

Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen

(Dritte Auflage)

© 2006 Euro Inox und The Steel Construction Institute

ISBN 2-87997-210-8

(Zweite Auflage 2002: ISBN 2-87997-041-5)

Euro Inox und The Steel Construction Institute sind um die technische Richtigkeit der hier präsentierten Informationen bemüht. Der Leser soll jedoch darauf aufmerksam gemacht werden, dass das Informationsmaterial nur allgemeinen Informationszwecken dient. Euro Inox, The Steel Construction Institute und die anderen Beteiligten weisen jede Haftung oder Verantwortung für jegliche Verluste, Schäden oder Verletzungen von sich, die im Zusammenhang mit der Verwendung dieser Veröffentlichung entstehen könnten.

CD-ROM, in 7 Sprachen	ISBN 2-87997-187-X
Englische Ausgabe	ISBN 2-87997-204-3
Finnische Ausgabe	ISBN 2-87997-208-6
Französische Ausgabe	ISBN 2-87997-205-1
Italienische Ausgabe	ISBN 2-87997-206-X
Spanische Ausgabe	ISBN 2-87997-207-8
Schwedische Ausgabe	ISBN 2-87997-209-4

Geleitwort

Dritte Auflage

Diese dritte Auflage der Bemessungshilfen entstanden unter Leitung des Steel Construction Institute als Teilergebnis des RFCS-Projektes - *Valorisation Project – Structural design of cold worked austenitic stainless steel* (Vertragsnr. RFS2-CT-2005-00036). Sie enthalten eine vollständige Überarbeitung der zweiten Auflage und erweitern den Umfang auf kaltgeformte austenitische nichtrostende Stähle und auf aktuelle Bezüge zu den Eurocode-Entwürfen. Die dritte Auflage nimmt Bezug auf die betreffenden Teile von EN 1990, EN 1991 und EN 1993. Der Abschnitt 7: Brandschutzbemessung wurde aktualisiert und neue Abschnitte zur Dauerhaftigkeit von nichtrostenden Stählen im Kontakt mit Erdboden und Lebenszykluskosten wurden ergänzt.

Drei neue Bemessungsbeispiele wurden ergänzt, die die geeignete Anwendung von kaltgeformtem nichtrostenden Stahl zeigen. Die Erstellung erfolgte durch die folgenden Partner:

- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Technical Research Centre of Finland (VTT)

Eine Projektsteuerungsgruppe, bestehend aus Vertretern einer jeden Partnerorganisation und weiteren Vertragspartnern, begleitete die Arbeiten und trug zur Entstehung dieser Bemessungshilfen bei. Die folgenden Organisationen haben bei der Erstellung der dritten Auflage mitgewirkt:

- The Steel Construction Institute (SCI) (Projektkoordinator)
- Centro Sviluppo Materiali (CSM)
- CUST, Blaise Pascal University
- Euro Inox
- RWTH Aachen, Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau
- VTT Technical Research Centre of Finland
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Geleitwort zur zweiten Auflage

Die vorliegenden Bemessungshilfen entstanden unter Leitung des Steel Construction Institute als Teilergebnis des von der EGKS mitfinanzierten *Valorisierungsprojekts - Entwicklungen zum Gebrauch nichtrostender Stähle im Bauwesen* (Vertragsnr. 7215-PP-056). Sie enthalten eine vollständige Überarbeitung des *Design manual for structural stainless steel*, was zwischen 1989 und 1992 am Steel Construction Institute entstand und 1994 von Euro Inox veröffentlicht wurde.

Die vorliegende neue Auflage berücksichtigt zusätzlich die Fortschritte der vergangenen letzten 10 Jahre, durch die ein erweiterter Wissensstand zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen erlangt wurde. Insbesondere enthält sie neue Bemessungsempfehlungen, die dem

kürzlich abgeschlossenen und von der EGKS mitunterstützten Projekt *Development of the use of stainless steel in construction* (Vertragsnr.: 7210-SA/842) entnommen wurden. Die Bemessungshilfen konnten somit um die Behandlung von Rundhohlprofilen und um die Brandbemessung erweitert werden. In den letzten zehn Jahren wurde eine beachtliche Anzahl europäischer Normen zu Verbindungsmitteln, Verarbeitung, Konstruktion, Schweißen, etc. von nichtrostenden Stählen verabschiedet. Die Bemessungshilfen wurden um die entsprechenden Verweise zu diesen Normen und Zahlenwerken aktualisiert.

Eine Projektsteuerungsgruppe, bestehend aus Vertretern einer jeden Partnerorganisation und weiteren Vertragspartnern, begleitete die Arbeiten und trug zur Entstehung dieser Bemessungshilfen bei.

Die anhängigen Bemessungsbeispiele wurden von folgenden Partnern erdacht und erarbeitet:

- Luleå Institute of Technology
- Technical Research Centre of Finland (VTT)
- RWTH Aachen
- Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM)
- The Steel Construction Institute (SCI)

Nachstehende Personen waren Mitglieder der Projektsteuerungsgruppe und/oder an der Erarbeitung der Bemessungsbeispiele beteiligt:

Nancy Baddoo	The Steel Construction Institute
Massimo Barteri	Centro Sviluppo Materiali (CSM)
Bassam Burgan	The Steel Construction Institute
Helena Burstrand Knutsson	Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
Lars Hamrebjörk	Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
Franz-Josef Heise	Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. (SAES)
Jouko Kouhi	Technical Research Centre of Finland (VTT)
Roland Martland	Health and Safety Executive (UK)
Enrique Mirambell	Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Anders Olsson	AvestaPolarit AB (publ) (vormals Luleå Institute of Technology)
Thomas Pauly	Euro Inox
Esther Real	Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Ivor Ryan	Centre Technique Industriel de la Construction Métallique
Heiko Stangenberg	RWTH Aachen, Lehrstuhl für Stahlbau
Asko Talja	Technical Research Centre of Finland (VTT)

Danksagung

Nachstehende Organisationen beteiligten sich mit finanzieller Förderung an dieser dritten Auflage der Bemessungshilfen:

- Research Fund for Coal and Steel (RFCS) (*formerly*, European Coal and Steel Community (ECSC))
- Euro Inox

Ihrer Unterstützung sei hier ausdrücklich gedankt. Ebenfalls dank gebührt den europäischen Herstellern von nichtrostendem Stahl und deren Verbänden, die einen Beitrag zu dieser und den beiden vorangegangenen Auflagen geleistet haben.

Vorwort

Diese Bemessungshilfen sollen den Ingenieuren/Innen als Anleitung dienen, die zwar im Allgemeinen Stahlbau jedoch nicht unbedingt im Umgang mit nichtrostenden Stählen erfahren sind. Sie haben jedoch weder rechtlichen Status, noch entbinden sie den Ingenieur von seiner Verantwortung, für ein sicheres und funktionales Tragwerk zu sorgen.

Die Bemessungshilfen bestehen aus zwei Teilen:

- Teil I - Empfehlungen
- Teil II - Bemessungsbeispiele

In Teil I werden die Bezeichnungen der Grenzzustandsphilosophie verwendet und entsprechen denen der folgenden Teile des Eurocode 3 *Bemessung von Stahlbauten*:

EN 1993-1-1 *Bemessung von Stahlbauten: Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau*

EN 1993-1-2 *Bemessung von Stahlbauten: Bemessung im Brandfall*

EN 1993-1-3 *Bemessung von Stahlbauten: Kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche*

EN 1993-1-4 *Bemessung von Stahlbauten: Nichtrostende Stähle*

EN 1993-1-5 *Bemessung von Stahlbauten: Aus Blechen zusammengesetzte Bauteile*

EN 1993-1-8 *Bemessung von Stahlbauten: Bemessung von Anschlüssen*

EN 1993-1-9 *Bemessung von Stahlbauten: Ermüdung von Stahlbauten*

EN 1993-1-10 *Bemessung von Stahlbauten: Stahlsortenauswahl nach Bruchzähigkeit und Materialdicke*

Die Bemessungshilfen enthalten empfohlene Werte für bestimmte Beiwerte, die Anpassungen auf nationaler Ebene unterliegen und in nationalen Anwendungsdokumenten geregelt sind.

Die Bemessungsbeispiele im Teil II veranschaulichen die Handhabung der Bemessungsempfehlungen. Es wird jeweils auf die entsprechenden Kapitel und konkreten Bemessungsempfehlungen verwiesen.

Die Bemessungsempfehlungen und Bemessungsbeispiele können im Internet bei Steelbiz, einer technischen Informationsplattform des SCI unter (www.steelbiz.org) und bei Euro Inox unter (<http://www.euro-inox.org>) abgerufen werden. Ein Kommentar zu den Bemessungsempfehlungen einschließlich sämtlicher Verweisquellen steht dort ebenso zur Verfügung. Der Kommentar dient dem Ingenieur, die Grundlagen der Bemessungsempfehlungen richtig einzuschätzen und weitere Überarbeitungen im Zuge des wachsenden Kenntnisstandes nachvollziehen zu können. Es wird die Gelegenheit ergriffen, hier die Ergebnisse verschiedener Versuchsprogramme, die speziell auf den Hintergrund dieser Bemessungshilfen abzielen, zu präsentieren. Die Bemessungsempfehlungen, Bemessungsbeispiele und Kommentare sind bei Euro Inox auch auf CD-Rom erhältlich.

Ein Programm zur Bemessung kaltgeformter Bauteile aus nichtrostendem Stahl auf zentrischen Zug, Biegung oder zentrischen Druck steht im Internet unter www.steel-stainless.org/software zur freien Verfügung. Die Querschnittswerte und Bauteilwiderstände werden hierzu gemäß der vorliegenden Bemessungshilfen errechnet.

Die hier vorgestellten Bemessungsempfehlungen haben den zum Erscheinungszeitpunkt bestmöglichen verfügbaren Wissensstand als Grundlage. Jedoch wird keinerlei Verantwortung für jegliche Art von Verletzungen, Todesfällen, Ausfällen, Beschädigungen oder Verzögerungen, die, wie auch immer, in Zusammenhang mit der Anwendung dieser Bemessungsempfehlungen stehen könnten, von den Projektpartnern oder von in Verbindung mit diesen Bemessungshilfen stehenden Personen übernommen.

Inhalt

	Seite
GELEITWORT	iii
DANKSAGUNG	iv
VORWORT	v
TEIL 1 – EMPFEHLUNGEN	
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Gültigkeitsbereich	1
1.2 Bezeichnungen	1
1.3 Definitionen der Bauteilachsen	3
1.4 Einheiten	3
2 GRUNDLAGEN DER BEMESSUNG	5
2.1 Allgemeine Voraussetzungen	5
2.2 Grenzzustandsbemessung	5
2.3 Belastung	7
3 WERKSTOFFE: EIGENSCHAFTEN, STAHLSORTENWAHL UND DAUERHAFTIGKEIT	11
3.1 Werkstoffgüten	11
3.2 Mechanisches Verhalten und Bemessungswerte der Eigenschaften	17
3.3 Physikalische Eigenschaften	22
3.4 Temperatureffekte	23
3.5 Lebenszykluskosten	23
3.6 Werkstoffwahl	24
3.7 Dauerhaftigkeit	27
4 QUERSCHNITTSWERTE	37
4.1 Allgemeines	37
4.2 Maximale Breiten/Dicken-Verhältnisse	37
4.3 Klassifizierung der Querschnitte	37
4.4 Mitwirkende Breiten	41
4.5 Ausgesteifte Querschnittsteile	46
4.6 Berechnung der Querschnittswerte	49
4.7 Querschnittstragfähigkeit	52
5 BEMESSUNG VON BAUTEILEN	57
5.1 Einleitung	57
5.2 Zugglieder	57
5.3 Druckglieder	57
5.4 Biegebeanspruchung von Bauteilen	61
5.5 Bauteile bei Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung	71
6 BEMESSUNG VON VERBINDUNGEN	73
6.1 Allgemeine Empfehlungen	73
6.2 Geschraubte Verbindungen	75
6.3 Verbindungsmittel für dünnwandige Bauteile	80
6.4 Geschweißte Verbindungen	80

7	BRANDSCHUTZBEMESSUNG	85
7.1	Allgemeines	85
7.2	Mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen	85
7.3	Thermische Eigenschaften bei hohen Temperaturen	88
7.4	Bestimmung des baulichen Feuerwiderstands	89
8	ERMÜDUNG	97
9	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	98
9.1	Allgemeines	98
9.2	Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Kurve	98
9.3	Bauteilversuche	98
10	ASPEKTE BEI DER VERARBEITUNG	100
10.1	Einleitung	100
10.2	Lagerung und Bearbeitung	101
10.3	Formgebung	101
10.4	Schweißen	103
10.5	Verschleiß und Anfressungen	108
10.6	Nachbearbeitung	108

TEIL II – BEMESSUNGSBEISPIELE

TEIL 1 – EMPFEHLUNGEN

1 EINFÜHRUNG

1.1 Gültigkeitsbereich

Die Empfehlungen in diesem Teil der Bemessungshilfen beziehen sich auf die Stahlsorten, die als typisch für bautechnische Anwendungen bezeichnet werden können. Die Empfehlungen sollen im Wesentlichen der Bemessung von Bauteilen und Bauteilkomponenten von Gebäuden, Offshore-Anlagen und dergleichen dienen. Die vorliegenden Bemessungshilfen sollten nicht zu besonderen Tragwerken wie kerntechnischen Anlagen oder Druckbehälter, für welche bereits extra ausgewiesene Normen im Zusammenhang mit der Anwendung nichtrostender Stähle existieren, herangezogen werden.

