lautet:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0{,}002\left(\frac{\sigma}{f_o}\right)^n \text{ und } n = \frac{\ln\left(0{,}002/\varepsilon_{o,x}\right)}{\ln\left(f_o/f_x\right)} \tag{F.11}$$

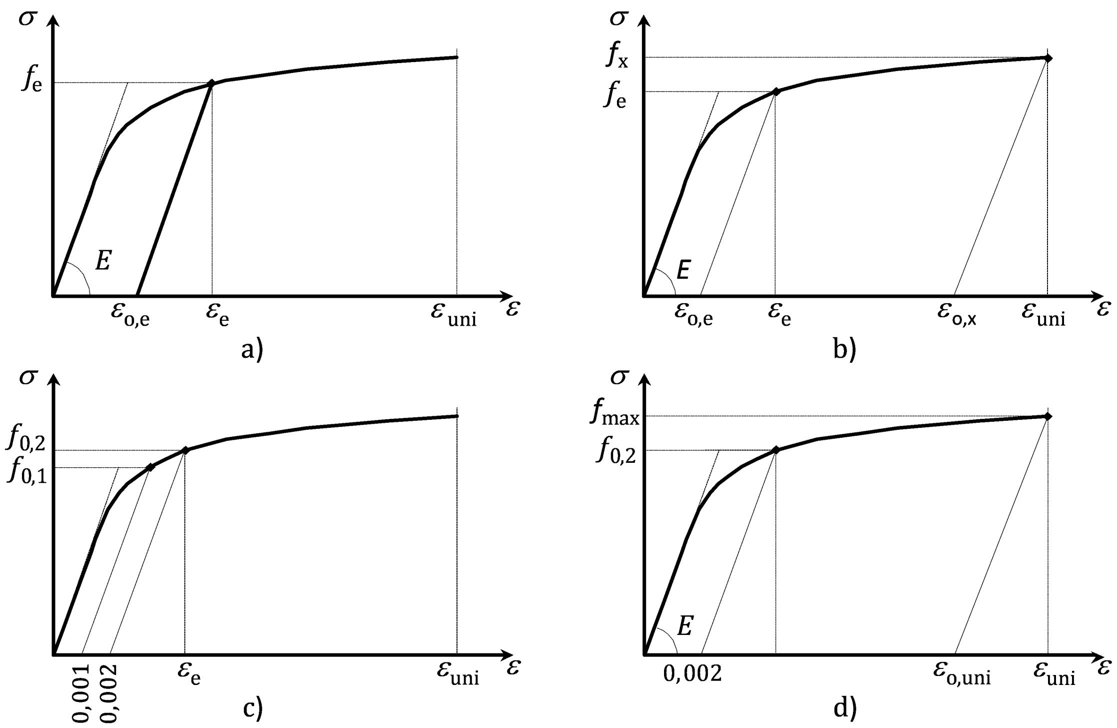


Bild F.4 — Kontinuierliche Modelle der Form $\varepsilon = \varepsilon(\sigma)$

(4) Der zweite Bezugspunkt ($f_x - \varepsilon_{o,x}$) sollte entsprechend dem Dehnungsbereich gewählt werden, der dem untersuchten Verhalten entspricht. Die folgenden Grenzfälle dürfen betrachtet werden:

a) wenn die Berechnung den Bereich elastischer Verformungen betrifft, darf die zu einer bleibenden Dehnung von 0,1 % ermittelte Streckgrenze als zweiter Bezugspunkt angenommen werden [siehe Bild F.4 c)], sodass:

$f_x = f_{0,1}$

$\varepsilon_{o,x} = 0{,}001$

und deshalb

$$n = \frac{\ln 2}{\ln\left(f_o/f_{0,1}\right)} \tag{F.12}$$

b) Wenn die Berechnung den Bereich plastischer Verformungen betrifft, darf die Zugspannung beim Maximum der σ-ε-Kurve als zweiter Bezugspunkt angenommen werden [siehe Bild F.4 d)], sodass:

$f_x = f_{max}$

$\varepsilon_{o,x} = \varepsilon_{o,max}$ ist die zur Spannung f_{max} gehörende bleibende Dehnung

und deshalb

$$n = \frac{\ln\left(0{,}002/\varepsilon_{o,uni}\right)}{\ln(f_o/f_{max})} \tag{F.13}$$

