

Dr.-Ing. Joachim Kretz

# Klassifizierung – Querschnittsklasse 4

## Grundlagen der Berechnungen nach EC 3 und EC 9

Die Querschnitte von Stahl- und Aluminiumprofilen werden entsprechend ihrem Tragverhalten in Querschnittsklassen (QK) 1 bis 4 eingeteilt. Diese Klassifizierung dient der Zuordnung der plastischen oder elastischen Beanspruchbarkeit. Die Begrenzung der Tragfähigkeit und der Rotationskapazität wird durch das örtliche (lokale) Beulen der Querschnittsteile infolge Druckbeanspruchungen berücksichtigt. Der Nachweis einer ausreichenden Beultragfähigkeit ist stets bei Querschnitten mit dünnwandigen druckbeanspruchten Querschnittsteilen zu führen. Beulgefährdete Querschnitte werden in die Querschnittsklasse 4 eingeordnet.

Für Aluminiumbauteile, die nach Eurocode 9 nachzuweisen sind, ermöglicht die Herstellung durch Strangpressen die Erzeugung fast beliebiger Querschnittsgeometrien. Durch die Gestaltung der Querschnitte können die Kriterien der Tragfähigkeit und der lokalen Aussteifung optimal berücksichtigt werden. Wegen der Gefahr des lokalen Ausbeulens sind dünnwandige Aluminiumquerschnitte sorgfältig zu klassifizieren und nachzuweisen.



Der nachfolgende Beitrag beschreibt die wesentlichen Grundlagen zur Klassifizierung von Querschnitten im Stahl- und Aluminiumbau. Dabei stehen die dünnwandigen druckbeanspruchten Querschnitte der Klasse 4 im Vordergrund der Betrachtung. Auf das Tragverhalten dieser Querschnitte (QK 4) hat das lokale, örtliche Beulen der unversteiften oder versteiften Querschnittselemente einen großen Einfluss.

Zur Nachweisführung einer ausreichenden Beulsicherheit stehen im Stahlbau grundsätzlich zwei Nachweismethoden zur Verfügung. Während im Nachweisverfahren nach der linearen Beultheorie mit reduzierten Spannungen gerechnet wird, basiert das Verfahren nach der nichtlinearen Beultheorie auf der Ermittlung von wirksamen Querschnitten. Im Stahlbau finden grundsätzlich beide Nachweisverfahren Anwendung, während die Bemessungsregeln im Aluminiumbau nach EC 9 ausschließlich nach der linearen Beultheorie mit reduzierten Spannungen (reduzierte Materialdicke) ausgearbeitet wurden.

Das Beulverhalten der Bauteilflächen wird im Folgenden nur für eine Längsdruckbeanspruchung behandelt. Zur Beschreibung der Auswirkungen auf die Klassifizierung durch örtliches Beulen ist dies ausreichend. Allgemein ist die Beulanalyse jedoch unter Berücksichtigung aller Einwirkungen (Längsdruck, Querdruck und lokale Lastenleitung) einschließlich deren Interaktion zu untersuchen. In dieser Hinsicht erhebt der Beitrag keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Da sich die Werkstoffeigenschaften von Aluminium von denen des Stahls unterscheiden, spiegelt sich dies auch in den Bemessungsvorschriften wieder. Aus diesem Grund werden im zweiten Teil des Beitrages zunächst einige Grundlagen zum Materialverhalten der Aluminiumbauteile angegeben, um darauf aufbauend die recht umfangreichen Klassifizierungsschritte und die Berechnung der wirksamen Querschnitte der Querschnittsklasse 4 zu behandeln.

# 1 Klassifizierung – Definition der Querschnittsklassen

Für Stahlbauteile ist in DIN EN 1993-1-1 [1], Tabelle 5.2 ein vereinfachter Beulnachweis für druckbeanspruchte Querschnittsteile angegeben. Dieser Nachweis wird als Klassifizierung von Querschnitten bezeichnet.

Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Querschnittsklasse und Momententragfähigkeit  $M$  bzw. der Rotationsfähigkeit  $\varphi_{rot}$ . Gemäß Definition in DIN EN 1993-1-1, Abs. 5.5.2(1) verfügen Querschnitte der Klasse 1 über eine Momententragfähigkeit von mindestens der plastischen Momententragfähigkeit  $M_{pl}$  und einer Rotationsfähigkeit  $\varphi_{rot}$ , während Querschnitte der Klasse 4 nicht einmal die elastische Momententragfähigkeit  $M_{el}$  erreichen. Die Momententragfähigkeit der Klasse 4 Querschnitte wird infolge elastischen Beulens auf  $M_b$  reduziert.

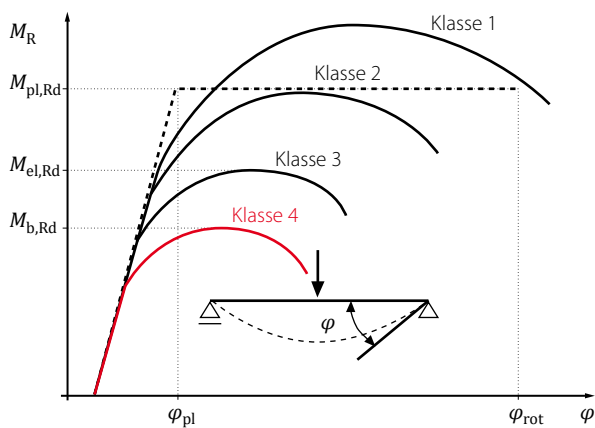


Bild 1. Momenten-Rotations-Verhalten für die verschiedenen Querschnittsklassen nach [1]

In Abhängigkeit der Querschnittsklasse sind die zulässigen Methoden zur Tragwerksberechnung festgelegt, die Bild 2 zu entnehmen sind.

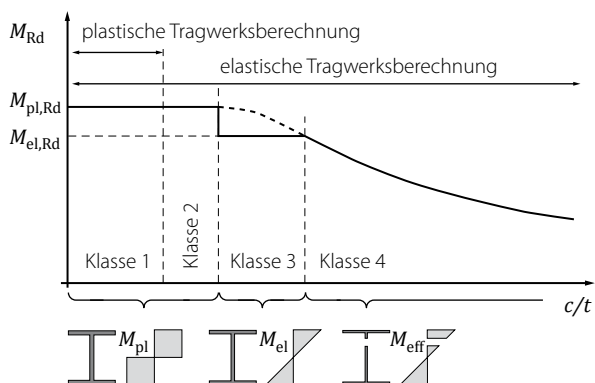


Bild 2. Querschnitts-Tragfähigkeiten und zulässige Berechnungsmethoden für Querschnitte der Klassen 1 bis 4

Maßgebend für die Querschnittsklassifizierung sind die druckbeanspruchten Teile eines Querschnitts. Deren  $c/t$ -Verhältnis (Verhältnis Breite / Dicke des gedrückten Querschnittsteils) bestimmt die Querschnittsklasse. Für Querschnitte der Klasse 4 bzw. Querschnittsteile, die die Grenzwerte  $c/t$  nach DIN EN 1993-1-1 [1], Tabelle 5.2 nicht erfüllen, ist ein Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5 [5] zu führen.