Die Empfehlungen richten sich vielmehr an Aspekte des Werkstoffverhaltens, die Bemessung kaltgeformter und geschweißter Bauteile sowie ihre Verbindungen. Sie gelten für austenitische und austenitisch-ferritische nichtrostende Stähle, die üblicherweise im Bauwesen eingesetzt werden. Die Bemessungsempfehlungen wurden in Anlehnung an die Grenztragfähigkeitsphilosophie formuliert.

1.2 Bezeichnungen

Im Allgemeinen werden in diesen Bemessungshilfen dieselben Bezeichnungen wie in EN 1993-1-1: Eurocode 3, *Bemessung von Stahlbauten: Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau* verwendet. Ausführlicher Gebrauch wird von Indizes gemacht, wie z.B. $N_{b,z,Rd}$ für den Bemessungswiderstand (R_d für design resistance) einer Stütze unter Normalkraft (N) gegen Knicken (b für buckling) um die schwache Achse (Index z).

Einheiten- und Achsenbezeichnungen von Querschnitten werden in Abbildung 1.1 veranschaulicht. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zur gängigen Praxis in vielen Ländern die starke Achse normalerweise mit $y-y$ und die schwache mit $z-z$ bezeichnet wird, siehe Kapitel 1.3.

Lateinische Großbuchstaben

<i>A</i>	Außergewöhnliche Last; Fläche
<i>C</i>	Fester Wert; Faktor
<i>E</i>	Elastizitätsmodul; Wirkung der Last
<i>F</i>	Last; Kraft
<i>G</i>	Ständige Last; Schubmodul
<i>I</i>	Flächenmoment zweiten Grades
<i>L</i>	Länge; Spannweite; Systemlänge
<i>M</i>	Biegemoment
<i>N</i>	Normalkraft
<i>Q</i>	Veränderliche Last
<i>R</i>	Widerstand
<i>V</i>	Querkraft
<i>W</i>	Widerstandsmoment

Griechische Großbuchstaben

Δ Differenz zwischen (steht vor dem Hauptsymbol)

Lateinische Kleinbuchstaben

a Abstand zwischen zwei Steifen; Schweißnahtdicke
b Dicke; Breite
c Abstand; einseitig gestützte Querschnittsteile
d Durchmesser; Höhe
e Exzentrizität; Verschiebung der Schwerachse; Randabstand; Endabstand
f Festigkeit (eines Werkstoffs)
g Spaltgröße
h Höhe
i Trägheitsradius; Ganze Zahl
k Koeffizient; Beiwert
l Knicklänge
m Konstante
n Anzahl der/ von ...
p Neigung; Abstand
q Streckenlast
r Radius; Ausrundungshalbmesser
s gestaffelter Abstand
t Dicke
uu Starke (Haupt-)Achse
vv Schwache (Neben-)Achse
w Verwölbung
xx, yy, zz Rechteckige Achsen

Griechische Kleinbuchstaben

α (alpha) Verhältnis; Beiwert
 β (beta) Verhältnis; Beiwert
 γ (gamma) Teilsicherheitsbeiwert
 ε (epsilon) Dehnung; Koeffizient = $\left(\frac{235 E}{210000 f_y} \right)^{0,5}$
 λ (lambda) Schlankheit (mit Balken: bezogene Schlankheit)
 ρ (rho) Reduktionsbeiwert
 σ (sigma) Normalspannung
 τ (tau) Schubspannung
 φ (phi) Verhältnis
 χ (chi) Reduktionsbeiwert (beim Stabilität)
 ψ (psi) Spannungsverhältnis; Reduktionsbeiwert

Tiefgestellte Indizes

a Durchschnitt (average)
b Lochleibung (bearing); Knicken, Beulen (buckling); Schraube (bolt)
c Querschnitt (Cross section)
cr kritisch (Critical)
d Bemessung (design)
E Euler, Schnittgröße
eff effektiv
e effektiv (bei nachfolgenden Indizes)
el elastisch
f Flansch
g Brutto

i, j, k	Indizes (als Platzhalter für Zahlen)
k	charakteristisch
LT	Biegedrill-, (lateral-torsional)
M	(unter Berücksichtigung von) Biegemomenten
N	(unter Berücksichtigung von) Normalkräften
net	netto
o	anfänglich, Anfangs-
pl	plastisch
R	Widerstand (Resistance)
r	abgeminderter Wert (reduced value)
S	Schnittgröße; Sekante
s	Zugspannung (Fläche); Steife (Stiffener)
t	Zug (Tension; Tensile); Torsion
u	Starke Querschnittsachse; äußerst (Ultimate)
V	(unter Berücksichtigung von) Querkraften
v	Schub; Schwache Querschnittsachse
w	Steg (web); Schweißnaht (weld); Verwölbung (warping)
x	Bauteillängsachse
y	Fließ- (Yield (proof value)); Querschnittsachse (starke Achse außer bei unsymmetrischen Querschnitten)
z	Querschnittsachse (schwache Achse außer bei unsymmetrischen Querschnitten)
σ	Normalspannung
τ	Schubspannung

1.3 Definitionen der Bauteilachsen

Im Allgemeinen gilt für die Bauteilachsen folgende Definition:

xx	in Längsrichtung des Bauteils.
yy	Querschnittsachse senkrecht zum Steg bzw. längeren Schenkel bei Winkelprofilen.
zz	Querschnittsachse parallel zum Steg bzw. längeren Schenkel bei Winkelprofilen.

Die yy-Achse stellt üblicherweise die starke, die zz-Achse die schwache Querschnittsachse dar. Bei Winkelprofilen sind starke und schwache Achse (uu und vv) gegenüber der yy- and zz-Achse gedreht, siehe Abbildung 1.1.

Für die Momentenachsen gilt folgende Indexschreibweise:

“Es gilt die Achse, um die das Moment wirkt”.

Zum Beispiel wird bei einem I-Profil ein Biegemoment in Stegebene mit M_y bezeichnet, da es um die Querschnittsachse senkrecht zum Steg wirkt.

1.4 Einheiten

Es werden die folgenden Berechnungseinheiten empfohlen:

- Kräfte und Lasten $\text{kN}, \text{kN/m}, \text{kN/m}^2$
- Dichte kg/m^3
- Wichte kN/m^3
- Spannungen und Festigkeiten N/mm^2 (= MN/m^2 oder MPa)

- Biegemomente kNm

Es sei darauf hingewiesen, dass in der europäischen Praxis ein Komma “,” als Dezimaltrennzeichen verwendet wird.

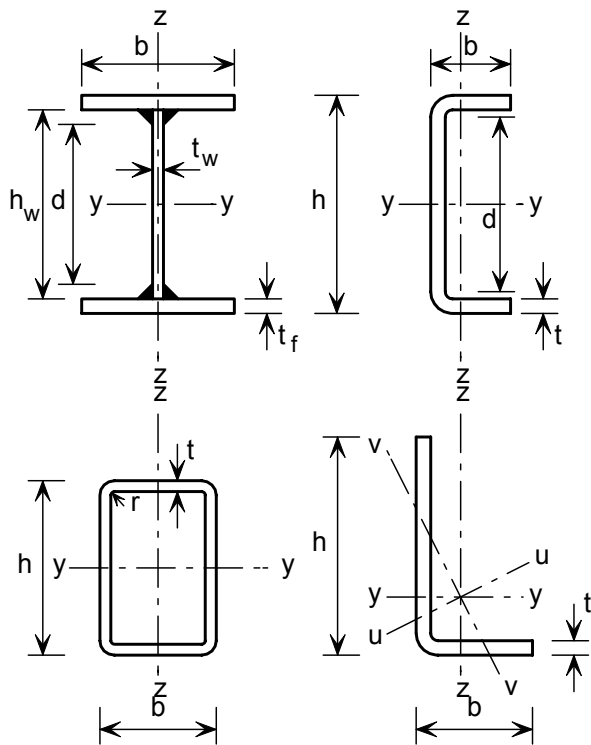


Abbildung 1.1 *Bezeichnungen und Querschnittsachsen*

2 GRUNDLAGEN DER BEMESSUNG

2.1 Allgemeine Voraussetzungen

Ein Tragwerk sollte so entworfen sein, dass es:

- für den veranschlagten Lebenszeitraum standsicher ist,
- den Lasten während der Bauphase, Ausbau und Nutzung standhält,
- Unfallschäden infolge Überlastung lokal begrenzt,
- in Hinblick auf die Instandhaltungskosten eine angemessene Dauerhaftigkeit aufweist.

Die oben genannten Anforderungen können durch geeignete Baustoffe, entsprechenden Entwurf und Detaillierung und durch die Angabe von Qualitätskontrollen für Bau und Wartung erreicht werden.

Tragwerke sind unter Beachtung aller zu erwartender Grenzzustände zu bemessen.

2.2 Grenzzustandsbemessung

Grenzzustände sind Extremalbedingungen, die es bei ihrer Überschreitung dem Tragwerk unmöglich machen, den Anforderungskriterien zu genügen. Es werden drei Klassen von Grenzzuständen unterschieden: Grenzzustände der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit. Grenzzustände der Tragfähigkeit sind solche, bei deren Überschreitung es zum Teil- oder Gesamteinsturz des Tragwerks kommen kann, also Menschenleben gefährdet wird. Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit bezeichnen Zustände, in denen die Gebrauchsanforderungen nicht mehr eingehalten werden. Grenzzustände der Dauerhaftigkeit kann man zum Teil der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zurechnen, abhängig davon ob, zum Beispiel, die Korrosion die Tragfähigkeit herabgesetzt oder aber das äußere Erscheinungsbild geschmälert wird. Beispiele für Grenzzustände sind nachstehend aufgeführt:

Grenzzustand der Tragfähigkeit

- Tragfähigkeit (wie z.B. gegen Plastizieren im allgemeinen, Bruchversagen, Stabilität und das Erreichen kinematischer Mechanismen)
- Durchschlagprobleme und Verschieblichkeit
- Ermüdungsrisse

Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

- Verformungen
- Schwingungen (z.B. windinduziert)
- Behebbarer Schäden infolge Ermüdung
- Kriechen

Grenzzustand der Dauerhaftigkeit

- Korrosion

- Metallische Stabilität

Grenzzustand der Tragfähigkeit

Bei Grenzzuständen der Tragfähigkeit gilt folgendes Nachweisformat:

$$E_d \leq R_d \quad (2.1)$$

wobei:

- E_d der beiwertbehaftete Bemessungswert der einwirkenden Schnittgröße im Bauteil oder Konstruktionsteil im Tragwerk ist (siehe Abschnitt 2.3), und
- R_d der entgegenstehende Bemessungswiderstand gemäß zutreffendem Abschnitt in diesen Empfehlungen.

Der Bemessungswiderstand R_d wird im Allgemeinen mit R_k/γ_M angegeben, wobei R_k der charakteristische Widerstand und γ_M der Teilsicherheitsbeiwert ist. Der Teilsicherheitsbeiwert γ_M kann verschiedene Größen annehmen. Tabelle 2.1 enthält die γ_M -Werte, die in Verbindung mit diesen Bemessungshilfen zu verwenden sind und EN 1993-1-4 und EN 1993-1-8 entstammen. Es wird an dieser Stelle ebenfalls auf den nationalen Anhang (NA) zur EN 1993-1-4 und zu anderen relevanten Teilen von EN 1993 desjenigen Landes verwiesen, für welches das Tragwerk bemessen wird, da von Tabelle 2.1 abweichende Werte für γ_M angegeben sein können. (Falls ein NA nicht existiert, sollten die γ_M -Beiwerte mit der zuständigen nationalen Bauaufsichtsbehörde vereinbart werden.)

Alternativ zum rechnerischen Nachweis kann der Bemessungswiderstand auch anhand von Material-, Bauteil- und Konstruktionsversuchen bestimmt werden (zur Vorgehensweise siehe Abschnitt 9).

Tabelle 2.1 Richtwerte für γ_M

Tragfähigkeit von:	Symbol	Wert (EN 1993-1-4)
Querschnitte mit ausreichendem Fließvermögen einschließlich beulgefährdete Querschnitte	γ_{M0}	1,10
Stabilitätsgefährdete Bauteilen gemäß Bauteilnachweis	γ_{M1}	1,10
Bruchgefährdete zugbeanspruchte Querschnitte	γ_{M2}	1,25
Schrauben, Schweißnähte, Bolzen und bei Plattenbiegung	γ_{M2}	1,25
Tragfähigkeit von:	Symbol	Wert (EN 1993-1-8)
Hohlprofilanschlüsse bei Fachwerken	γ_{M5}	1,00
Bolzenverbindungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	$\gamma_{M6,ser}$	1,00

Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Das entsprechende Format für Gebrauchstauglichkeit lautet:

$$E_d \leq C_d \quad (2.2)$$

mit:

- E_d Bemessungswert der Auswirkung der Einwirkungen in der Dimension des Gebrauchstauglichkeitskriteriums, z.B. Bauteilverformung durch Kräfte und Momente im Bauteil unter charakteristischer Belastung (F_k , siehe Abschnitt 2.3.4), und

C_d Bemessungswert der Grenze für das maßgebende Gebrauchstauglichkeitskriterium

Grenzzustände der Dauerhaftigkeit

Zu diesen Zuständen müssen Korrosionserscheinungen beachtet und bewertet werden. Diese werden in Abschnitt 3.7 angesprochen.

2.3 Belastung

2.3.1 Allgemeines

In den Eurocodes werden die Belastungen als Einwirkungen bezeichnet. Eine Einwirkung wird definiert als

- eine Gruppe von Kräften (Lasten), die auf das Tragwerk einwirkt (direkte Einwirkung),
- eine Gruppe eingepprägter Verformungen oder Beschleunigungen, z.B. infolge von Temperaturänderungen, Feuchtigkeitsschwankungen, Setzungen oder Erdbeben (indirekte Einwirkungen).