(5) Aufgrund von umfangreichen Versuchen dürfen anstatt der in F.3.2.2(4) angegebenen Werte die folgenden Werte angenommen werden:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0{,}002\left(\frac{\sigma}{f_0}\right)^{n} \tag{F.14}$$

Dabei ist

a) der elastische Bereich ($f_x = f_p$, $\varepsilon_p = 0{,}000\,001$)

$$n = \frac{\ln(0{,}000\,001/0{,}002)}{\ln\left(f_p/f_0\right)} \tag{F.15}$$

wobei die Proportionalitätsgrenze f_p nur vom Wert der Streckgrenze f_o abhängt:

$$f_p = f_{0,2} - 2\sqrt{10 f_{0,2}(\mathrm{N/mm^2})} \quad \text{wenn } f_{0,2} > 160\ \mathrm{N/mm^2} \tag{F.16}$$

$$f_p = f_{0,2}/2 \quad \text{wenn } f_{0,2} \leq 160\ \mathrm{N/mm^2} \tag{F.17}$$

b) der plastische Bereich ($f_x = f_u$)

$$n = n_p = \frac{\ln\left(0{,}002/\varepsilon_{uni,max}\right)}{\ln(f_o/f_u)} \tag{F.18}$$

wobei f_o und f_u die konventionellen Festigkeitswerte von Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4 sind, und $\varepsilon_{uni,max}$ ein geeigneter Wert für eine Obergrenze (einen Höchstwert) der gleichförmigen Dehnung ist (siehe F.4).

F.4 Näherungsweise Ermittlung von $\varepsilon_{\mathrm{uni,max}}$

Auf der Grundlage von Daten aus Versuchen mit Produktionsmaterialen, die eine große und repräsentative Anzahl von Legierungen und Zuständen umfassen, konnte eine empirische Gleichung zur Schätzung einer Obergrenze von $\varepsilon_{\mathrm{uni}}$ $(=\varepsilon_{\mathrm{uni,max}})$ als Funktion von $R_{\mathrm{p0,2}}$ definiert werden, die von keiner Legierung und keinem Zustand überschritten werden kann. Diese Beziehung lautet wie folgt:

$$\varepsilon_{\mathrm{uni,max}} = 0{,}30 - 0{,}22\frac{f_{\mathrm{o}}(\mathrm{N/mm^2})}{400} \qquad \text{wenn } f_{\mathrm{o}} < 400\ \mathrm{N/mm^2} \tag{F.19}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{uni,max}} = 0{,}08 \qquad \text{wenn } f_{\mathrm{o}} \geq 400\ \mathrm{N/mm^2} \tag{F.20}$$

ANMERKUNG Diese Angabe kann zur quantitativen Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung oberhalb der Elastizitätsgrenze bei plastischen Berechnungen verwendet werden, gilt aber nicht für die Beurteilung des Dehnungsverhaltens des Werkstoffs. Für sehr spezielle Bemessungsfragen kann es vorteilhaft und für bestimmte Legierungen und Zustände auch möglich sein, spezifische Daten für $\varepsilon_{\mathrm{uni,max}}$ zu finden. Dies kann jedoch nur in Zusammenarbeit mit dem Hersteller des betrachteten Materials erfolgen.

Anhang G
(informativ)

Geometrische Eigenschaften von Querschnitten

G.1 Anwendung dieses Anhangs

(1) Dieser informative Anhang enthält zusätzliche Hinweise zu den in 8.2 angegebenen.

ANMERKUNG Eine nationale Entscheidung über die Anwendung dieses informativen Anhangs ist im Nationalen Anhang angegeben. Falls der Nationale Anhang keine Informationen über die Anwendung dieses informativen Anhangs enthält, kann er angewendet werden.

G.2 Anwendungsbereich und Anwendungsgrenzen

(1) Dieser informative Anhang enthält Formeln und Tabellen für die Eigenschaften von Aluminium-querschnitten.