Querschnitte der Klasse 4 sind nach Normdefinition solche Querschnitte, bei denen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts auftritt. Für die Klasse 4 Querschnitte hat das lokale, örtliche Beulen einen großen Einfluss auf die Tragfähigkeit.

## 1.1 Normen

Zur Klassifizierung und Nachweisführung von Stahl- und Aluminiumbauteilen sind die Regeln in den nachfolgenden Normen mit den zugehörigen Nationalen Anhängen zu beachten:

### Stahlbau:

DIN EN 1993-1-1	Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau
DIN EN 1993-1-3	Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche
DIN EN 1993-1-5	Plattenförmige Bauteile
DIN EN 1993-2	Stahlbrücken
DIN EN 1994-2	Verbundbrücken

### Aluminiumbau:

DIN EN 1991-1-1	Allgemeine Bemessungsregeln
DIN EN 1991-1-4	Kaltgeformte Profiltafeln

## 2 Grundlagen der Nachweismethoden für Berechnungen nach DIN EN 1993-1-5

Beulen ist eine Stabilitätserscheinung des in seiner Ebene auf Druck und/oder Schub beanspruchten Bleches (Platte) mit Ausweichen senkrecht zur Blechebene. Bleche / Platten gehören zu den Flächentragwerken und treten im Stahlbau als Flansche, Gurte und Stege in allen Trägern auf (Bild 3). Dies gilt insbesondere im Brückenbau mit seinen breiten Gurten und hohen Stegen. Die dünnwandigen Bauteile des Stahlleichtbaues wie Trapez- und Sandwichprofile setzen sich aus plattenförmigen Elementen zusammen.

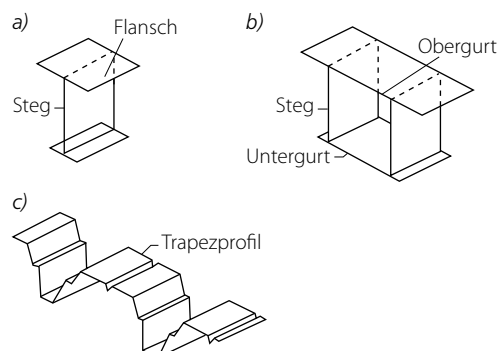


Bild 3. Querschnitte des Stahlbaus

Der Beulsicherheitsnachweis für Stahlbauteile ist allgemein in DIN EN 1993-1-5 geregelt. Grundsätzlich stehen zwei Möglichkeiten der Nachweisführung für Normalspannungen als auch für Schubspannungen zur Verfügung:

1. Nachweis mit „Grenzbeulspannungen“ nach der linearen Beultheorie
2. Nachweis mit „wirksamen Querschnitten“ nach der nichtlinearen Beultheorie

**Zum Nachweis mit „Grenzbeulspannungen“:**

Steht eine umfangsgelagerte Platte einseitig unter Druck (Bild 4), beult sie unter der kritischen Spannung  $\sigma_{krit}$  aus. Es stellt sich eine doppelt gekrümmte Biegefläche ein, wobei die Biegetragwirkung in Querrichtung aktiviert wird.

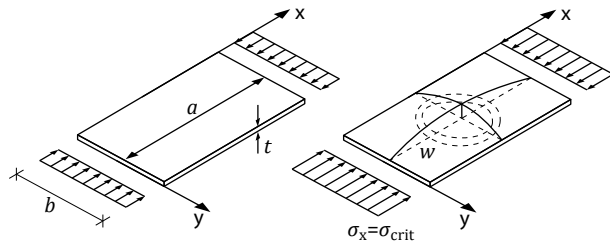


Bild 4. Prinzip des Beulens unter Längsdruck

Bei dem linear-elastischen Verfahren mit Grenzbeulspannungen werden die überkritischen Tragreserven im Bereich größerer Schlankheiten ausgenutzt. Das Ausbeulen der Platte aktiviert die Dehnsteifigkeit der Platte in Querrichtung. Dadurch entstehen die in Bild 5 dargestellten quergerichteten Membranzugspannungen  $\sigma_y$ , die im ausgebeulten mittleren Bereich der Platte dem Ausweichen entgegenwirken. Dadurch entsteht eine ausgeprägte Stützwirkung der Längsränder, wodurch eine weitere Tragfähigkeitssteigerung möglich wird. An den Querrändern werden die für das Gleichgewicht erforderlichen Druckspannungen aufgebracht. Die Spannungen an den gestützten Längsrändern können bis zur Fließgrenze anwachsen.

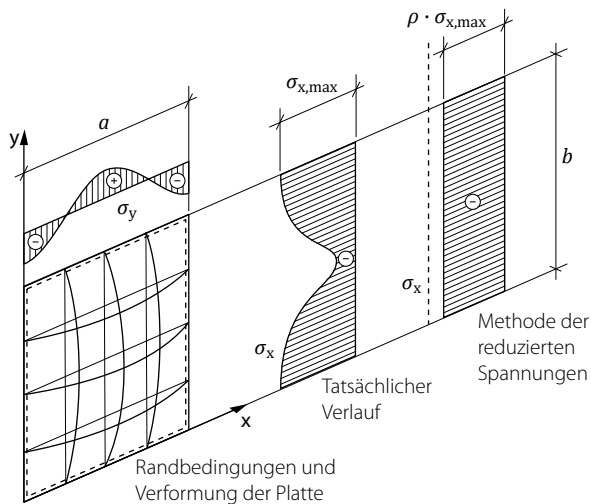


Bild 5. Membranzustand der ausgebeulten Platte

**Zum Nachweis mit „wirksamen Querschnitten“:**

Bei diesem Verfahren werden die Querschnitte um die ausgebeulten Bereiche reduziert und die Beanspruchungen auf den „wirksamen Querschnitt“ umgelagert. Es findet demnach eine Umlagerung von dem ausgebeulten Bereich hin zu den steiferen Bereichen an den Rändern statt.

Bei diesem Konzept der wirksamen Breite wird der tatsächliche, ungleichmäßige Spannungsverlauf durch fiktive Spannungsblöcke mit dem Größtwert  $\sigma_{x,max}$  am Plattenrand und der wirksamen Breite  $b_{eff}$  ersetzt.

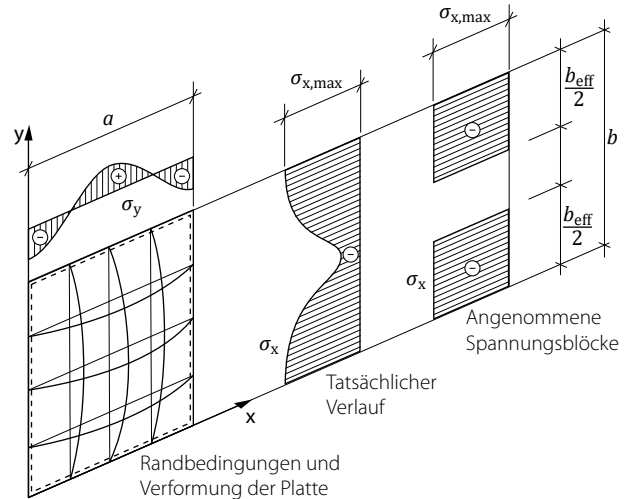


Bild 6. Membranzustand mit „wirksamem Querschnitt“ bzw. „wirksamer Breite“

**2.1 Nachweis mit „Grenzbeulspannungen“ nach linearer Beultheorie (mit reduzierten Spannungen)**

**Beulen infolge Längsdruck:**

Die idealen Beulspannungen lassen sich nach der elastischen Beultheorie für Beulen unter Längsdruck über die Lösung des Eigenwertproblems herleiten. Nach Bild 4 wird eine allseitig gelenkig gelagerte, ideal mittig gedrückte Platte der Länge a, der Breite b und der Dicke t, betrachtet.