Charakteristische Werte (F_k) für einzelne Einwirkungen werden festgelegt:

- in EN 1991 *Einwirkungen auf Tragwerke* (unter Berücksichtigung von Ergänzungen und/oder Abweichungen im jeweiligen Nationalen Anhang) oder anderen maßgebenden Lastnormen, oder
- durch den Bauherrn oder den Tragwerksplaner in Absprache mit dem Bauherrn, vorausgesetzt, dass die Mindestanforderungen in den Belastungsnormen oder der zuständigen Baubehörde berücksichtigt werden.

Die Bemessungswerte für Einzelkräfte (F_d) ergeben sich durch Multiplikation der charakteristischen Werte mit den Teilsicherheitsbeiwerten für die Einwirkung (γ_F).

Der Bemessungsfall ergibt sich, indem alle realistischen Einwirkungskombinationen berücksichtigt und die kritischen Fälle betrachtet werden.

2.3.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit – bewertbehaftete Lasten für allgemeine Anwendungsfälle

Es werden die folgenden Einwirkungsarten betrachtet:

- “ständige” Einwirkungen (G) – z.B. Eigengewicht des Tragwerks, Bauwerksausstattung und feste Einrichtungen
- “veränderliche” Einwirkungen (Q) z.B. Verkehrslasten, Windlasten, Schneelast und thermische Last
- “außergewöhnliche” Lasten (A) – z.B. Explosion, Feuer und Fahrzeuganprall

EN 1990 enthält die Einwirkungskombinationen für die Bemessung von Bauwerken und auch die empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen γ_F . Es soll an dieser Stelle auch auf den Nationalen Anhang zu EN 1990 desjenigen Landes verwiesen werden, für welches das Tragwerk vorgesehen ist, weil von den empfohlenen Werten abweichende Werte für γ_F eingesetzt werden können. Der NA enthält auch die empfohlenen Kombinationsbeiwerte (ψ - Beiwerte) und Beiwerte für ungünstig wirkende ständige Einwirkungen (ξ - Reduktionsbeiwert). (Wenn ein NA nicht verfügbar ist, sollten γ_F , ψ und ξ Beiwerte mit der zuständigen nationalen Bauaufsichtsbehörde vereinbart werden.). Hinzuweisen ist auf den Nationalen Anhang zu EN 1991, der die Zahlenwerte für Belastungen enthält.

Gemäß EN 1990 können für den normalen Gebrauch, d.h. in Situationen, die keine außergewöhnlichen Einwirkungen einschließen, die Lastkombinationen wie folgt ermittelt werden:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.3)$$

oder alternativ mit dem ungünstigeren Wert aus den folgenden Ausdrücken:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.4a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.4b)$$

Hierin ist:

- $G_{k,j}$ der charakteristische Wert der ständigen Einwirkungen,
- $Q_{k,1}$ der charakteristische Wert der dominierenden veränderlichen Einwirkung 1 (d.h. der am ungünstigsten wirkenden veränderlichen Leiteinwirkung),
- $Q_{k,i}$ die charakteristischen Werte der begleitenden veränderlichen Einwirkungen i ,
- j der Index der ständigen Einwirkung,
- i der Index der veränderlichen Einwirkungen,
- $\gamma_{G,j}$ der Teilsicherheitsbeiwert für die ständige Einwirkung $G_{k,j}$,
- $\gamma_{Q,1}$ der Teilsicherheitsbeiwert für die dominierende veränderliche Einwirkung 1
- ξ_j der Reduktionsbeiwert für ungünstig wirkende ständige Einwirkungen G
- $\psi_{0,i}$ der Reduktionsbeiwert für den Kombinationswert einer veränderlichen Einwirkung Q .

An dieser Stelle soll nochmals auf das NA des jeweiligen Landes, für welches das Tragwerk bestimmt ist, verwiesen werden.

Die folgenden empfohlenen Zahlenwerte sind in EN 1990 enthalten:

$$\begin{aligned} \gamma_{G,j} &= 1,35 \quad (\text{bei ungünstiger Wirkung}) \\ \gamma_{Q,1} &= 1,5 \quad \gamma_{Q,i} = 1,5 \\ \xi &= 0,85 \end{aligned}$$

Der Wert für ψ_0 ist abhängig von der Art der Belastung (siehe EN 1990).

Die Gleichungen 2.4a und 2.4b wurden eingeführt, weil die Gleichung 2.3 bei hochbelasteten Tragwerken die Einwirkungen weit überschätzt. Für Stahltragwerke ergeben sich bei Anwendung der Gleichungen 2.4a und 2.4b im Allgemeinen geringere Lasten im Vergleich zu Gleichung 2.3.

2.3.3 Grenzzustände der Tragfähigkeit – beiwertbehaftete Lasten bei Offshore-Anwendungen

Hier wird verwiesen auf: API RP2A - LRFD *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design*, First Edition, 1993.

Bei Verwendung der vorliegenden Bemessungshilfen wird vorgeschlagen, die nachstehenden Lastkombinationen der API RP2A, entsprechend ihrer Randbedingungen und in Verbindung mit den Lasten aus API RP2A, für die Bemessung von Konstruktionen aus nichtrostendem Stahl zu verwenden. Es ist zu beachten, dass es sich um dieselben Bezeichnungen handelt wie in API RP2A.

Operative Bedingungen

$$1,3D_1 + 1,3D_2 + 1,5L_1 + 1,5L_2 + 1,2(W_o + 1,25D_n) \quad (2.5)$$

Extreme Sturmbedingungen:

$$1,1D_1 + 1,1D_2 + 1,1L_1 + 1,35(W_e + 1,25D_n) \quad (2.6)$$

Wirken Schnittgrößen infolge Eigengewicht entlastend in Kombination mit Schnittgrößen aus Wind-, Wellen- und Strömungslasten, sind die Eigengewichtslasten wie folgt zu reduzieren:

$$0,9D_1 + 0,9D_2 + 0,8L_1 + 1,35(W_e + 1,25D_n) \quad (2.7)$$

wobei:

- D_1 die ständige Last aus Eigengewicht des Tragwerks, der Anbauteile und der ständigen Einrichtungen ist,
- D_2 das Eigengewicht der Gerätschaft und anderer fest installierter, nicht ruhender Objekte ist,
- L_1 die Betriebslast 1 (sie beinhaltet die Gewichte von Füllstoffen in Leitungen und Tanks) ist,
- L_2 die Betriebslast 2 (kurzzeitig wirkende Kräfte herrührend aus Hubbetrieb des Bohrgeräts, durch Krane, Maschinentätigkeit, Kesselbefestigung oder Hubschrauberbeladung),
- W_o die Betriebsbelastung aus Wind, Brandung und Strömung oder deren Auswirkung ist,
- W_e die Extremalbelastung aus Wind, Brandung und Strömung oder deren Auswirkung ist (bei einer 100 Jahre Wiederkehrperiode)
- D_n die Trägheitskräfte sind.

2.3.4 Belastungen bei Gebrauchstauglichkeit

Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sollten für die folgenden Lastfallkombinationen nachgewiesen werden:

- Charakteristische Kombination
- Häufige Kombination
- Quasi-ständige Kombination

In EN 1990 sind Lastfallkombinationen für die Bemessung im Hochbau angegeben (zu beachten ist der Nationale Anhang für dasjenige Land, für welches das Tragwerk vorgesehen ist). EN 1990 fordert auch, dass die zulässigen Durchbiegungen mit dem Bauherrn abzustimmen sind.

Für die charakteristische Kombination, die i.d.R. für nicht umkehrbare Auswirkungen am Tragwerk verwendet wird, sollte die folgende Lastfallkombination verwendet werden:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.8)$$

Alle Terme sind in Abschnitt 2.3.2 definiert.

Es ist zu beachten, dass EN 1990 Lastfallkombinationen für folgende Situationen bereithält:

- zur Ermittlung der Verformungen unter normalen Lastfallkombinationen (Absatz A.1.4.3(1)),
- wenn Verformungen infolge Langzeitbelastung infolge Schwinden, Relaxation oder Kriechen beachtet werden müssen (Satz A.1.4.3(6)),
- wenn das Erscheinungsbild des Tragwerks, der Nutzungskomfort oder die Funktionstauglichkeit von Maschinen beachtet werden müssen (Absätze A.1.4.3(4) und (5)).

3 WERKSTOFFE: EIGENSCHAFTEN, STAHLSORTENWAHL UND DAUERHAFTIGKEIT

3.1 Werkstoffgüten

3.1.1 Einführung

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Arten nichtrostender Stähle. Nicht alle eignen sich für die bautechnische Anwendung, insbesondere wenn Schweißverbindungen vorgesehen sind. Man unterscheidet fünf Basisgruppen nichtrostender Stähle, die man nach ihrem metallurgischem Gefüge klassifizieren kann: es handelt sich hierbei um austenitische, ferritische, martensitische, Duplex-Stähle (austenitisch-ferritische) und ausscheidungsgehärtete Stähle. Nichtrostende Stähle der austenitischen und der Duplex-Gruppe sind im Allgemeinen bei bautechnischen Anwendungen am gebräuchlichsten.

Austenitische nichtrostende Stähle weisen eine gute Kombination aus Korrosionsbeständigkeit, Umformungs- und Verarbeitungseigenschaften auf. Duplex-Stähle haben eine hohe Festigkeit und haben eine gute Beständigkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion.

Die gebräuchlichsten Stahlsorten, auf die üblicherweise als Standardaustenite verwiesen wird, sind 1.4301 (im Englischen auch als 304 bekannt) und 1.4401 (auch bezeichnet als 316). Sie enthalten etwa 17-18% Chrom und 8-11% Nickel. Die Sorte 1.4301 eignet sich für ländliche, städtische und leichtindustrielle Anwendungen, wohingegen die Sorte 1.4401 eine höher legierte Sorte ist, die eher für maritime und schwerindustrielle Standorte geeignet ist.

Die analogen Stahlsorten mit niedrigeren Kohlenstoffanteilen heißen 1.4307 (304L) und 1.4404 (316L). Die Stahlsorten 1.4301 und 1.4401 wurden in der Vergangenheit mit deutlich höheren Kohlenstoffanteilen mit entsprechenden Folgen für ihre Korrosionsbeständigkeit¹ produziert. Es wurde daher entweder eine 'L'-Güte oder ein stabilisierter Stahl wie die Sorten 1.4541 und 1.4571 verwendet, wenn Bedenken hinsichtlich des Korrosionsverhaltens in geschweißten Bereichen bestanden.

Die Stahlsorte 1.4318 besitzt einen niedrigen Kohlenstoff- und einen hohen Stickstoffgehalt und härtet beim Kaltumformen sehr schnell aus. Wegen dieser Eigenschaft wird diese Sorte bereits seit langem in der Eisenbahnindustrie angewendet. Sie eignet sich gleichermaßen in der Automobil-, der Luftfahrtindustrie und in Hochbauanwendungen. Die Sorte 1.4318 hat eine ähnlich gute Korrosionsbeständigkeit wie 1.4301, weist aber eine höhere Festigkeit auf als 1.4301. Sie eignet sich besonders bei Anwendungen, bei denen große Mengen benötigt werden. Der Bezug erfolgt direkt beim Walzwerk; interessierte Anwender sollten die Verfügbarkeit der Sorte 1.4318 direkt beim Hersteller erfragen. Die

¹ Bei bestimmten thermischen Zyklen, z.B. in der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht (WEZ), reagiert Kohlenstoff im Stahl mit Chrom und lagert sich als Chromkarbid an den Korngrenzen ab. Der lokal an den Korngrenzen entstandene Mangel an Chrom begünstigt interkristalline Korrosion und man sagt, der Stahl werde *sensibilisiert* oder er leide unter *Schweißversprödung* (siehe Abschnitt 3.7.2).

Kosten liegen im Allgemeinen geringfügig höher als bei 1.4301, abhängig von der benötigten Liefermenge.

Die zunehmende Anwendung von nichtrostenden Stählen in Tragwerken hat zu einer Nachfrage nach 'mageren' Duplex-Stahlsorten geführt, bei denen die mechanischen und korrosionsschützenden Eigenschaften von Duplex-Stahlsorten mit einer niedriglegierten chemischen Zusammensetzung kombiniert sind. In den zukünftigen Teilen 4 und 5 von EN 10088 (siehe Abschnitt 3.1.2), ist die neu entwickelte Duplex-Stahlsorte 1.4162 enthalten. Die Sorte 1.4162 eignet sich für vielfältige Anwendungen im Bereich des Bauwesens mit einer Prüffestigkeit von 450 – 530 N/mm², einer Korrosionsbeständigkeit zwischen den austenitischen Sorten 1.4301 und 1.4404 und einer mageren chemischen Zusammensetzung.

Es werden hier nur die gewalzten Werkstoffe und keine Gusswerkstoffe betrachtet. Eine Anleitung zur Stahlsortenwahl bei speziellen Anwendungsgebieten enthält Abschnitt 3.6.

3.1.2 Einschlägige Normen

Flach- und Langzeug

Die einschlägige Norm ist EN 10088, *Nichtrostende Stähle*. Sie besteht aus drei Teilen:

- Teil 1, *Verzeichnis der nichtrostenden Stähle*, enthält die chemischen Zusammensetzungen und Bezugswerte für einige physikalische Eigenschaften wie den Elastizitätsmodul *E*.
- Teil 2, *Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung*, enthält die technischen Eigenschaften und chemischen Zusammensetzungen für Werkstoffe von Flachprodukten.
- Teil 3, *Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung*, enthält die technischen Eigenschaften und chemische Zusammensetzungen für Werkstoffe von Langprodukten.