G.3 Torsionsträgheitsmoment I_t

(1) Für offene dünnwandige Querschnitte, die nur aus ebenen Teilen konstanter Dicke zusammengesetzt und mit Kehlen und/oder Wulsten verstärkt sind, ergibt sich das Torsionsträgheitsmoment I_t mit

$$I_t = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n_r} b_i t_i^3 - 0{,}105\sum_{j=1}^{n_e} t_j^4 + \sum_{k=1}^{n_f} \alpha_k D_k^4 + \sum_{l=1}^{n_{fb}} (\beta_l + \delta_l \gamma_l)^4 t_l^4 \tag{G.1}$$

wobei die erste Summe die ebenen Querschnittsteile erfasst, die zweite gilt nur für freie Ränder der ebenen Querschnittsteile ohne Wulste und die dritte und vierte Summe betreffen Kehlen bzw. Wulste.

- t ist die Dicke der ebenen Querschnittsteile;
- β, δ und γ sind Kehl- oder Wulstbeiwerte, siehe Tabelle G.1, Fall 3 bis Fall 11;
- α und δ sind Kehlbeiwerte und D ist der Durchmesser des eingeschriebenen Kreises, siehe Tabelle G.1, Fall 1 und Fall 2;
- b ist die Breite der ebenen Querschnittsteile; bei an Kehlen oder Wulsten angrenzenden ebenen Querschnittsteilen bis zum Rand der in Tabelle G.1 schraffierten Fläche gemessen;
- n_r ist die Anzahl an Rechtecken;
- n_e ist die Anzahl der freien Rechteckränder;
- n_f ist die Anzahl der Kehle nach Tabelle G.1, Fall 1 und Fall 2;
- n_{fb} ist die Anzahl der Kehle und Wulste nach Tabelle G.1, Fall 3 bis Fall 11.

(2) Für einen einfachen Rechteckquerschnitt mit beliebigem Seitenverhältnis b/t von ≥ 1 gilt:

$$I_t = \frac{bt^3}{3}\left(1 - 0{,}63\frac{t}{b} + 0{,}052\frac{t^5}{b^5}\right) \qquad \text{(G.2)}$$

(3) Für geschlossene Querschnitte wird I_{t} in G.8 angegeben.

G.4 Torsionswiderstandsmoment W_{t}

(1) Für offene dünnwandige Querschnitte mit kleinen Kehlen oder Wulsten sollte Gleichung (G.22) angewendet werden. Für offene Querschnitte mit Kehlen wird $0{,}25D^3$ in Gleichung (G.22) ergänzt, wobei D der Durchmesser des eingeschriebenen Kreises ist.

G.5 Lage des Schubmittelpunkts S

(1) In Tabelle G.2 ist die Lage des Schubmittelpunkts für einige Querschnitte angegeben. Siehe G.6 und G.7 für offene dünnwandige Querschnitte. Bei einem Querschnitt mit beliebiger Symmetrieachse liegt der Schubmittelpunkt auf dieser Achse.

G.6 Wölbwiderstand I_{w}

(1) Für einige Querschnittstypen darf der Wölbwiderstand I_{w} auf folgende Weise ermittelt werden:

a) für Querschnitte, die aus Scheiben bestehen, die sich alle in einem Punkt scheiden, z. B. Winkel-, T- oder Kreuzquerschnitte, kann I_{w} vorsichtigerweise null gesetzt oder mit

$$I_{\mathrm{w}} = \sum b^3 t^3/36 \qquad \text{(G.3)}$$

ermittelt werden, wobei b die Breite und t die Dicke der Scheiben ist, siehe L-Querschnitt und T-Querschnitt in Tabelle G.2;