Für die Eigenwerte  $m = 1, 2, 3 \dots$  und  $n = 1, 2, 3 \dots$  ergeben sich die ideale Beulspannung  $\sigma_{cr}$  mit dem zugehörigen Beulwert  $k_\sigma$  als sogenannte Beulgirlande (Bild 7) zu:

$$\sigma_{cr} = \left( \frac{m \cdot b}{a} + \frac{a}{m \cdot b} \cdot n^2 \right)^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2$$

$$= k_\sigma \cdot \sigma_e = \text{Beulwert} \cdot \text{ideale Beulspannung}$$

mit:  $\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2$

$$\text{und } k_\sigma = \left( \frac{m \cdot b}{a} + \frac{a}{m \cdot b} \cdot n^2 \right)^2 = \left( \frac{m}{a} + \frac{a}{m} \cdot n^2 \right)^2$$

Beulwerte sind in Abhängigkeit von der Beanspruchung (z. B. Randspannungsverhältnis  $\psi$ ) sowie den Lagerungsbedingungen für Standardfälle in der Literatur tabelliert. Für die allgemeine Lösung ist jedoch eine numerische Lösung des Eigenwertproblems erforderlich.

Sofern die Normalspannung in Längsrichtung des Beulfeldes veränderlich ist, darf der Nachweis vereinfachend mit den Schnittgrößen an der Querschnittsstelle im Abstand  $0.4 \cdot a$  bzw.  $0.5 \cdot b$  (der kleiner Wert ist maßgebend) vom Beulfeldrand mit den größeren Spannungen geführt werden. Diese reduzierte Spannung darf jedoch nicht kleiner als die mittlere Spannung über die Beulfeldlänge sein.

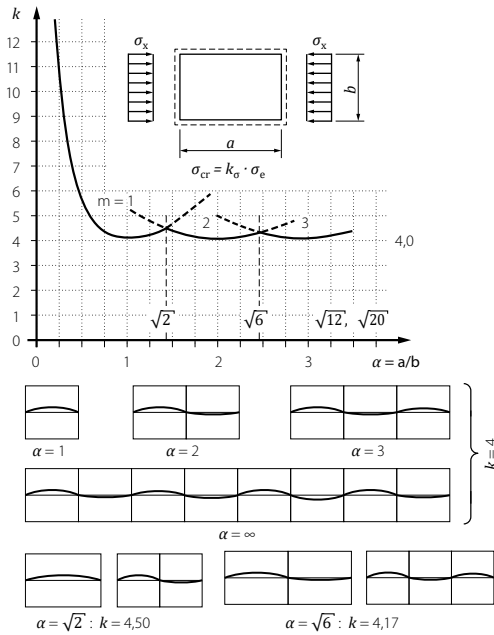


Bild 7. Beulwerte  $k$  für allseits gelenkig gelagerte Platten mit dem Seitenverhältnis  $\alpha = a/b$  unter konstanter Druckspannung

Der Nachweis erfolgt gegen Grenzbeulspannungen  $\sigma_{P,Rd}$  für den Querschnitt bzw. die Querschnittsteile, die sich in Abhängigkeit der Schlankheit der Bleche durch Reduktion der Fließgrenze (Methode der reduzierten Spannungen) ergeben. Dazu ist zunächst der bezogene Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_p$  zu bestimmen mit:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{cr}}}$$

Nach DIN EN 1993-1-5, Abs. 4.4 wird dann über den bezogenen Schlankheitsgrad der Abminderungsfaktor  $\rho$  der jeweiligen Beulcurve berechnet. Der Nachweis der Beulsicherheit wird durch die Spannungsbegrenzung auf die Grenzbeulspannung  $\sigma_{P,Rd}$  geführt.

$$\sigma_{P,Rd} = \rho \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}}$$

$$\text{bzw. } \frac{\sigma_{Ed}}{\rho \cdot \frac{f_{yk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0$$

Der Abminderungsfaktor  $\rho$  wird nach DIN EN 1993-1-5, Abs. 4.4 ermittelt zu:

Für beidseitig gestützte Querschnittsteile

$$\rho = 1.0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055 \cdot \psi}$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0.5 + \sqrt{0.085 - 0.055 \cdot \psi}$$

Für einseitig gestützte Querschnittsteile

$$\rho = 1.0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0.748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1.0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_p > 0.748$$

## 2.2 Nachweis mit „wirksamen Querschnitten“ nach nichtlinearer Beultheorie

### Beulen infolge Längsdruck:

Die Methode der wirksamen Querschnittsflächen ist vor allem dann vorteilhaft anzuwenden, wenn für das Bauteil zusätzliche Stabilitätsnachweise wie Biegeknicken oder Biegedrillknicken zu berücksichtigen sind. Infolge des Plattenbeulens wird die Steifigkeit des Querschnitts verringert. Die Spannungen lagern sich innerhalb des Querschnitts von den Beulbereichen auf steifere, weniger stark beanspruchte Querschnittsteile um.

Bei diesem Verfahren wird zum Nachweis der Beulsicherheit bei Längsspannungen zunächst eine reduzierte Querschnittsfläche ermittelt. Dazu wird in den Bereichen, in denen Beulen zu erwarten sind, die anteilige Querschnittsfläche ausgeschnitten. Die Querschnittsreduktion ist damit abhängig von der Schlankheit der einzelnen Bleche.

Nach DIN EN 1993-1-5 erfolgt der Nachweis am effektiven Querschnitt  $A_{c,eff}$  mit einer um den Abminderungsfaktor  $\rho$  reduzierten Fläche der Druckfläche  $A_c$ . Dieser Abminderungsfaktor  $\rho$  ist, wie bereits unter 2.1 beschrieben, von der bezogenen Schlankheit  $\bar{\lambda}_p$  und damit von der idealen Beulspannung und dem Beulwert abhängig.

$$A_{c,eff} = \rho \cdot A_c = \text{wirksamer Querschnitt}$$

$$\text{mit } \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_{yk}}{\sigma_{cr}}}$$

In Übereinstimmung mit 2.1 berechnet sich der Abminderungsfaktor  $\rho$  wie folgt:

Beidseitig gestützte Querschnittsteile mit dem Randspannungsverhältnis  $\psi$ :

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1.0$$

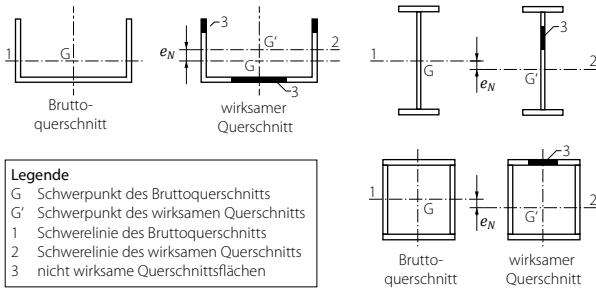
Einseitig gestützte Querschnittsteile:

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1.0$$

Die wirksame Querschnittsfläche  $A_{eff}$  wird in der Regel unter der Annahme reiner Druckspannungen infolge der Druckkraft  $N_{Ed}$  ermittelt. Bei unsymmetrischen Querschnitten (Bild 8 li.) erzeugt die Verschiebung der Schwerelinie  $e_N$  (infolge Reduzierung der Fläche) der wirksamen Querschnittsfläche  $A_{eff}$  gegenüber der Schwerelinie des Bruttoquerschnitts ein zusätzliches Moment  $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_N$ , das beim Querschnittsnachweis zu berücksichtigen ist.