Die Teile 4 (Flacherzeugnisse) und 5 (Langerzeugnisse) von EN 10088, die Stähle für bautechnische Zwecke enthalten werden, befinden sich zur Zeit in Vorbereitung. Mit einer Herausgabe ist in 2007 zu rechnen.

Das Kennzeichnungssystem in EN 10088 besteht aus der europäischen Werkstoffkennzahl und der Stahlbezeichnung.

Zum Beispiel, besitzt Stahlgüte 304L die Kennzahl 1.4307, wobei:

1.

bedeutet, dass es sich um einen Stahl handelt.

43

eine besondere Gruppe nichtrostender Stähle bezeichnet

07

eine individuelle Stahlsortenziffer darstellt

Die Stahlbezeichnung enthält einige Informationen über die Zusammensetzung. Die Bezeichnung für den Stahl mit der Kennzahl 1.4307 lautet X2CrNi18-9, wobei:

X	2	CrNi	18-9
hoch legierten Stahl bezeichnet.	100 x % Kohlenstoff- anteil	chemischen Symbole der Hauptlegierungs- elemente	%-Angaben der Hauptlegierungs- elemente sind.

Zu jeder Bezeichnung eines nichtrostenden Stahls gehört eine individuelle Werkstoffkennzahl. Es ist zu beachten, dass viele nationale Bezeichnungen sich von denen der EN 10088 stark unterscheiden, wohingegen die älteren deutschen Bezeichnungen der DIN sehr ähnlich sind. Anhang A enthält eine Tabelle gleicher Stahlsorten mit ihren entsprechend unterschiedlichen Bezeichnungen der nationalen und europäischen Normen.

Tabelle 3.1 enthält mechanische Mindesteigenschaften gebräuchlicher nichtrostender Stähle aus EN 10088-2. Die chemische Zusammensetzung dieser Stahlsorten enthält Tabelle 3.2.

Sowohl austenitischen wie auch Duplex-Stählen kann ausreichende Sprödebruchzähigkeit bei Temperaturen von -40°C unterstellt werden.

Bemessungswerte für mechanische Eigenschaften werden in Abschnitt 3.2.4 behandelt.

Tabelle 3.1 Ausgewiesene mechanische Eigenschaften häufiger nichtrostender Stähle gemäß EN 10088-2

	Stahl- sorte	Produkt form ⁽¹⁾	Max Dicke (mm)	Minimum 0.2% Dehn- grenze ⁽²⁾ (N/mm ²)	Zug- festigkeit (N/mm ²)	Bruch- dehnung [%]
Chrom-Nickel- Basis-Austenite	1.4301	C	8	230	540 – 750	45 ⁽³⁾
		H	13,5	210	520 – 720	45 ⁽³⁾
		P	75	210	520 – 720	45
	1.4307	C	8	220	520 – 700	45
		H	13,5	200	520 – 700	45
		P	75	200	500 – 700	45
Molybdän-Chrom- Nickel-Austenite	1.4401	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
	1.4404	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
Stabilisierte Austenite	1.4541	C	8	220	520 – 720	40
		H	13,5	200	520 – 720	40
		P	75	200	500 – 700	40
	1.4571	C	8	240	540 – 690	40
		H	13,5	220	540 – 690	40
		P	75	220	520 – 670	40
Austenite mit niedri- gem Kohlenstoff- und hohem Stickstoffgehalt	1.4318	C	8	350	650 – 850	35
		H	13,5	330	650 – 850	35
		P	75	330	630 – 830	45
Duplex-Stähle	1.4362	C	8	450	650 – 850	20
		H	13,5	400	650 – 850	20
		P	75	400	630 – 800	25
	1.4462	C	8	500	700 – 950	20
		H	13,5	460	700 – 950	25
		P	75	460	640 – 840	25

Anmerkungen:

(1) C = kaltgewalztes Band, H = warmgewalztes Band, P = warmgewalztes Blech

(2) Eigenschaften quer zur Walzrichtung

(3) Bei gezogenen Werkstoffen liegt der Mindestwert um 5% niedriger

Tabelle 3.2 Chemische Zusammensetzung gemäß EN 10088-2

	Sorte	Gehalt der Legierungselemente (Maximalwert oder zulässiger Bereich) in Gewichts -%				
		C	Cr	Ni	Mo	Andere
Austenitische Stähle	1.4301	0,07	17,0 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,0		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4541	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0		Ti: 5xC – 0,7 ⁽¹⁾
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 ⁽¹⁾
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
Duplex Stähle	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22

Anmerkung:

(1) Titan wird hinzulegiert, um den Kohlenstoff zu stabilisieren und die Korrosionsbeständigkeit in den Wärmeeinflusszonen von Schweißnähten zu verbessern. Jedoch sind außer bei schweren Profilen die titanstabilisierten austenitischen Stähle weitgehend durch Stahlgüten mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, 1.4307 und 1.4404 verdrängt worden.

Schrauben

Für nichtrostende Schrauben gilt EN ISO 3506, *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus nichtrostenden Stählen*. Die Spezifikation enthält die chemischen Zusammensetzungen und mechanischen Eigenschaften für die austenitischen, martensitischen und ferritischen Gruppen. Alternative Sorten, auf die hier nicht eingegangen werden soll, sind zulässig, wenn sie die physischen und mechanischen Anforderungen erfüllen und über gleichwertige Korrosionsbeständigkeit verfügen.

In EN ISO 3506 sind Werkstoffe für Schrauben und Muttern mit dem Buchstaben “A” für austenitisch, “F” für ferritisch und “C” für martensitisch gekennzeichnet. Es wird empfohlen, dass austenitische Schrauben eingesetzt werden, für welche die in Tabelle 3.3 und 3.4 angegebenen Eigenschaften gelten (diese wurden der EN ISO 3506 entnommen). Dem Buchstaben folgt eine Ziffer (1, 2, 3 4 oder 5), die die Korrosionsbeständigkeit angibt, wobei die 1 für die geringste und die 5 für die höchste Beständigkeit steht.

Stahlgüte A1 eignet sich besonders für die spanende Bearbeitung. Aufgrund des hohen Schwefelgehalts weisen Stähle innerhalb dieser Güte niedrigere Korrosionsbeständigkeit auf als vergleichbare Stähle mit normalem Schwefelgehalt. Darauf sollte geachtet werden, wenn Schrauben der Stahlgüte A1 in Erwägung gezogen werden sollen, siehe Abschnitt 3.6.1.

Stähle der Güte A2 weisen vergleichbare Korrosionsbeständigkeit wie die Sorte 1.4301 auf. Stähle der Güte A3 sind stabilisierte nichtrostende Stähle mit gleichwertiger Korrosionsbeständigkeit wie der Stahl 1.4541. (Ein Stahl mit stark karbidbildendem Legierungszusatz wie z.B. Titan, das die Reaktion mit Kohlenstoff begünstigt und die Bildung von Chromkarbid verhindert, wird als stabilisierter Stahl bezeichnet.)

Stähle der Güte A4 enthalten Molybdän und besitzen eine vergleichbare Korrosionsbeständigkeit wie die Sorte 1.4401. Stähle der Güte A5 sind stabilisierte molybdänhaltige nichtrostende Stähle mit ähnlicher Korrosionsbeständigkeit wie die Sorte 1.4571.

Austenitische Schrauben können in drei Zugfestigkeitsklassen bezogen werden (auch bekannt als Festigkeitsklassen), siehe Tabelle 3.3. Es ist zu beachten, dass für Schrauben größer als M39 in der Festigkeitsklassen 50 und größer als M24 in den Festigkeitsklassen 70 und 80 Bemessungswerte vereinbart werden müssen, da die Werte von der Art der Legierung und des Herstellungsverfahrens abhängen.

Schrauben der Festigkeitsklasse 50 sind unmagnetisch, jene der Klassen 70 und 80 hingegen sind leicht magnetisch.

Bei Schrauben der Festigkeitsklasse 50 handelt es sich um weichgeglühte Legierungen, was höhere Korrosionsbeständigkeiten bedeutet. Festigkeitsklassen 70 und 80 sind kaltverfestigt, was die Korrosionsbeständigkeit leicht beeinträchtigen kann. Schrauben der Festigkeitsklasse 50 mit geschnittenem Gewinde neigen zum Fressen, siehe Abschnitt 10.5.

Es ist auf die Abstimmung zwischen Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Schrauben und des Grundmaterials zu achten.

EN 14399 enthält Regeln für die CE-Kennzeichnung von Schrauben.

Tabelle 3.3 Minimaleigenschaften austenitischer Schrauben und Muttern gemäß EN ISO 3506

Güte ⁽¹⁾	Eigenschafts- -klasse	Gewinde- durchmesser	Schrauben		Muttern
			Zugfestigkeit ⁽²⁾ (N/mm ²)	Spannung bei 0,2% plastischer Dehnung (N/mm ²)	Probelast- spannung (N/mm ²)
A1, A2, A3, A4 und A5	50	≤ M39	500	210	500
	70	≤ M24 ⁽³⁾	700	450	700
	80	≤ M24 ⁽³⁾	800	600	800

Anmerkungen:

- (1) Zusätzlich zu den Stahlsorten, die in EN ISO 3506 unter den Festigkeitsklassen 50, 70 und 80 zusammengefasst sind, dürfen auch andere Stahlsorten gemäß EN 10088-3 verwendet werden.
- (2) Die Zugspannung wird auf der Grundlage des Spannungsquerschnitts berechnet.
- (3) Bei Verbindungsmitteln mit normalen Durchmessern $d > 24$ mm sollen die mechanischen Eigenschaften zwischen Nutzer und Hersteller vereinbart und mit Güte und Festigkeitsklasse gemäß dieser Tabelle markiert werden.

Tabelle 3.4 Chemische Zusammensetzung der Schrauben gemäß EN ISO 3506

Güte	Chemische Zusammensetzung (Massenprozent) ⁽¹⁾								
	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Weitere
A1	0,12	16,0 – 18,0	5,0 – 10,0	0,7	1,0	6,5	0,20	0,15 – 0,35	
A2	0,1	15,0 – 20,0	8,0 – 19,0	- ⁽²⁾	1,0	2,0	0,05	0,03	
A3	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0	- ⁽²⁾	1,0	2,0	0,045	0,03	Entweder Ti: ≥ 5xC – 0,8 Oder Nb/Ta: ≥ 10xC – 1,0
A4	0,08	16,0 – 18,5	10,0 – 15,0	2,0 – 3,0	1,0	2,0	0,045	0,03	
A5	0,08	16,0 – 18,5	10,5 – 14,0	2,0 – 3,0	1,0	2,0	0,045	0,03	Entweder Ti: ≥ 5xC – 0,8 Oder Nb/Ta: ≥ 10xC – 1,0

Anmerkungen:

- (1) Soweit nicht anderweitig angezeigt, handelt es sich hierbei um Maximalwerte.
- (2) Molybdän kann nach Ermessen des Herstellers vorhanden sein.

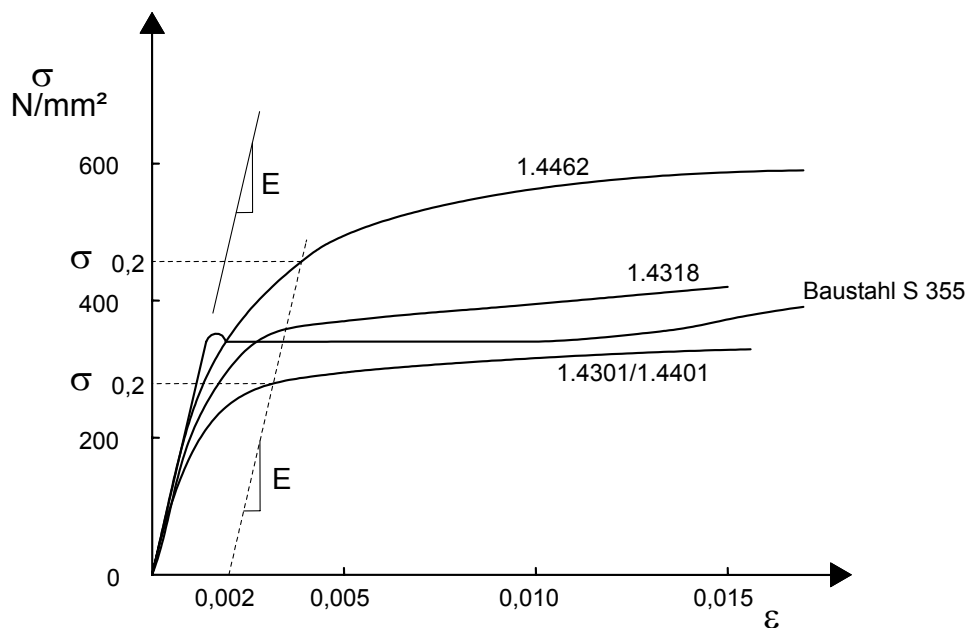
3.2 Mechanisches Verhalten und Bemessungswerte der Eigenschaften

3.2.1 Grundsätzliches zum Spannungs-Dehnungsverhalten

Das Spannungs-Dehnungsverhalten von nichtrostendem Stahl unterscheidet sich von dem des Baustahls in vielerlei Hinsicht. Der wichtigste Unterschied ist die Form der Spannungs-Dehnungskurve. Wo Baustahl typisch lineares Verhalten bis zur Streckgrenze und ein ausgeprägtes Plateau vor Verfestigungsbeginn aufweist, zeigt nichtrostender Stahl einen eher gerundeten Kurvenverlauf ohne klar definierbare Streckgrenze (siehe Abbildung 3.1). Deshalb sind die „Streckgrenzen“ im Allgemeinen als Prüffestigkeiten bei einer bleibenden plastischen Dehnung (üblicherweise die 0,2%-Dehngrenze) definiert, wie in der Abbildung dargestellt.