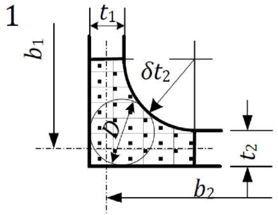
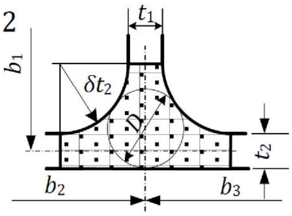
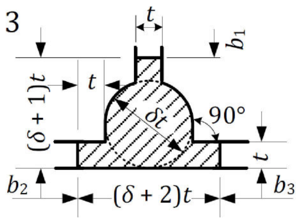
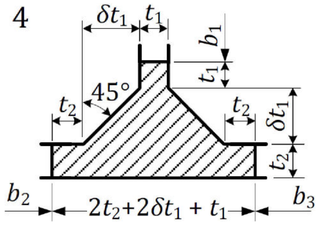
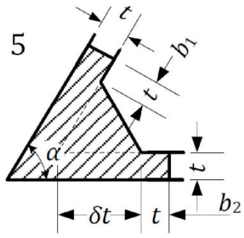
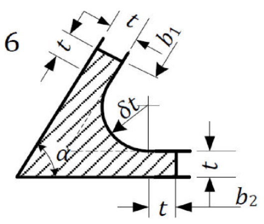
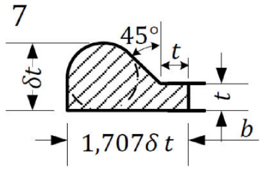
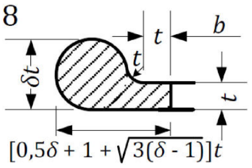
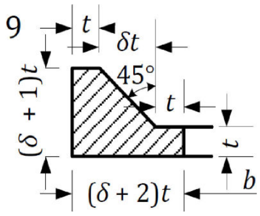
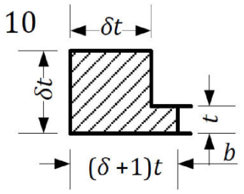
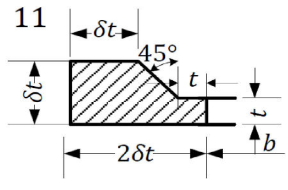
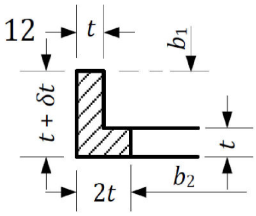
b) für einfache Rechteckquerschnitte mit beliebigem Seitenverhältnis $b/t \geq 1$ gilt:

$$I_{\mathrm{w}} = \frac{b^3 t^3}{144}\left(1 - 4{,}884\frac{t^2}{b^2} + 4{,}97\frac{t^3}{b^3} - 1{,}067\frac{t^5}{b^5}\right) \qquad \text{(G.4)}$$

c) für die besonderen in Tabelle G.2 dargestellten Querschnittstypen darf I_{w} mit den dort angegebenen Gleichungen berechnet werden;

d) für offene dünnwandige Querschnitte werden die Gleichungen für Querschnittswerte einschließlich Lage des Schubmittelpunkts und Wölbwiderstand I_{w} in G.7 angegeben.

Tabelle G.1 — Beiwerte für das Torsionsträgheitsmoment bei Querschnitten mit Kehlen und Wulsten

1  $\alpha = (0{,}07\delta + 0{,}076)t_1/t_2$ $1 \le \delta \le 2$ $1 \le t_2/t_2 \le 5$ $D = 2\left[3\delta + \frac{t_1}{t_2} + 1 - \sqrt{2\left(2\delta + \frac{t_1}{t_2}\right)(2\delta + 1)}\right] t_2$	2  $\alpha = (0{,}10\delta + 0{,}15)t_1/t_2$ $1 \le \delta \le 2$ $1 \le t_2/t_2 \le 5$ $D = \frac{(\delta + 1)^2 + (\delta + 0{,}25t_1/t_2)t_1/t_2}{2\delta + 1} t_2$
3  $\beta = 0{,}20$ $\gamma = 1{,}11$ $2 \le \delta \le 10$	4  $\beta = 0{,}94$ $\gamma = 1{,}54$ $1 \le \delta \le 6$ $t_2 \ge t_1$
5  $\beta = 1{,}21 - 0{,}039\alpha°$ $\gamma = 0{,}25 + 0{,}001\,6\alpha°$ $1 \le \delta \le 6$ $45° \le \alpha \le 90°$	6  $\beta = 1{,}12 - 0{,}017\alpha°$ $\gamma = 0{,}94 + 0{,}008\,1\alpha°$ $1 \le \delta \le 6$ $45° \le \alpha \le 90°$
7  $\beta = 0{,}04$ $\gamma = 0{,}63$ $1{,}4 \le \delta \le 6$	8  $\beta = 0{,}26$ $\gamma = 0{,}51$ $1{,}4 \le \delta \le 6$
9  $\beta = 0{,}83$ $\gamma = 0{,}39$ $1{,}4 \le \delta \le 6$	10  $\beta = 0{,}13$ $\gamma = 0{,}58$ $1{,}4 \le \delta \le 6$
11  $\beta = 0{,}003$ $\gamma = 0{,}71$ $2 \le \delta \le 6$	12  $\beta = 0{,}92$ $\gamma = 0{,}06$ $1 \le \delta \le 6$