In den Tabellen 1 und 2 sind für die verschiedenen Randspannungsverhältnisse  $\psi$  die wirksamen Breiten  $b_{eff}$  nach DIN EN 1993-1-5 von zweiseitig bzw. einseitig gestützten Beulfeldern angegeben.





**Legende**  
 G Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts  
 G' Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts  
 1 Schwerlinie des Bruttoquerschnitts  
 2 Schwerlinie des wirksamen Querschnitts  
 3 nicht wirksame Querschnittsflächen

Bild 8. Prinzip der Ermittlung der effektiven Querschnittsfläche für Normalkräfte (links) und für Biegemomente (rechts) nach DIN EN 1993-1-5

Unter Berücksichtigung der Werte aus dem wirksamen Querschnitt ( $A_{eff}$ ,  $W_{y,eff}$ ,  $e_N$ ) ist der Spannungsnachweis z. B. für Druck und zweiachsigige Biegung für Querschnitte der Klasse 4 nach folgender Gleichung zu führen:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M0} \cdot f_{yk} \cdot A_{eff}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{y,N}}{\gamma_{M0} \cdot f_{yk} \cdot W_{y,eff}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{z,N}}{\gamma_{M0} \cdot f_{yk} \cdot W_{z,eff}} \leq 1.0$$

Analog sind die Stabilitätsnachweise nach Theorie II. Ordnung nach den Gleichungen (6.61) und (6.62) der DIN EN 1993-1-1 unter Berücksichtigung der Werte des wirksamen Querschnitts zu führen.

### 3 Grundlagen zur Klassifizierung von Aluminiumbauteilen nach Eurocode 9 (DIN EN 1999)

#### 3.1 Allgemeines

Infolge des Herstellverfahrens durch Strangpressen von Aluminiumlegierungen können fast beliebige Querschnittsgeometrien erzeugt werden. Dem Ingenieur bietet sich dadurch die Möglichkeit einen Querschnitt so zu gestalten, dass er für die gewünschte Anwendung wie z. B. Tragfähigkeit und die Aspekte der lokalen Aussteifung möglichst optimiert gefertigt wird. Dies setzt aber die Kenntnis der metallurgischen Eigenschaften des Aluminiums, dessen Legierungen (17 verschiedene Knetlegierungen und 6 Gusslegierungen in DIN EN 1999-1-1) und der Werkstoffzustände voraus.

Als Voraussetzung zur Beurteilung der Klassifizierung von Aluminiumbauteilen werden nachfolgend wesentliche Werkstoffeigenschaften kurz erläutert. Weitergehende Grundlagen zu den Werkstoffeigenschaften sind der Literatur zu entnehmen [20, 21].

#### 3.2 Werkstoffeigenschaften

Da das Werkstoffverhalten von Aluminiumlegierungen anders als das des Stahls ist, weichen auch die Bemessungsvorschriften des EC 9 von denen der Stahlkonstruktionen im EC 3 ab. Wesentliche Werkstoffkennwerte für Aluminiumlegierungen sind in Tabelle 3 angegeben.

Werkstoffkennwerte für Aluminiumlegierungen	
Elastizitätsmodul	$E = 70\,000 \text{ N/mm}^2$
Schubmodul	$G = 27\,000 \text{ N/mm}^2$
Querdehnungszahl	$\nu = 0,3$
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ je } ^\circ\text{C}$
Dichte	$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$
Schmelzpunkt Reinaluminium	660 °C
Schmelzpunkt Legierungen (je nach Materialzusammensetzung)	660 °C bis zu 500 °C
Schmelzpunkt Oxidschicht	2040 °C

Tabelle 3. Werkstoffkennwerte für Aluminium nach [21]

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite $b_{eff}$	
	$\psi = 1:$	$b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$	
	$1 > \psi \geq 0:$	$b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 2/(5-\psi) b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$	
	$\psi < 0:$	$b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$	
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0
Beulwert $k_\sigma$	4,0	$\frac{8,2}{1,05 + \psi}$	7,81
			$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$
			23,9
			$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabelle 1. Wirksame Breiten  $b_{eff}$  von zweiseitig gestützten Beulfeldern nach DIN EN 1993-1-5

Spannungsverteilung (Druck positiv)		Wirksame Breite $b_{eff}$	
	$1 > \psi \geq 0:$	$b_{eff} = \rho c$	
	$\psi < 0:$	$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$	
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0
Beulwert $k_\sigma$	0,43	0,57	0,85
			$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$
	$1 > \psi \geq 0:$	$b_{eff} = \rho c$	
	$\psi < 0:$	$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$	
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0
Beulwert $k_\sigma$	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70
			$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$
			23,8

Tabelle 2. Wirksame Breiten  $b_{eff}$  von einseitig gestützten Beulfeldern nach DIN EN 1993-1-5

Der E-Modul des Aluminiums beträgt mit 70000 N/mm<sup>2</sup> nur ein Drittel des E-Moduls des Stahls. Da die Beulgefährdung und die Verformung direkt vom E-Modul abhängen, hat diese Größe einen entscheidenden Einfluss auf die zu wählenden Abmessungen des Querschnitts. Dünnwandige Aluminiumbauteile sind also deutlich beulgefährdeter als vergleichbare Stahlbauteile.

Aluminium dehnt sich wegen des zweifach größeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten zweimal so stark aus wie eine Stahlkonstruktion. Bei Konstruktionen, bei denen die freie Ausdehnung nicht behindert werden darf (Zwängung), ist dies insbesondere zu beachten. Das dreifach geringere spezifische Gewicht des Aluminiums und die gute Korrosionsbeständigkeit ermöglichen die Errichtung von leichten korrosionsgeschützten Bauteilen und Tragwerken.

**Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Aluminium:**

Das Werkstoffgesetz des Stahls zeichnet sich durch einen linear-elastischen und ideal-plastischen Bereich aus, während der Verlauf bei Aluminium anfänglich quasi linear und bei Belastungssteigerung durch eine nichtelastische, nicht-lineare Verformung bis hin zum Versagen gekennzeichnet ist.

Auch für Aluminiumlegierungen wurde die Streckgrenze  $f_0$  bei 0.2 % der bleibenden Dehnung als maßgebender charakteristischer Kennwert für die Bemessung eingeführt. Wegen des nichtlinearen Verlaufs der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen kann das Werkstoffverhalten nicht vereinfacht werden. In DIN EN 1999-1-1 wird das Werkstoffverhalten nach dem sogenannten Ramberg-Osgood-Ansatz (Bild 9) angegeben mit:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \cdot \left(\frac{\sigma}{f_0}\right)^n$$

Der Exponent  $n$  ist dabei bereichsweise zu ermitteln.