Es sollte beachtet werden, dass es sich in Abbildung 3.1 um typische Verläufe für die Spannungs-Dehnungskurven handelt. Die gezeigten Kurven repräsentieren die Bandbreite der meist verbreiteten Werkstoffe und können nicht bei der konkreten Bemessung verwendet werden.

Nichtrostende Stähle haben ein hohes Energieaufnahmevermögen, ohne Gefahr zu laufen, dabei zu brechen, was auf ihre herausragende Duktilität (besonders bei Austeniten) und ihr Verfestigungsverhalten zurückzuführen ist.



($\sigma_{0,2}$ ist die 0,2%-Dehngrenze)

Abbildung 3.1 Typische Spannungs-Dehnungskurven für nichtrostenden Stahl und Baustahl in lösungsgeglühtem Zustand (bei Längszug)

3.2.2 Einflussfaktoren auf das Spannungs-Dehnungsverhalten

Es gibt einige Einflussfaktoren, die die Grundform der Spannungs-Dehnungskurve für jeden Stahl ändern können. Diese Faktoren sind zu einem gewissen Grad voneinander unabhängig und beinhalten folgende Faktoren:

Kaltverfestigung

Die Zugfestigkeit von austenitischen und Duplex-Stählen wird durch Kaltverfestigung erhöht (etwa bei Kaltumformung, Richten und Nachwalzen sowie bei der Fertigung). Mit dieser Erhöhung geht eine Verringerung der Duktilität einher, jedoch hat dies wegen der hohen Grundduktilität normalerweise keinerlei praktische Konsequenzen, besonders nicht bei austenitischen nichtrostenden Stählen.

Tabelle 3.5 beinhaltet die in EN 1993-1-4 enthaltenen Zugfestigkeitsstufen im kaltverfestigten Zustand, die aus der europäischen Werkstoffnorm für nichtrostende Stähle, EN 10088, entnommen sind. Kaltverfestigte Stähle können entweder anhand der 0,2%-Dehngrenze, der Zugfestigkeit oder der Härte zugeordnet werden, es kann jedoch zur Festlegung nur eine Eigenschaft herangezogen werden.

Kaltverfestigter nichtrostender Stahl weist im Allgemeinen ein nicht-symmetrisches Verhalten unter Zug- und Druckbeanspruchung und Anisotropie auf (unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften parallel and quer zur Walzrichtung).

Der Grad der Asymmetrie und Anisotropie hängt von der Stahlsorte, dem Kaltumformgrad und dem Herstellprozess ab. Abbildung 3.2 zeigt Spannungs-Dehnungskurven für die Sorte 1.4318 im kaltverfestigten Zustand der Stufe C850; die Druckfestigkeit in Längsrichtung liegt niedriger als die Zugfestigkeit sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung (die Werte sind üblicherweise in den Werkstoffnormen, z.B. EN 10088, angegeben und werden entsprechend von den Lieferanten belegt). Die Auswahl des Bemessungswertes der Festigkeit ist bei kaltverfestigten Stählen mit Sorgfalt durchzuführen (siehe Abschnitt 3.2.4). Zusätzliche Information über die Werte für andere Belastungsarten und -richtungen sollten beim Lieferanten erfragt werden.

Der Preis für kaltverfestigten nichtrostenden Stahl liegt geringfügig höher als für das gleiche Material im lösungsgeglühten Zustand, abhängig von der Stahlsorte, der Produktart und dem Kaltumformgrad.

Tabelle 3.5 Zugfestigkeitsstufen im kaltverfestigten Zustand gemäß EN 10088-2 (gültig für Erzeugnisdicken ≤ 6 mm)

Kaltverfestigter Zustand	0,2% Dehngrenze ^{1) 2)}	Mindestzugfestigkeit h ^{1) 2)}	Verfügbare Stahlsorten im kaltverfestigten Zustand
CP350	350	700 ³⁾	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571
CP500	500	850 ³⁾	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571, 1.4318
CP700	700	1000 ³⁾	1.4318, 1.4301
C700	350 ³⁾	700	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571
C850	500 ³⁾	850	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571, 1.4318
C1000	700 ³⁾	1000	1.4318, 1.4301

Anmerkungen:

- (1) Zwischenwerte der 0,2%-Dehngrenze oder der Zugfestigkeit können vereinbart werden.
- (2) Für jede Zugfestigkeitsstufe nimmt die maximale Erzeugnisdicke mit der Zugfestigkeit ab. Die maximale Erzeugnisdicke und die Dehnung hängen zusätzlich vom Verfestigungsverhalten des Stahls und den Kaltumformbedingungen ab – genauere Angaben können vom Hersteller angefordert werden.
- (3) Nicht festgelegt, Richtwerte für Mindestwerte.

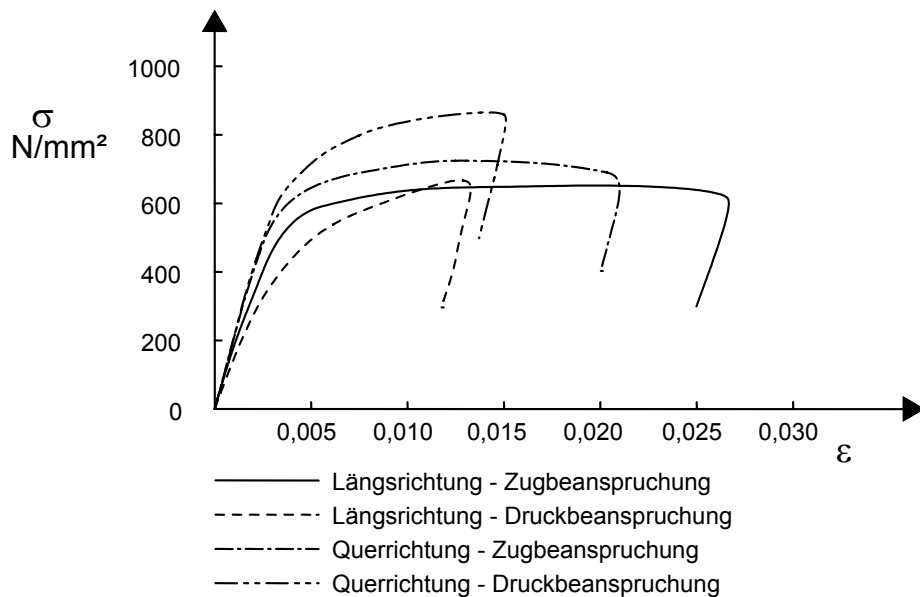


Abbildung 3.2 Typische Spannungs-Dehnungskurven für die Stahlsorte 1.4318 im kaltverfestigten Zustand der Zugfestigkeitsstufe C850

Bei der Fertigung eines Querschnitts ist eine Erhöhung der 0,2%-Dehngrenze um einen Faktor von etwa 50% typisch für gekantete Bereiche kaltgeformter Profile. Dieser Effekt ist jedoch nur lokal begrenzt, so dass ein höherer Bauteilwiderstand von der Lage der Ecken im Querschnitt abhängt; z.B. wären bei einem Träger mit Kantecken in der Nähe der Nulllinie nur geringfügig Vorteile zu erwarten. Die Festigkeitserhöhung gleicht vielmehr die Effekte der Blechdickenverringerung im Bereich der Ecken aus. Sollen Vorteile aus der örtlich höheren Festigkeit durch den Fertigungsprozess gezogen werden, sollte dies durch Prüfungen nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 9).

Anschließendes Schweißen der Bauteile bringt teilweise einen Weichglüheffekt mit sich, der die zuvor aus der Kaltverfestigung erwachsenen Festigkeitserhöhung wieder rückgängig macht.

Verformungsgeschwindigkeit

Der Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit ist bei nichtrostenden Stählen stärker ausgeprägt als bei Baustählen. Das heißt, dass bei proportional größeren Belastungsgeschwindigkeiten für nichtrostenden Stahl größere Kräfte realisiert werden als für Baustahl.

Wärmebehandlung

Glühen oder Enthärten verringert die Festigkeitserhöhung und die Anisotropie.

3.2.3 Typische Eigenschaftswerte

In 3.2.1 und 3.2.2 sollte deutlich gemacht werden, dass bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften nichtrostender Stähle mehr Einflussgrößen zum tragen kommen, als dies bei Baustählen der Fall ist. Aufgrund ihrer komplexeren Metallurgie hat der Verarbeitungsprozess größere Auswirkungen auf den Endzustand. Für jede einzelne Stahlsorte sind daher erwartungsgemäß Unterschiede bei den Materialeigenschaften zu erwarten, die durch die verschiedenen Verarbeitungstechniken hervorgerufen werden. Jedoch liegt die Kontrolle der mechanischen Eigenschaften, die unter anderem von der chemischen Zusammensetzung und thermomechanischen Behandlung abhängig sind, auch direkt beim Hersteller, so dass es möglich ist, mit dem jeweiligen Betrieb gewünschte Eigenschaften im Vorfeld abzusprechen.

Aus statischer Sicht ist die Streuung, mit der die wirkliche 0,2%-Dehngrenze den spezifizierten Minimalwert überschreitet, am entscheidendsten. Übliche Streckgrenzen liegen zwischen 20 und 35 % über dem ausgewiesenen Minimalwert. Die verhältnismäßig großen Überschreitungen der Streckgrenze sind nicht bei der Zugfestigkeit zu verzeichnen, welche üblicherweise nur bei 10% über den ausgewiesenen Mindestwerten liegen.

3.2.4 Bemessungswerte der Eigenschaften

Flachprodukte

Drei Möglichkeiten können in Betracht gezogen werden: ausgewiesene Minimalwerte, Materialdaten aus Prüfungen oder die Spezifikation im Lieferzeugnis.

(i) Bemessung mit ausgewiesenen Mindestwerten

Im lösungsgeglühten Zustand:

Es wird die charakteristische Streckgrenze f_y und die charakteristische Zugfestigkeit f_u als Minimalwert aus EN 10088-2 angesetzt (siehe Tabelle 3.1).

Im kaltverfestigten Zustand:

Für Material im kaltverfestigten Zustand gemäß EN 10088 können erhöhte Nennwerte für f_y und f_u angesetzt werden.

Für Material, das mit einer festgelegten 0,2%-Dehngrenze (z.B. CP 350) geliefert wird, kann die 0,2%-Dehngrenze in Tabelle 3.5 als charakteristische Streckgrenze angesetzt werden. Um die Asymmetrie bei kaltverfestigtem Material, für das ein Spannungszustand mit Druckbeanspruchung in Längsrichtung maßgeblich wird (d.h. bei Stützen oder bei Biegebeanspruchung), zu berücksichtigen, sollte der charakteristische Wert der Bemessungsstreckgrenze zu $0.8 \times 0.2\%$ -Dehngrenze nach Tabelle 3.5 angesetzt werden. Ein größerer Wert darf angenommen werden, falls dies durch geeignete Versuchsdaten nachgewiesen ist.

Für Material, das mit einer festgelegten Zugfestigkeit geliefert wird (z.B. C700), kann die Mindestzugfestigkeit in Tabelle 3.5 als charakteristische Festigkeit; die 0,2%-Dehngrenze sollte vom Lieferanten erfragt werden.

Anmerkung 1: Rechteckhohlprofile sind in kaltverfestigtem Zustand bis zu mittleren Festigkeitswerten zwischen CP350 und CP500 mit der vom Hersteller gewährleisteten Streckgrenze und Zugfestigkeit (die Streckgrenze gilt dann unter Zug- und unter Druckbeanspruchung) verfügbar.

Anmerkung 2: Die Bemessungsregeln in diesen Bemessungshilfen sind für Material bis zur Sorte CP500 und C850 anwendbar. Für höhere kaltverfestigte Festigkeitsstufen, sollte die Bemessung versuchsgestützt gemäß Kapitel 9 erfolgen. Eine Ausnahme hiervon bilden Bauteile mit Querschnitten der Klassen 1, 2 und 3, die weder beul- noch stabilitätsgefährdet sind. Hierfür darf die Querschnittstragfähigkeit nach Kapitel 4 ermittelt werden.

(ii) Bemessung mit Prüfwerten

Diese Möglichkeit sollte dann in Betracht kommen, wenn Zugversuche an Probekörpern aus demselben Blech durchgeführt werden, aus dem auch die Bauteile hergestellt werden. Der Tragwerksplaner sollte sich auch vergewissern, dass die Prüfungen gemäß Norm, z.B. EN 10002-1, durchgeführt werden, und dass die Vorgehensweise, die organisatorischen Abläufe beim Hersteller sicherstellen, dass das Bauteil auch aus demselben Material gefertigt wird und gleiche Ausrichtung der Walzrichtung im Tragwerk vorliegt.

Ein Wert für die Bemessungsfestigkeit kann durch einen statistischen Ansatz entsprechend der Empfehlungen des Anhang D von EN1990 hergeleitet werden.

Es wird empfohlen für die charakteristische Zugfestigkeit f_u nach wie vor den ausgewiesenen Mindestwert aus EN 10088-2 anzusetzen.

(iii) Bemessung mit den Daten der Werksprüfung

Gemessene Werte der 0,2%-Dehngrenze sind auf dem Werks- oder Lieferzeugnis angegeben. Ein Wert für die Bemessungsfestigkeit kann durch einen statistischen Ansatz entsprechend der Empfehlungen in Anhang D von EN1990 hergeleitet werden.