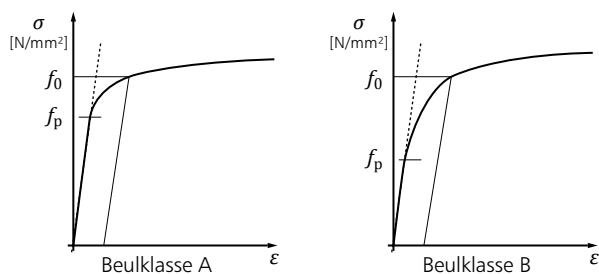


Bild 9. Beulklasse in Abhängigkeit der Proportionalitätsgrenze  $f_p$  nach [21]

a) im elastischen Bereich ( $f_{max} = f_0$ , mit  $\epsilon_p = 0.000001$ ) gilt:

$$n = n_e = \frac{\ln \frac{0.000001}{0.002}}{\ln \frac{f_p}{f_0}}$$

mit

$f_0$  charakteristischer Wert der 0.2%-Dehngrenze  
 $f_p$  Proportionalitätsgrenze

$$f_p = f_0 - 2 \cdot \sqrt{10 \cdot f_0 \left(\frac{N}{mm^2}\right)} \quad \text{wenn } f_0 > 160 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_p = \frac{f_0}{2} \quad \text{wenn } f_0 \leq 160 \frac{N}{mm^2}$$

b) im plastischen bzw. verfestigten Bereich ( $f_{max} = f_u$ ) gilt:

$$n = n_p = \frac{\ln \frac{0.002}{\epsilon_u}}{\ln \frac{f_0}{f_u}}$$

mit

$f_u$  charakteristischer Wert der Zugfestigkeit  
 $\epsilon_u$  oberer Grenzwert für die Gleichmaßdehnung

$$\epsilon_u = 0,008 \quad \text{wenn } f_0 \geq 400 \frac{N}{mm^2}$$

$$\epsilon_u = 0.30 - 0.22 \frac{f_0 \left(\frac{N}{mm^2}\right)}{400} \quad \text{wenn } f_0 < 400 \frac{N}{mm^2}$$

Der Verlauf der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie ist entscheidend für die Einstufung in eine Beulklasse. Dabei ist die Beulklasse nach EC 9 als Maß für das Proportionalitätslimit  $f_p$  des Aluminiumwerkstoffs definiert. Liegt das Proportionalitätslimit  $f_p$  nahe an der 0.2 %-Dehngrenze  $f_0$ , wird der Werkstoff der Beulklasse A zugeordnet. Hierzu gehören alle Werkstoffe mit  $f_0 \geq 230$  N/mm<sup>2</sup> sowie die aushärtbaren Legierungen im Zustand T6x, unabhängig von deren Streckgrenze. Entsprechend erhalten die Werkstoffe mit  $f_0 < 230$  N/mm<sup>2</sup> die Zuordnung zur Beulklasse B. Deren Proportionalitätslimit  $f_p$  liegt deutlich unterhalb der 0.2 %-Dehngrenze.

**3.3 Querschnittsklassifizierung**

Um die Tragfähigkeit von Bauteilen gemäß EC 9 nachzuweisen, ist zunächst eine Querschnittsklassifizierung erforderlich. Hierdurch wird die Analyse des nichtlinearen Verhaltens vom Querschnitt bis hin zum Gesamtbauteil ermöglicht. Das Ziel der Klassifizierung ist es eine ausreichende Querschnittstragfähigkeit zu gewährleisten und die Sicherheit gegen örtliches Ausbeulen unter Druckspannungen nachzuweisen. Die entsprechenden Regelungen für Aluminiumbauteile sind in DIN EN 1991-1-1, Abs. 6.1.4 angegeben.

Wegen des „geringen“ E-Moduls des Aluminiums ist die Gefahr des örtlichen Ausbeulens dünnwandiger Querschnitte oder Querschnittsteile unter Druckspannungen durch eine sorgfältige Klassifizierung nachzuweisen. Die Einteilung in die Querschnittsklassen 1 bis 4 erfolgt auch bei Aluminiumbauteilen analog zu den Regelungen des EC 3.

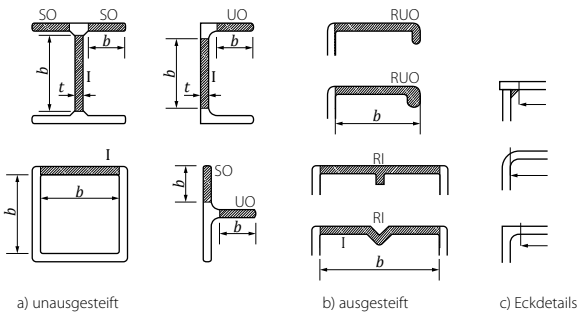
Zu beachten sind dabei natürlich das unterschiedliche Materialverhalten sowie die daraus resultierenden unterschiedlichen Klassifizierungsgrenzwerte. Querschnitte der Klasse 4 sind auch nach DIN EN 1999-1-1 so definiert, dass diese schlanken Querschnitte die elastische Grenztragfähigkeit unter Druckbeanspruchung nicht erreichen, sondern deren Tragfähigkeit durch örtliches Beulen gekennzeichnet ist.

**Ebene, dünnwandige Querschnittsteile**

Nach DIN EN 1999-1-1 werden Grundtypen von Teilflächen zur Querschnittsklassifizierung definiert. Für einen zu klassifizierenden Querschnitt ist zunächst die Aufteilung in einzelne druckbelastete Teilflächen vorzunehmen. Deren  $b/t$ -Verhältnis (Anmerkung: nach EC 3 als  $c/t$ -Verhältnis definiert) ist zu bestimmen und den Grundtypen zuzuordnen.

Dabei werden nach EC 9 die in Bild 10 dargestellten Grundtypen unterschieden:

- ebene auskragende Querschnittsteile
- ebene innere, beidseitig gehaltene Querschnittsteile
- gekrümmte innere, beidseitig gehaltene Querschnittsteile



<b>Legende</b>	I inneres beidseitig gehaltenes Teil
SO symmetrisch auskragendes Teil	RI ausgesteifte beidseitig gehaltene innere Teile
UO unsymmetrisch auskragendes Teil	RUO ausgesteifte, unsymmetrisch auskragende Teile

Bild 10. Grundtypen von Teilflächen zur Querschnittsklassifizierung nach DIN EN 1999-1-1

**Schlankheitsparameter  $\beta$**

Die Empfindlichkeit gegen örtliches Beulen eines ebenen Querschnitts unter teilweiser oder vollkommener Druckbelastung wird mit Hilfe des Schlankheitsparameters  $\beta$  ermittelt. Der Schlankheitsgrad stellt das Verhältnis der Breite  $b$  zur Dicke  $t$  ( $b/t$ -Verhältnis) der betrachteten Teilfläche mit einem weiteren Reduktions-Faktor  $\eta$  dar. Abhängig vom Druckspannungsverlauf, evtl. vorhandener Aussteifungen oder gekrümmter Teilflächen kann das  $b/t$ -Verhältnis abgemindert werden.

Regelungen zur Ermittlung des Schlankheitsgrades  $\beta$  enthält DIN EN 1999-1-1 im Abschnitt 6.1.4 für:

- unausgesteifte, ebene Teilflächen, auskragend oder beidseitig gehalten (6.1.4.3 (1))
- ausgesteifte, ebene Teilflächen, auskragend oder beidseitig gehalten (6.1.4.3 (2) und (3))
- gekrümmte, innere Teilflächen und Rundhohlprofile unter gleichförmigem Druck (6.1.3 (4) und (5))

**Unausgesteifte, ebene Teilflächen:**

Sind die Querschnittsteile nicht vollständig mit dem gleichen Betrag überdrückt, ist das Randspannungsverhältnis  $\psi$  zu ermitteln. Es bezieht sich auf die maximale Druckspannung am Rand und kann je nach Beanspruchung Werte zwischen -2 und 1 annehmen. Über das Randspannungsverhältnis ist der Koeffizient für die Spannungsgradienten  $\eta$  zu bestimmen, mit dem letztlich der Schlankheitsgrad  $\beta$  abzumindern ist.

Schlankheitsgrad  $\beta = \eta \cdot b/t$

Der Verlauf des Koeffizienten  $\eta$  in Abhängigkeit des Randspannungsverhältnisses  $\psi$  ist grafisch in Bild 11 dargestellt.

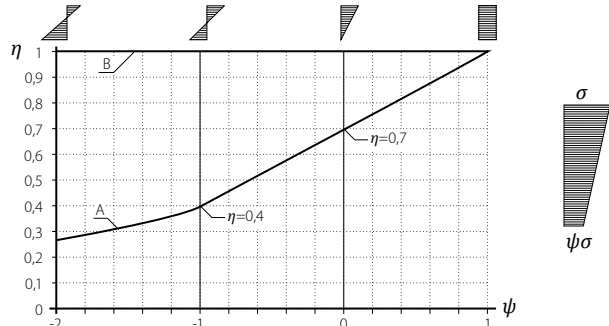


Bild 11.  $\eta$ -Werte für ebene, innere Querschnittsteile in Abhängigkeit des Randspannungsverhältnisses  $\psi$

Die Bestimmungsgleichungen für den Koeffizienten  $\eta$  sind mit den Randspannungsverhältnissen nach den Regeln in DIN EN 1999-1-1, Abs. 6.1.4.3 in Bild 12 enthalten.

Beschreibung nach Norm	$\psi$	$\eta$	Beispiel
ebene, innere, beidseitig gehaltene Querschnittsteile mit konstanter Spannungsverteilung	1	1	
ebene, innere, beidseitig gehaltene Querschnittsteile mit Nulldurchgang des Spannungsverlaufs in der Mitte	-1	0,4	
ebene, innere, beidseitig gehaltene Querschnittsteile mit linear veränderlichem Spannungsverlauf	$-1 \leq \psi \leq 1$	$\eta = 0,7 + 0,3\psi$	
	$\psi \leq -1$	$\eta = 0,8/(1-\psi)$	
ebene auskragende Querschnittsteile mit konstanter Spannungsverteilung oder maximaler Druckspannung am äußeren Rand	1	1	
ebene auskragende Querschnittsteile mit maximaler Druckspannung am inneren Rand	$-1 \leq \psi \leq 1$	$\eta = 0,7 + 0,3\psi$	
	$\psi \leq -1$	$\eta = 0,8/(1-\psi)$	

Bild 12.  $\eta$ -Werte für unausgesteifte, ebene Teilflächen nach DIN EN 1999-1-1, Abs. 6.1.4.3

**Ausgesteifte, ebene Teilflächen:**

Um eine ausreichende Sicherheit vor Ausbeulen bei dünnwandigen Querschnitten bzw. Querschnittsteilen zu erreichen, werden die druckbeanspruchten Teilflächen oft mit Steifen verstärkt. Infolge der Herstellung mit Strangpressung ist dies problemlos und kostengünstig möglich. Bei vorhandenen Steifen sind nach DIN EN 1999-1-1 drei mögliche Beulformen zu berücksichtigen, die prinzipiell in Bild 13 dargestellt sind. In der Regel ergeben sich für jede Beulform eigene Werte des Schlankheitsgrades  $\beta$ .

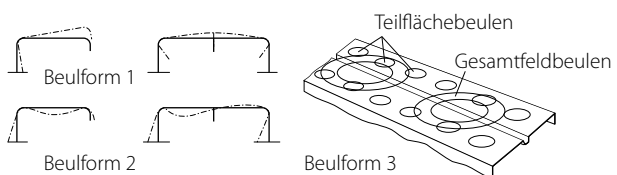


Bild 13. Beulformen für ebene, ausgesteifte Querschnittsteile nach DIN EN 1999-1-1





**Beulform 1:**

Diese Beulform wird als Gesamtfeldbeulen bezeichnet. Das ausgesteifte Querschnittsteil beult als ganzes, wobei die Steife mit derselben Krümmung beult wie das Querschnittsteil. In DIN EN 1999-1-1 sind die Regeln dazu im Abschnitt 6.1.4.3 (3) a) bis d) angegeben.

Bei gleichförmiger Druckspannung und einer Regelausführung der Steifen nach EC 9 sind die Berechnungsangaben für den Schlankheitsgrad  $\beta$  bei Aussteifungen mit gleichem Zwischenraum im Abschnitt 6.1.4.3 formelmäßig und grafisch angegeben.

Beispielhaft wird die Bestimmung des Schlankheitsgrades  $\beta$  für eine mittige Steifenanordnung (Rippe) angegeben:

$$\beta = \eta \cdot \frac{b}{t}$$

mit:  $\eta = \frac{1}{\sqrt{1 + 2.5 \cdot \frac{(c/t - 1)^2}{b/t}}} \geq 0.5$

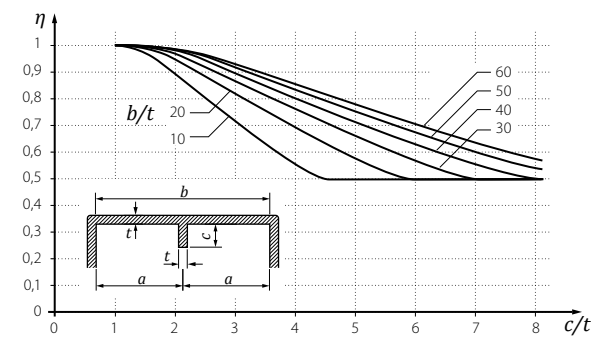


Bild 14. Werte von  $\eta$  für ausgesteifte Querschnittsteile mit einer mittigen Rippe nach [9]