Es wird empfohlen für die charakteristische Zugfestigkeit f_u nach wie vor den ausgewiesenen Mindestwert aus EN 10088-2 anzusetzen.

Für den Elastizitätsmodul aller Standardaustenite und Duplex-Stahlsorten, die üblicherweise im Bauwesen zum Einsatz kommen, hält EN 10088-1 einen Wert von 200000 N/mm² bereit. Zur Abschätzung der Verformungen trifft der Sekantenmodul eher zu, siehe 5.4.6. Bei diesen Stählen kann eine Querdehnzahl von 0,3 und ein Schubmodul von 76900 N/mm² unterstellt werden.

Schrauben

Zur Berechnung der Zugtragfähigkeit, Schubtragfähigkeit oder kombinierter Zug/Schubtragfähigkeit einer Schraube ist die Grundfestigkeit f_{ub} anzusetzen mit:

$$f_{ub} = \sigma_{ub}$$

wobei σ_{ub} der ausgewiesene Mindestwert der Zugfestigkeit entsprechend Tabelle 3.3 der entsprechenden Festigkeitsklasse ist.

Ist das Langzeitverhalten einer Schraube zu berücksichtigen, sollte die zutreffende Lastfallkombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit anhand von EN 1990 gewählt werden.

3.3 Physikalische Eigenschaften

Tabelle 3.6 enthält physikalische Eigenschaften bei Raumtemperatur im geglähten Zustand derjenigen Stähle gemäß EN 10088, die auch in diesen Bemessungshilfen berücksichtigt werden. Physikalische Eigenschaften können abhängig von der Produktform und -größe leicht variieren, was jedoch für die Anwendung im Allgemeinen unkritisch ist.

Tabelle 3.6 Physikalische Eigenschaften bei Raumtemperatur, lösungsgeglühter Zustand

Sorte	Dichte (kg/m ³)	Wärmedehnkoeffizient 20 – 100°C (10 ⁻⁶ /°C)	Wärmeleitfähigkeit (W/m°C)	Wärmekapazität (J/kg°C)
1.4301	7900	16		
1.4307	7900	16		
1.4401	8000	16		
1.4404	8000	16		
1.4541	7900	16	15	500
1.4571	8000	16,5		
1.4318	7900	16		
1.4362	7800	13		
1.4462	7800	13		

Aus bautechnischer Sicht ist der wichtigste physikalische Wert der Wärmedehnkoeffizient der linearen Dehnung, welcher sich bei Austeniten beachtlich von dem für Baustahl (12 x 10⁻⁶/°C) unterscheidet. Werden Baustahl und nichtrostender Stahl gemeinsam verwendet, sind die Auswirkungen unterschiedlicher Wärmedehnung bei der Bemessung zu berücksichtigen.

Duplex-Stähle und Ferrite sind magnetisch. Sind die nicht-magnetischen Eigenschaften der Austenite wichtig für die Nutzung, so ist auf geeignete Schweißzusatzwerkstoffe zu achten, um den Anteil an Ferrit in der Schweißnaht zu minimieren. Starkes Kaltverfestigen, besonders bei vergleichsweise niedrig legierten Austeniten, kann gleichfalls zu einer leichten Magnetisierung führen;

anschließendes Glühen würde die nicht-magnetischen Eigenschaften wiederherstellen. Bei nicht-magnetischen Anwendungsfällen wird empfohlen, um weitere Hinweise beim Stahlhersteller zu ersuchen.

3.4 Temperatureffekte

Austenite eignen sich für Tieftemperaturanwendungen. Am anderen Ende der Temperaturskala behalten Austenite und Duplex-Stähle über 550°C eine höhere Festigkeit als Baustähle. Jedoch liegt die Bemessung von Tragwerken unter langfristig wirkender Tieftemperatur oder erhöhter Temperatur außerhalb des Anwendungsgebietes dieser Bemessungshilfen. Es soll hier die Anmerkung ausreichen, dass andere Materialeigenschaften und Korrosionsarten als die in Abschnitt 3 erläuterten vorrangig sind. Für hohe Temperaturen eignen sich in den meisten Fällen andere als die hier vorgestellten nichtrostende Stähle besser, so dass nähere Informationen hierzu beschafft werden sollten.

Aufgrund von möglicher Versprödung sollten Duplex-Stähle unter langfristig wirkenden Belastungen mit Temperaturen größer 300°C nicht eingesetzt werden.

Abschnitt 7 enthält die Vorgehensweise beim Brandschutznachweis und weitere mechanische und physikalische Eigenschaften bei hohen Temperaturen.

3.5 Lebenszykluskosten

Es besteht ein zunehmendes Bewusstsein für die Lebenszykluskosten (bzw. Kosten für die gesamte Nutzungsdauer). Bei der Materialauswahl sollten nicht nur die Anfangsinvestitionskosten berücksichtigt werden. Die Lebenszykluskosten umfassen:

- Investitionskosten,
- Betriebskosten,
- Restbuchwert.

Nichtrostender Stahl wird gelegentlich für zu teuer gehalten. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass Kosten bei Verwendung von korrosionsbeständigem Material durch Vermeidung zukünftiger Instandhaltungskosten, Reparaturausfallzeiten und Kosten für den Ersatz von Material eingespart werden können, die die höheren Anfangsinvestitionen deutlich wettmachen.

Zwar sind die Investitionskosten für Erzeugnisse aus nichtrostendem Stahl wesentlich höher als bei einem vergleichbaren Baustahlerzeugnis, abhängig von der Sorte des nichtrostenden Stahls. Dennoch stellen sich infolge des Wegfalls von Oberflächenbehandlungsmaßnahmen, die in regelmäßigen Zeitabständen zu wiederholen sind, Einsparungen ein.

Die hervorragende Korrosionsbeständigkeit von nichtrostendem Stahl kann viele Vorteile bieten, unter anderem:

- geringere Wartungshäufigkeiten und -kosten,
- geringere Instandhaltungskosten,
- eine lange Nutzungsdauer.

Nichtrostender Stahl weist einen hohen Restwert auf (d.h. der Wert am Ende der Nutzungsdauer des Bauwerks). Dennoch spielt dies bei Bauwerken mit einer geplanten langen Nutzungsdauer (z.B. über 50 Jahre) nur selten als Entscheidungsfaktor eine Rolle.

Bei den Lebenszykluskosten wird die Ertragswertmethode als Standardprinzip des Rechnungswesens zugrunde gelegt, um alle Kosten auf den Gegenwartswert zurückzuführen. Der Ertragswert umfasst Inflation, Bankzinsen, Steuern und gegebenenfalls einen Risikozuschlag. Dadurch wird in Hinblick auf die Werkstoffwahl eine realistische Vergleichsbewertung ermöglicht, die die verfügbaren Optionen und den potentiellen Langzeitvorteil bei Verwendung nichtrostenden Stahls berücksichtigt.

3.6 Werkstoffwahl

3.6.1 Stahlsorten

Bei der großen Mehrheit aller Einsatzgebiete von nichtrostendem Stahl ist die Korrosionsbeständigkeit das entscheidende Merkmal, sei es aus ästhetischen Gründen, zur Minimierung von Wartungsaufwand oder wegen der gestellten Haltbarkeitsanforderungen. Die Korrosionsbeständigkeit muss deshalb das Hauptkriterium bei der Werkstoffwahl darstellen.

Nichtrostende Stähle verdanken ihre Korrosionsbeständigkeit der Bildung einer Passivschicht, die sich nach Beschädigung bei Anwesenheit von Sauerstoff oder ähnlichen Oxidationsmitteln wieder regenerieren kann. Diese Oxidschicht ist zunächst eine Folge des Chromanteils im Stahl, wobei das Hinzufügen von Nickel oder anderen Legierungselementen die durch die Schicht gegebene Schutzwirkung weiter verbessern kann. Insbesondere werden auch geringe Mengen Molybdän hinzugefügt, um die Beständigkeit gegen chloridinduzierte Lochkorrosion des Stahls zu verbessern (siehe Abschnitt 3.7.2).

Wird die Oxidschicht beschädigt, wie beispielsweise durch elektrochemischen Angriff oder mechanisches Einwirken, kann Korrosion ausgelöst werden.

Sorgfältiges Konstruieren sollte einwandfreies Funktionieren gewährleisten. Daher sollte sich der Tragwerksplaner bewusst sein, dass selbst nichtrostende Stähle unter gewissen Umständen korrodieren können. Ungeachtet dessen ist es durchaus möglich, nichtrostende Stähle äußerst wirksam einzusetzen, vorausgesetzt, dass einige elementare Grundsätze beachtet werden. Nur wenn die Materialien unter Missachtung fundamentaler Regeln hinsichtlich ihrer Korrosionseigenschaften verwendet werden, können Probleme auftreten.

Die richtige Stahlsortenwahl muss die Umgebungsbedingungen, die Verarbeitungstechniken, die Oberflächenbeschaffenheit und die Wartung der Konstruktion berücksichtigen. Es ist anzumerken, dass die Anforderungen an die Wartung jedoch nur minimal sind: bloßes Reinigen des Stahls, und sei es durch die natürliche Reinigungswirkung des Regens, kann bereits die veranschlagte Nutzungsdauer erhöhen.

Der erste Schritt ist die Umgebungsanalyse, einschließlich einer angemessenen Sicherheitsmarge hinsichtlich sich verändernder Ausgangsbedingungen. Bei der Einstufung der atmosphärischen Bedingungen ist besonders auf stark örtlich begrenzte Gegebenheiten wie der Nähe zu Schornsteinen, die korrosionsfördernde Rauchgase abgeben, zu achten. Die Oberflächenbeschaffenheit, die

Stahltemperatur und die abzusehenden Spannungen können gleichfalls wichtige Parameter darstellen (siehe Abschnitt 3.7.2).

In Frage kommende Stahlsorten können so ausgewählt werden, dass eine insgesamt zufrieden stellende Korrosionsbeständigkeit in der jeweiligen Umgebung gewährleistet werden kann. Die Auswahl sollte berücksichtigen, welche Korrosionsarten in der Betriebsumgebung auftreten können. Hierzu ist eine Betrachtung der für nichtrostende Stähle typischen Korrosionsarten erforderlich. Abschnitt 3.7 stellt die weiteren Mechanismen, die der Korrosion nichtrostender Stähle zugrunde liegen, heraus und nennt Einsatzbedingungen, unter denen der Gebrauch von nichtrostenden Stählen uneingeschränkt möglich und komplikationsfrei sein sollte. Es wurde ebenfalls beabsichtigt, allgemeine Aspekte der Praxis darzustellen, sowie ferner die Bedingungen, unter denen nichtrostende Stähle mit Vorsicht einzusetzen sind. Zu den letzteren Punkten sollten weitere Expertenmeinungen eingeholt werden, da in vielen Fällen die Stähle gleichwohl erfolgreich angewandt werden können.

Ferner soll den mechanischen Eigenschaften, der Verarbeitung, der Verfügbarkeit der Produkte, der Oberflächenbeschaffenheit und den Kosten weitere Beachtung geschenkt werden.

Die Bewertung der Stahlsorteneignung wird am besten angegangen, indem auf Erfahrungswerte bei vergleichbaren Anwendungsfällen und Umgebungsbedingungen verwiesen wird. Tabelle 3.7 enthält Hinweise, wie geeignete Stahlsorten bei gewissen atmosphärischen Umgebungsbedingungen in Frage kommen. Nationale Regelungen sollten ebenfalls überprüft werden, da sie in einigen Fällen entsprechende Vorschriften enthalten können. Im Fall von eingetauchten nichtrostenden Stählen ist Abschnitt 3.7.3 zu beachten. Kommt nichtrostender Stahl in Kontakt mit Chemikalien, sollte immer ein Sachverständiger zu Rate gezogen werden.

Besondere Sorgfalt ist angebracht, wenn es sich um die Verwendung nichtrostender Stähle mit verbesserter Spanbarkeit für Verbindungselemente handelt. Die Zugabe von Schwefel bei der Zusammensetzung dieser Stähle in der austenitischen Gruppe lässt sie leichter korrodieren, besonders in Industriegebieten und Meeresnähe. Insbesondere gilt dies für Verbindungselemente der Güteklasse A1 entsprechend der EN ISO 3506, siehe Tabelle 3.3.

Tabelle 3.7 Empfohlene Stahlsorten bei atmosphärischer Korrosionsbelastung

Stahlgüte	Art der Atmosphäre											
	Ländlich			Städtisch			Industriell			Meeresnähe		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Basis Chrom-Nickel Austenite (z.B. 1.4301, 1.4307, 1.4541, 1.4318)	T	T	T	T	T	(T)	(T)	(T)	X	T	(T)	X
Molybdän Chrom-Nickel Austenite (z.B. 1.4401, 1.4404, 1.4571) und Duplex 1.4362	0	0	0	0	T	T	T	T	(T)	T	T	(T)
Duplex Stahlgüten 1.4462	0	0	0	0	0	0	0	0	T	0	0	T

L Günstigste Bedingungen innerhalb der Kategorie, z.B. nur geringer Feuchtigkeit und geringen Temperaturen ausgesetzt.
M für diese Kategorie üblich.
H In dieser Kategorie ist Korrosion wahrscheinlich höher als üblich, z.B. erhöhte anhaltende Feuchtigkeit, hohe Umgebungstemperaturen und besonders aggressive Luftverschmutzung
O aus Korrosionssicht möglicherweise überbestimmt
T für die Korrosionsbeständigkeit und aus Kostensicht die wahrscheinlich beste Wahl.
X wahrscheinlich heftig ausgeprägter Korrosion ausgesetzt.
(T) bei gewissen Vorkerhungen angemessen (d.h. Ausschreibung einer relativ glatten Oberfläche und regelmäßige Reinigung).

ANMERKUNG: Nationale Richtlinien können hier ausschlaggebend sein.

3.6.2 Verfügbarkeit der Produktformen

Allgemeine Produktformen

Blech- und Stabprodukte sind weitestgehend in den hier behandelten Stahlsorten verfügbar. Rundhohlprofile sind als Austenite und als Duplex-Stahl 1.4462 (2205) verfügbar. Rundhohlprofile in Duplex-Stahl 1.4362 (2304) sind dahingegen nicht sehr geläufig, da es sich hierbei um einen für die Bauindustrie relativ neuen Stahl, obwohl er seit einigen Jahren für Explosionsschutzwände auf Bohrseln mit Erfolg eingesetzt wird.

Es existiert ein weit gefächertes Sortiment gewalzter Profile (Winkel-, U-, T-, Rechteckhohlprofile und I-Profile) in austenitischen Standardsorten wie 1.4301 und 1.4401, jedoch nicht als Duplex-Stähle. Im Allgemeinen können Profile durch Kaltumformung (Profilieren oder Kanten) oder schweißtechnisch hergestellt werden.

Material in kalverfestigtem Zustand ist lieferbar in verschiedene Erzeugnisformen einschließlich Bleche, dünnwandigen Profilbleche, Schmal- und Breitband, Stäbe und Hohlprofile:

- Bleche, dünnwandigen Profilbleche, Schmal- und Breitband (üblicherweise mit Erzeugnisdicken ≤ 6.0 mm)
- Rundstäbe (mit Durchmessern von 5 mm bis 60 mm)
- Quadrat- und Rechteckhohlprofile (Querschnittsabmessungen bis zu 400 mm, Erzeugnisdicken von 1.2 bis 6 mm).

Die in kaltverfestigtem Zustand kommerziell lieferbaren nichtrostenden Stahlsorten sind in Tabelle 3.5 angegeben.

Kaltverformung

Es ist wichtig, dass frühzeitig mit den in Frage kommenden Verarbeitungsbetrieben Kontakt aufgenommen wird, um die Grenzen der Kaltverformung festzulegen, da für nichtrostenden Stahl höhere Umformungskräfte als für Baustahl erforderlich sind. Die Länge gekanteter Profile ist bei höherfesten Werkstoffen oder größeren Wanddicken notwendigerweise durch die Größe der Kantbank oder der Maschinenleistung begrenzt. Bei Duplexstählen sind im Vergleich zu austenitischen Werkstoffen nahezu die doppelten Umformungskräfte erforderlich, weswegen das Sortiment an Duplexquerschnitten eingeschränkt ist. Wegen der geringeren Duktilität der Duplexwerkstoffe müssen darüber hinaus größere Biegeradien vorgesehen werden. Weitere Hinweise finden sich in Abschnitt 10.3.2.

Oberflächenausführung

Bei einigen Anwendungsfällen sind Oberflächenbeschaffenheit und optische Erscheinung wichtig. Die Hersteller bieten ein Sortiment an standardmäßigen Oberflächenausführungen an, von werkseitigen Standardoberflächen bis hin zu Sonderoberflächen, die wiederum von tiefmatt bis hochglänzend reichen können. Strukturierte Oberflächenausführungen können ebenfalls angeboten werden. Es ist anzumerken, dass Verarbeitungstoleranzen in den Herstellbetrieben zu Unterschieden im Aussehen sogar bei demselben Hersteller führen kann, obwohl die verschiedenartigen Oberflächenausführungen standardisiert sind. Glänzende Oberflächen werden häufig bei architektonischen Anwendungsfällen eingesetzt. Es sollte hier angemerkt werden, dass glänzende Oberflächen jegliche Materialunebenheiten besonders auf Wandflächen betonen. Geprägte, strukturierte, gemusterte oder profilierte Bleche oder Konstruktionen mit einem starren, stabilisierenden Rahmen verringern diese Tendenz.

Schrauben

Schrauben der Festigkeitsklasse 70 entsprechend EN ISO 3506 werden am häufigsten eingesetzt. Gewisse Größen- und Längenbeschränkungen gelten für Schrauben der Festigkeitsklassen 70 und 80, siehe Tabelle 3.3. Es ist möglich „Sonderanfertigungen“ auf Bestellung zu beziehen, was in der Tat manchmal eine wirtschaftlichere Lösung darstellt.

Schrauben können auf verschiedene Weisen hergestellt werden, z.B. durch Zerspanung, Kaltumformung oder Schmieden. Geschnittene Gewinde hingegen sollten nicht in sehr aggressiver Umgebung aufgrund der Gefahr von Spaltkorrosion eingesetzt werden (z.B. in salzwasserhaltigen Umgebungen). Gedrehte Gewinde sind vorzuziehen, da sie im Allgemeinen widerstandsfähiger als geschnittene Gewinde sind und eine größere Beständigkeit gegen Verschleiß aufweisen.

3.7 Dauerhaftigkeit

3.7.1 Einführung

Nichtrostende Stähle sind im Allgemeinen sehr korrosionsbeständig und weisen unter den meisten Umgebungsbedingungen zufriedenstellendes Verhalten auf. Die Korrosionsbeständigkeitsgrenze eines jeweiligen nichtrostenden Stahls hängt von seinem Legierungsgehalt ab, was bedeutet, dass jeder Stahl ein spezifisches Verhalten in aggressiver Umgebung aufweist. Die meist geeignete Stahlgüte für den jeweiligen Anwendungsfall muss daher sehr sorgfältig ausgewählt werden. Im Allgemeinen gilt: je höher die Korrosionsbeständigkeit, desto höher der Preis. Zum Beispiel kostet Stahlsorte 1.4401 wegen ihres Molybdängehaltes mehr als ein 1.4301.

Material in kaltverfestigtem Zustand weist im Vergleich zum lösungsgeglühten Zustand eine vergleichbare Korrosionsbeständigkeit auf.

Die häufigsten Ursachen von Korrosionsschäden sind:

- (a) falsche Beurteilung der Umgebungsbedingungen oder ungünstige Begleitumstände, z.B. nicht erkannte Chloridbelastungen,
- (b) Beeinträchtigung des Stahls durch Verarbeitung oder Handhabung.

Obwohl nichtrostende Stähle Verfärbungen erleiden können (häufig infolge kohlenstoffbedingter Verunreinigungen), sind sie im Bauwesen äußerst dauerhaft. In aggressiven industriellen und salzwasserhaltigen Umgebungen haben Versuche keinerlei Funktionsverlust der Bestandteile ergeben, selbst dort, wo kleine Gewichtsverluste festgestellt wurden. Jedoch kann unansehnliches, fleckiges Anlaufen auf Sichtflächen vom Anwender nach wie vor als Defekt angesehen werden. Sowohl gute als auch sorgfältige Werkstoffwahl, gutes Detaillieren und fachgerechte Ausführung können die Wahrscheinlichkeit von Verfärbungen und Korrosion entscheidend verringern. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Korrosionsschäden am wahrscheinlichsten in den ersten zwei oder drei Nutzungsjahren zutage treten.

Unter gewissen Umgebungsbedingungen weisen einige nichtrostende Stähle lokale Anfälligkeiten auf. Sechs Mechanismen werden nachstehend beschrieben, wobei die letzten drei nur selten im Allgemeinen Hochbau auftreten.

Es sollte erwähnt werden, dass Feuchtigkeit (z.B. durch Kondensation) eine notwendige Voraussetzung für das Eintreten von Korrosion ist.

3.7.2 Korrosionsarten und Verhalten der Stahlsorten

Lochkorrosion

Wie der Name schon andeutet, ist diese Korrosionsart eine lokale Erscheinung. Sie resultiert aus dem lokalen Zusammenbruch der Passivschicht und wird normalerweise durch Chloridionen induziert, obwohl andere Halogene und andere Anionen ähnliche Auswirkungen zeigen können. In einem entstehenden Loch bilden Korrosionsprodukte sehr aggressive Lösungen, die die weitere Korrosion beschleunigen. Jedoch tritt Lochkorrosion bei den meisten Anwendungen im Bauwesen eher oberflächlich auf und die Verminderung des Bauteilquerschnitts ist eher vernachlässigbar. Jedoch können Korrosionserscheinungen das optische Erscheinungsbild beeinträchtigen. Eine weniger großzügige Sichtweise in Bezug auf Lochfraß sollte bei Versorgungsleitungen wie Rohren, Installationen und Sicherheitsbehältern gelten.

Da Chloridionen die häufigste Ursache für Lochfraß darstellen, verhält sich auch Meerwasser ziemlich aggressiv. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmtes Mittel Lochfraß verursacht, hängt neben dem Chloridgehalt von Einflussfaktoren wie der Temperatur, Azidität oder Basizität und dem Gehalt weiterer oxidationsfördernder Mittel ab. Die Beständigkeit eines nichtrostenden Stahls gegen Lochfraß wird durch dessen chemische Zusammensetzung bestimmt. Chrom, Molybdän und Stickstoff erhöhen jeweils die Beständigkeit gegen Lochfraß.

Ein Näherungsmaß für die Beständigkeit gegen Lochfraß ist der Lochfraß-Index oder das Lochfraßbeständigkeitsäquivalent (Pitting Resistance Equivalent (PRE)), definiert als:

$$\text{PRE} = \text{Gew.}\% \text{ Cr} + 3,3(\text{Gew.}\% \text{ Mo}) + 30(\text{Gew.}\% \text{ N}) \quad \text{bei Austeniten}$$

$PRE = \text{Gew.}\% \text{ Cr} + 3,3(\text{Gew.}\% \text{ Mo}) + 16(\text{Gew.}\% \text{ N})$ bei Duplex-Stahlsorten

Der PRE ist ein nützlicher Richtwert bei der Einstufung nichtrostender Stähle, ist aber nicht allein von ausschlaggebender Bedeutung.

1.4301 hat den niedrigsten PRE aller in diesen Bemessungshilfen behandelten, nichtrostenden Stähle und ist somit der am wenigsten geeignete Stahl für bauliche Anwendungen in Verbindung mit Meerwasser, außer vielleicht in Innenräumen bei wirksamem Schutz vor Spritzwasser und Dunst. 1.4301 kann in Gegenden mit Schwerindustrie auch unakzeptable Ausmaße an Lochfraß aufweisen, weswegen ein Stahl der Sorte 1.4401 oder ein Duplex-Stahl bevorzugt werden sollten.

Spaltkorrosion

Spaltkorrosion tritt unter der gleichen Umweltbedingung wie Lochkorrosion auf. Korrosion wird in einem Spalt eher initiiert als auf einer glatten Fläche, da der Zutritt der Oxidationsmittel, die zur Bildung der Passivschicht notwendig sind, behindert wird. Die Gefährdung eines Spalts hängt stark von dessen Geometrie ab: je enger und tiefer ein Spalt ist, desto schwerwiegender sind die Korrosionsbedingungen. Diese stellen vor allem in Stagnationszonen, in denen eine Chloridanreicherung stattfinden kann, ein Problem dar.

Spalte entstehen bei metallischen Verbindungen durch Dichtungsringe, Ablagerungen und Oberflächenbeschädigungen wie tiefe Kratzer. Spalte sollten vermieden werden, was jedoch nicht immer möglich ist.

Wie bei der Lochfraßkorrosion, verbessern die Legierungselemente Chrom, Molybdän und Stickstoff die Widerstandsfähigkeit und somit auch die Beständigkeit gegen Spaltkorrosion mit steigend besseren Eigenschaften von 1.4301 über 1.4401 bis hin zum 1.4462.

Bimetallische (galvanische) Korrosion

Befinden sich zwei unähnliche Metalle in elektrischem Kontakt miteinander und sind zusätzlich durch einen Elektrolyten (d.h. eine Strom leitende Flüssigkeit, wie Meerwasser oder Schmutzwasser) miteinander verbunden, fließt durch diesen Elektrolyten Strom vom anodischen (unedleren) Metall zum kathodischen (edleren) Metall.

Diese Korrosionsart ist besonders dann anzutreffen, wenn nichtrostender Stahl mit un- und niedriglegierten Stählen in Verbindung steht. Es ist daher wichtig, Schweißzusätze auszuwählen, die wenigstens so edel wie das Grundmaterial sind. In korrosiven, feuchten Umgebungen wie in Gegenden mit Schwerindustrie, auf See und überall dort wo ein Eintauchen in Brackwasser oder Salzwasser möglich ist, sind martensitische und ferritische Schrauben (siehe Abschnitt 3.1.2) zu Verbindungszwecken von nichtrostenden Stählen zu vermeiden.

Galvanische Korrosion greift zumeist nicht den nichtrostenden Stahl an, sondern den minder edlen Partnerwerkstoff. Manchmal sind zur Korrosionsvermeidung Maßnahmen erforderlich, die auf den ersten Blick überraschend erscheinen. Die Vermeidung von galvanischer Korrosion basiert grundsätzlich auf der Behinderung des Stromflusses durch:

- Isolierung ungleicher Metalle, d.h. dem Trennen der metallischen Stromleitung (siehe Abschnitt 6.1.1).
- Verhinderung der Überbrückung durch elektrolytische Lösungen, d.h. Trennen der elektolytischen Stromleitung durch Anstriche oder sonstige

Beschichtungen. Wo ein Schutz durch diese Mittel angestrebt wird und es nicht machbar ist, beide Metalle zu beschichten, wird angeraten, das edlere zu beschichten (d.h. in einer Verbindung aus nichtrostendem und Baustahl den nichtrostenden Stahl).