Die Bestimmungsgleichungen für weitere ausgesteifte Querschnittsteile sind dem EC 9 zu entnehmen. In Fällen, in denen keine Regelausführung der Rippen nach EC 9 vorliegt, sondern eine beliebig komplexe Steifenanordnung zu berechnen ist, ist eine Ermittlung der elastischen Beulspannung des Beulfeldes mit leistungsfähiger FEM-Software durchzuführen. Die Wirkung einer Steife wird nach Gleichung (6.8) des EC 9 ermittelt, indem die elastische Beulspannung des ausgesteiften Elements mit der Beulspannung des nicht ausgesteiften Elements ins Verhältnis gesetzt und mit 0.4 potenziert wird. Unter Ansatz einer gelenkigen Lagerung der Plattenränder gilt:

$$\beta = \frac{b}{t} \cdot \left( \frac{\sigma_{cro}}{\sigma_{cr}} \right)^{0.4}$$

mit

- $\sigma_{cr}$  elastische Beulspannung der ausgesteiften Teilfläche unter der Annahme gelenkiger Lagerung an den Rändern
- $\sigma_{cro}$  elastische Beulspannung der unausgesteiften Teilfläche unter der Annahme gelenkiger Lagerung an den Rändern

Die elastische Beulspannung der unausgesteiften Teilfläche ermittelt sich in Analogie zu der elastischen Beulspannung für Stahl, jedoch mit den Werkstoffeigenschaften (E-Modul, Querdehnzahl  $\nu$ ) des Aluminiums zu (vergleiche Pkt. 2.1):

$$\sigma_{cro} = \left( \frac{m \cdot b}{a} + \frac{a}{m \cdot b} \cdot n^2 \right)^2 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2$$

$$= k_{\sigma} \cdot \sigma_e = \text{Beulwert} \cdot \text{ideale Beulspannung}$$

mit:  $\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2$

$$k_{\sigma} = \left( \frac{m \cdot b}{a} + \frac{a}{m \cdot b} \cdot n^2 \right)^2 = \left( \frac{m}{\alpha} + \frac{\alpha}{m} \cdot n^2 \right)^2$$

$b$  Breite der betrachteten Teilfläche zwischen den angenommenen Gelenken

**Beulform 2:**

Diese Beulform ist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Teilbereiche und die Steife je für sich beulen. Dabei bleibt ihre Verbindungslinie gerade. In diesem Fall sind die gleichen Bemessungsregeln anzuwenden wie für unausgesteifte Teilflächen.

**Beulform 3:**

Nach DIN EN 1999-1-1 stellt diese Beulform eine Kombination aus den Beulformen 1 und 2 dar. Dabei wird das Einzel-feldbeulen dem Gesamtfeldbeulen überlagert. Grundsätzlich sind alle Beulformen zu betrachten. Die ungünstigste Beulform ist bemessungsmaßgebend. Die relevanten Eigenformen sind entweder anhand der Literatur (in einfachen Fällen) oder allgemein mit leistungsfähiger Software zu bestimmen.

**Klassifizierung von Querschnitten und Querschnittsteilen**

Zur Klassifizierung sind die nach den zuvor angegebenen Kriterien ermittelten Schlankheitsgrade  $\beta$  mit Grenzwerten  $\beta_1$  bis  $\beta_3$ , die in DIN EN 1999-1-1 im Abschnitt 6.1.4.4, Tabelle 6.2 angegeben sind, zu vergleichen.

Werkstoffklassifikation nach Tabelle 3.2	Innenliegende Teilfläche			Außenliegende Teilfläche		
	$\beta_1/\epsilon$	$\beta_2/\epsilon$	$\beta_3/\epsilon$	$\beta_1/\epsilon$	$\beta_2/\epsilon$	$\beta_3/\epsilon$
Klasse A, ungeschweißt	11	16	22	3	4,5	6
Klasse A, geschweißt	9	13	18	2,5	4	5
Klasse B, ungeschweißt	13	16,5	18	3,5	4,5	5
Klasse B, geschweißt	10	13,5	15	3	3,5	4

$\epsilon = \sqrt{250/f_0 \cdot f_0}$  in N/mm<sup>2</sup>

Tabelle 4. Schlankheitsparameter  $\beta_i/\epsilon$  nach DIN EN 1999-1-1, Abs. 6.1.4.4 (Tabelle 6.2)

Die in Tabelle 4 angegebenen Grenzwerte  $\beta_1$  bis  $\beta_3$  basieren auf der Annahme, dass die betrachtete Teilfläche höchstmöglich beansprucht wird.

Anmerkung: In 6.1.4.4 (4) ist für den Fall, dass die Teilfläche geringer als die höchstbeanspruchten Fasern im Querschnitt beansprucht wird, eine Modifikation von  $\epsilon$  angegeben.

Aluminium erfährt auch im Bereich der Wärmeinflusszonen (WEZ) von Schweißnähten eine Reduzierung der Festigkeit, die über eine reduzierte Materialdicke zu berücksichtigen ist. Auf die Reduzierung der Materialdicke infolge von Schweißnähten wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen sondern auf die Norm EC 9 verwiesen.

Die Klassifizierung der Querschnittsteile ist, wie nachfolgend angegeben, mit den Werten der Schlankheitsparameter  $\beta$  verbunden:

Querschnittsteile in Biegeträgern		Querschnittsteile in Druckstäben	
$\beta \leq \beta_1$	: Klasse 1	$\beta \leq \beta_2$	: Klasse 1 oder 2
$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$	: Klasse 2	$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$	: Klasse 3
$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$	: Klasse 3	$\beta_3 < \beta$	: Klasse 4
$\beta_3 < \beta$	: Klasse 4		

**Querschnittsklasse 4 – Wirksamer Querschnitt**

Örtliches Beulen bei Bauteilen der Klasse 4 wird allgemein durch das Ersetzen des Gesamtquerschnitts durch einen wirksamen Querschnitt berücksichtigt.

Die Regelungen zum wirksamen Querschnitt basieren im EC 9 auf der linearen Beultheorie. Der wirksame Querschnitt wird über eine reduzierte Spannung abgebildet. Hierzu sind die Dicken der druckbelasteten Klasse-4-Teilflächen mit einem örtlichen Beulfaktor  $\rho_c$  abzumindern. In Abhängigkeit des Schlankheitsgrades ist die effektive Dicke  $t_{eff}$  wie folgt definiert:

$$t_{eff} = \rho_c \cdot t$$

mit

$$\rho_c = 1.0 \quad \text{für } \beta \leq \beta_3$$

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\epsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\epsilon)^2} \quad \text{für } \beta > \beta_3$$

$\beta$  Schlankheit der betrachteten Teilfläche  
 $\epsilon$  Koeffizient zur Berücksichtigung der 0.2% Dehngrenze  
 $C_i$  Konstanten aus DIN EN 1999-1-1, Tabelle 6.3

Die Konstanten  $C_i$  zur Bestimmung des Beulfaktors sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

**Querschnittsklasse 4 in der mb WorkSuite**

Werkstoff	Modul / Programm	QK 1-3	QK 3#	QK 4
Stahl	EuroSta.stahl 2D	✓	✓	✓
	EuroSta.stahl 3D	✓	✓	✓
	ProfilMaker	✓	✓	✓
	S111.de Stahl-Sparren	✓	✓	✓
	S132.de Stahl-Pfette in Dachneigung	✓	✓	✓
	S142.de Stahl-Dachaussteifung	✓	✓	✓
	S261.de Stahl-Trägerrost	✓	✓	✓
	S301.de Stahl-Durchlaufträger, BDK	✓	✓	-
	S312.de Stahl-Durchlaufträger, BDK, veränderliche Querschnitte	✓	✓	✓
	S321.de Stahl-Durchlaufträger, Doppelbiegung, Torsion	✓	✓	✓
	S398.de Stahl-Stegöffnung	✓	✓	✓
	S404.de Stahl-Stütze	✓	✓	-
	S414.de Stahl-Stützensystem	✓	✓	✓
	S460.de Stahl-Wandaussteifung	✓	✓	✓
	S601.de Stahl-Stabwerk, ebene Systeme	✓	✓	✓
S630.de Stahl-Rahmensystem	✓	✓	✓	
S843.de Stahl-Profile nachweisen und verstärken	✓	✓	✓	
Aluminium	S325.de Aluminium-Durchlaufträger, Querschnittsnachweise	✓	✓	✓
	U355.de Aluminium-Durchlaufträger, Querschnitts- u. Stabilitätsnachweise	✓	✓	✓

QK3#      DIN EN 1993-1-1, Abs. 5.5.2 (9)      Möglichkeit, Querschnitte der Klasse 4 wie Querschnitte der Klasse 3 zu behandeln, wenn Bedingung (9) erfüllt ist.

Werkstoffklassifikation nach Tabelle 3.2	Innenliegende Teilfläche		Außenliegende Teilfläche	
	$c_1$	$c_2$	$c_1$	$c_2$
Klasse A, ungeschweißt	32	220	10	24
Klasse A, geschweißt	29	198	9	20
Klasse B, ungeschweißt	29	198	9	20
Klasse B, geschweißt	25	150	8	16

Tabelle 5. Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  zur Ermittlung des Beulfaktors  $\rho_c$  nach DIN EN 1999-1-1

Für ebene außenliegende Teilflächen unsymmetrischer Querschnitte ist  $\rho_c$  nach den oben angegebenen Gleichungen zu ermitteln. Für ebene außenliegende Teilflächen symmetrischer Querschnitte darf nach 6.1.5 (4) der Beulfaktor  $\rho_c$  den folgenden Ausdruck nicht übersteigen:

$$\rho_c \leq \frac{120}{(\beta/\epsilon)^2}$$

Wie auch im Stahlbau ist bei der Berechnung der wirksamen Querschnitte die Verschiebung der Schwerlinie (vgl. Bild 8) mit den zugehörigen effektiven Querschnittswerten zu beachten.

Um die einzelnen Schritte zur Klassifizierung eines Aluminium-Querschnitts in Querschnittsklassen nochmals übersichtlich darzustellen, wird abschließend (Bild 15) ein Ablaufdiagramm aus der Literatur [20] angegeben.

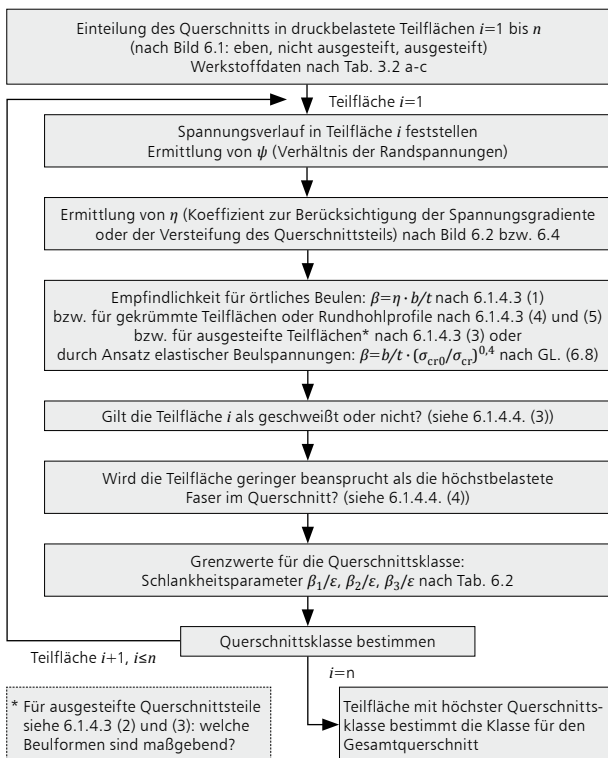


Bild 15. Klassifizierung von Aluminiumbauteilen in Querschnittsklassen nach EC 9, 6.1.4 nach [20]

Dr.-Ing. Joachim Kretz  
mb AEC Software GmbH  
mb-news@mbaec.de

## Normen und Literatur

- [1] 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
- [2] 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
- [3] DIN EN 1993-1-3:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche. Deutsche Fassung EN 1993-1-3:2006 + AC:2009
- [4] DIN EN 1993-1-3/NA: 2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche
- [5] DIN EN 1993-1-5:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung EN 1993-1-3:2006 + AC:2009
- [6] DIN EN 1993-1-5/NA: 2010-12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-5: Plattenartige Bauteile
- [7] DIN EN 1993-2:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken; Deutsche Fassung EN 1993-2:2006 + AC:2009
- [8] DIN EN 1993-2/NA: 2014-10, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 2: Stahlbrücken.
- [9] DIN EN 1999-1-1:2014-03, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln. Deutsche Fassung EN 1999-1-1:2007 + A1:2009 + A2:2013
- [10] DIN EN 1999-1-1/NA: 2013-05, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln
- [11] DIN EN 1999-1-1/NA/A1: 2014-06, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Änderung 1
- [12] DIN EN 1999-1-1/NA/A2: 2015-03, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Änderung 2
- [13] DIN EN 1999-1-4:2010-05, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-4: Kaltgeformte Profiltafeln. Deutsche Fassung EN 1999-1-4:2007 + AC:2009
- [14] DIN EN 1999-1-4/A1:2011-11, Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken - Teil 1-4: Kaltgeformte Profiltafeln. Deutsche Fassung EN 1999-1-4:2007/A1:2011
- [15] bauforumstahl: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Band 1: Allgemeine Regeln und Hochbau. DIN EN 1993-1-1 mit Nationalem Anhang. Kommentar und Beispiele. 1. Auflage 2014
- [16] Petersen, Chr.: Stahlbau. Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 4. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2013
- [17] Geißler, K.: Handbuch Brückenbau. Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung. Ernst & Sohn, Berlin 2014
- [18] Wagenknecht, G.: Stahlbau-Praxis nach Eurocode 3. Band 1, 4. Auflage. Gießen 2011
- [19] Brune, B.; Kalameya, J.: Kaltgeformte, dünnwandige Bauteile und Bleche aus Stahl nach DIN EN 1993-1-3 in Stahlbau Kalender 2009, Ernst & Sohn, Berlin 2009
- [20] Radlbeck, Chr.; Knödel, P.; Gitter, R.; Maniatis, I.; Haese, A.; Herrmann, T.; Allmeier, S.; Krause, G.; Mader, W.: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken. Stahlbau Kalender 2016, Ernst & Sohn, Berlin 2016
- [21] Laufs, T.; Radlbeck, Chr.: Aluminiumbau-Praxis nach Eurocode 9, Berechnung und Konstruktion. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2015
- [22] Kretz, J.: Querschnitts- und Stabtragfähigkeiten nach EC 3, Klassifizierung von Querschnitten nach DIN EN 1993-1-1. In mb-news Juli 4/2013