Das Risiko eines schweren Korrosionsschadens ist am größten, wenn die Oberfläche des edleren Metalls (z.B. nichtrostender Stahl) im Verhältnis zur Oberfläche des weniger edlen Metalls (z.B. Baustahl) groß ist. Dem Einsatz von Anstrichen oder anderen Beschichtungen auf dem Baustahl ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Befinden sich nämlich kleinere Poren oder nadelstichgroße Löcher auf der Beschichtung, so führt die kleine Oberfläche aus ungeschütztem Baustahl zu einem sehr großen Kathoden-Anoden-Flächenverhältnis, so dass ein starker Korrosionsangriff des Baustahls möglich wird. Natürlich sind eingetauchte Gegenstände davon am stärksten betroffen. Aus diesem Grund sollten nichtrostende Stähle angestrichen werden. Bei Porenbildung bleibt der Stromfluss vernachlässigbar gering.

Ungünstige Oberflächenverhältnisse entstehen bei Befestigungen und an Verbindungen. Schrauben aus Baustahl sind aufgrund des großen Oberflächenverhältnisses zwischen nichtrostendem Stahl und Baustahl zu vermeiden, da die Schrauben sonst stark korrodieren. Im umgekehrten Fall übt eine (kleine) Schraube aus nichtrostendem Stahl auf ein (wesentlich größeres) Bauteil aus Kohlenstoffstahl nur eine vernachlässigbar geringe Korrosionswirkung aus. Es ist normalerweise äußerst nützlich, auf frühere Erfahrungen in ähnlichen Situationen zu verweisen, weil verschiedene Metalle bei gelegentlicher Kondensation oder Feuchtigkeit oftmals problemlos in Verbindung stehen können, besonders dann, wenn der Elektrolyt nur über geringe Leitfähigkeit verfügt.

Die Vorhersage dieser Auswirkungen ist problematisch, da die Korrosionsgeschwindigkeit durch eine Vielzahl komplexer Aspekte bestimmt wird. Die Verwendung elektrischer Potentialtabellen vernachlässigt Faktoren wie das Vorhandensein von Oberflächenoxidschichten, Oberflächenverhältnisse und unterschiedliche (elektrolytische) Lösungen. Deswegen kann unsachgemäßer Gebrauch dieser Tabellen zu falschen Lösungen führen. Sie sind daher sorgsam zu verwenden und nur für erste Bewertungen heranzuziehen.

Nichtrostende Stähle bilden normalerweise die Kathode bei einer bimetallischen Paarung und erleiden daher keinerlei Korrosion. Kontakt zwischen austenitischen, nichtrostenden Stählen und Zink oder Aluminium kann zu zusätzlicher Korrosion bei einem der zwei letzteren Metalle führen. Diese Konstellation kommt im Bauwesen nur sehr selten vor, jedoch wird das weißgraue Puder als unansehnlich empfunden. Eine Paarung mit Kupfer ist im Allgemeinen nur unter sehr günstigen Bedingungen ratsam.

Das grundsätzliche Verhalten zweier in Kontakt stehender Metalle unter ländlichen, städtischen, industriellen oder küstennahen Umweltbedingungen ist vollständig in BS PD 6484 *Commentary on corrosion at bimetallic contacts and its alleviation* dokumentiert.

Spannungsrissskorrosion

Das Eintreten von Spannungsrissskorrosion (stress corrosion cracking (SCC)) erfordert das gleichzeitige Auftreten von Zugspannungen und besonderen Umweltfaktoren, die im Hochbau eher unwahrscheinlich sind. Die Spannung muss dabei im Verhältnis zur Streckgrenze des Werkstoffs nicht allzu hoch liegen und kann aus Eigenspannungen infolge des Fertigungsprozess wie Schweißen oder Biegen herrühren. Nichtrostende Duplex-Stähle weisen höhere Beständigkeit gegen

Spannungsrisskorrosion als die Austenite aus diesen Bemessungshilfen auf. Für Anwendungsfälle, bei denen Spannungsrisskorrosion ein Unfallrisiko darstellt, sind hochlegierte austenitische nichtrostende Stähle, wie z.B. die Sorten 1.4539, 1.4529, 1.4547 und 1.4565 (nicht Bestandteil dieser Bemessungshilfen) entwickelt worden.

Werden Bauteile aus nichtrostendem Stahl mit hohen Eigenspannungen (z.B. bedingt durch Kaltverformung) in chloridhaltiger Umgebung (z.B. Schwimmbäder, Salzwasser, Offshore-Einrichtungen) eingesetzt, ist besondere Vorsicht geboten. EN 1993-1-4 fordert, dass für Tragwerksteile in chloridhaltiger Umgebung, die nicht regelmäßig gereinigt werden können (z.B. in abgehängten Decken über Schwimmbädern), nur die Sorten 1.4529, 1.4547, 1.4565 verwendet sollten. Nur in dem Fall, dass die Konzentration von Chloridionen im Schwimmbadwasser (unüblich) ≤ 250 mg/l ist, ist die Sorte 1.4539 ebenfalls geeignet. Andere Sorten, die nachgewiesenermaßen eine gleichwertige Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion haben, dürfen in dieser Umgebung ebenfalls verwendet werden.

Allgemeine (gleichmäßige) Korrosion

Unter normalen Bedingungen, wie sie im Bauwesen üblich sind, weisen nichtrostende Stähle keinerlei Massenverlust auf, wie dies beim Rosten von unlegiertem Eisen und Stahl der Fall ist.

Nichtrostender Stahl verhält sich gegenüber vielen Chemikalien beständig; er wird daher im Behälterbau eingesetzt. Jedoch ist auf Tabellenwerke des Herstellers zu verweisen oder aber es sollte ein entsprechendes Gutachten eingeholt werden, wenn nichtrostender Stahl in Kontakt mit Chemikalien stehen soll.

Interkristalline Korrosion (Sensibilisierung) und Schweißversprödung

Sind austenitische nichtrostende Stähle längere Zeit Temperaturen im Bereich zwischen 450°C bis 850°C ausgesetzt, so diffundiert der Kohlenstoff zu den Korngrenzen und Chromkarbid lagert sich ab. Hierdurch kommt es zu einer Chromverarmung an den Korngrenzen. Stahl in diesem Zustand wird als *sensibilisiert* bezeichnet. Die Korngrenzen sind nun korrosionsanfällig. Dieses Phänomen ist auch unter der Bezeichnung *weld decay* (Schweißversprödung) bekannt, wenn es in der Wärmeeinflusszone einer Schweißnaht auftritt.

Hier werden drei Möglichkeiten beschrieben, interkristalline Korrosion zu vermeiden:

- Einsatz von Stahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt,
- Einsatz von durch Titan oder Niob stabilisierten Stählen, da diese Elemente bevorzugt mit Kohlenstoff stabile Verbindungen eingehen und dabei das Risiko einer Chromkarbidbildung mindern,
- Wärmebehandlung, jedoch kommt diese Methode nur selten in der Praxis zur Anwendung

Nichtrostende Stähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (maximal 0,03%) bis zu einer Dicke von 20 mm erleiden allgemein nach Lichtbogenschweißungen keine interkristalline Korrosion.

3.7.3 Korrosion unter einigen Umweltbedingungen

Luft

Die atmosphärischen Bedingungen variieren stark in ihrer Wirkung auf nichtrostende Stähle. Ländliche Atmosphäre, von industriellen Abgasen oder Meersalz unbelastet, ist hinsichtlich Korrosivität sehr mild, sogar bei hoher

Feuchtigkeit. In industriellen Umgebungen sowie in Meeresnähe sind die Bedingungen deutlich korrosiver. Zur geeigneten Werkstoffwahl wird auf Tabelle 3.7 verwiesen.

Die häufigsten Gründe für atmosphärische Korrosion sind Eisenpartikel, die durch Herstellprozesse, entweder im Werk oder auf der Baustelle, freigesetzt werden und Chloride aus Salzwasser, Industrie oder Kalziumchlorid aus der Zementherstellung. Einige sich ablagernde Partikel, obwohl nur gering reaktiv, sind in der Lage, mit schwach sauren Schwefeloxidlösungen aus der Atmosphäre zu reagieren, was örtlich zum Zusammenbruch der Passivschicht führt.

Das allgemeine Aussehen nichtrostender Stähle wird durch die Oberflächenausführung (je glatter desto besser) und regelmäßiges Abwaschen (entweder durch planmäßige Reinigung oder Regenwasser) beeinflusst.

Meerwasser

Meerwasser, einschließlich Brackwasser, enthält hohe Chloridanteile und ist somit sehr korrosionsfördernd, besonders wenn die Wasserströmung niedrig ist (ungefähr unter 1.5 m/s). Bei geringen Strömen kann bei den Stählen 1.4301 und 1.4401 schwerer Lochfraß einsetzen. Ebenfalls können diese Stähle Spaltrisskorrosion erleiden, unabhängig davon ob diese aus der Konstruktion, Verschmutzung oder Bewuchs herrühren.

Spritzwasser kann genau so viel Befall wie vollständiges Eintauchen verursachen, da die Konzentration an Chloridionen durch die Wasserverdunstung erhöht wird, und dies vermehrt zu Salzablagerungen führen kann.

Die Möglichkeit starker galvanischer Korrosion muss in Betracht gezogen werden, wenn nichtrostender Stahl zusammen mit anderen Metallen in Kontakt mit Meerwasser eingesetzt wird.

Andere Wasserarten

Austenitische nichtrostende Stähle verhalten sich in destilliertem Wasser oder Trinkwasser normalerweise zufriedenstellend. Ist der Säuregehalt hoch, so ist Stahlgüte 1.4401 zu bevorzugen, sonst genügt normalerweise die Sorte 1.4301. Wo sich geringe Chloridmengen befinden, wird gleichfalls der Stahl 1.4401 als geeignet angesehen, um möglichen Lochfraß und Spaltkorrosion zu vermeiden. Bei Flusswasser ist besonders acht zu geben; biologische und mikrobiologische Aktivität kann in vergleichsweise kurzer Zeit Lochfraß bei austenitischen nichtrostenden Stählen hervorrufen.

Die Möglichkeit der Erosionskorrosion ist bei Wassern mit schleifenden Partikeln zu beachten.

Chemische Umgebungen

Das Einsatzgebiet nichtrostender Stähle in chemischen Umgebungen ist so groß, dass es den Umfang der vorliegenden Veröffentlichung sprengen würde, hierauf im Einzelnen einzugehen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass in vielen Anwendungsfällen andere als die hier vorgestellten Stähle geeigneter sind. Zur Werkstoffauswahl sollten im Einzelfall weitergehende Informationen eingeholt werden.

Schaubilder von Herstellern zu Ergebnissen von Korrosionsversuchen in unterschiedlichen Chemikalien müssen mit Vorsicht interpretiert werden. Obgleich sie die Beständigkeit einer speziellen Stahlgüte ausweisen, sind die Umgebungsbe-

dingungen (Temperatur, Druck, Konzentrationen, etc.) veränderlich und unterscheiden sich im Allgemeinen von den Versuchsbedingungen. Ebenso können Verunreinigungen und der Grad der Belüftung weitere Auswirkungen auf die Ergebnisse zeigen.

Boden

Die Korrosionseinwirkung bei nichtrostendem Stahl mit Bodenkontakt hängt von der chemischen Bodenzusammensetzung und dem spezifischen elektrischen Widerstand ab. Böden unterscheiden sich in ihrer Korrosivität in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit, dem pH-Wert, der Durchlüftung, einer eventuellen chemischen Verunreinigung, der mikrobiologischen Aktivität und der Oberflächenentwässerung. Nichtrostende Stähle sind bei einer Vielzahl von Böden gut geeignet und besonders gut in Böden mit hohem spezifischen elektrischen Widerstand, obwohl in feuchten Böden mit geringem elektrischen Widerstand vereinzelt Lochfraß beobachtet worden ist. Bei Vorhandensein aggressiver Chemikalien wie z.B. Chloridionen, aber auch bei Bakterienarten oder Streustrom (verursacht durch dezentrale direkte Stromspeisung bei Transportsystemen, wie z.B. bei der Eisenbahn oder der Straßenbahn) kann örtlich begrenzt Korrosion in Erscheinung treten. Die Ausbreitung von Streustrom kann unterdrückt werden durch eine geeignete elektrische Isolierung der Leitung (Überzüge oder Ummantelungen) und/oder durch kathodischen Schutz.

Bei nichtrostendem Stahl mit Bodenkontakt wird für die Stahlsortenwahl empfohlen, die Korrosionsbeständigkeit erstens anhand des Mengenverhältnisses der vorhandenen Chloridionen und zweitens anhand des spezifischen elektrischen Widerstands und des pH-Wertes des Bodens zu berücksichtigen. In allen Fällen wird ein schlecht entwässerter Boden unterstellt. Tabelle 3.8 enthält Empfehlungen für die Stahlsortenwahl für unterschiedliche Bodenzustände.

Tabelle 3.8: Nichtrostende Stahlsorten zum Einsatz bei unterschiedlichen Bodenzuständen

Typische Umgebung	Bodenzustand	Stahlsorte
Nicht-maritime Umgebung	Cl < 500 ppm	1.4301
	Spezif. elektr. Widerstand >1000 ohm.cm	1.4404
	pH > 4.5	
Maritime Umgebung – nicht durch Gezeiten beeinflusst	Cl < 1500 ppm	
	Spezif. elektr. Widerstand >1000 ohm.cm	1.4404
	pH > 4.5	
Maritime Umgebung – im Bereich mit Gezeitenwechsel	Cl < 6000 ppm	1.4410
	Spezif. elektr. Widerstand >500 ohm.cm	1.4547
	pH > 4.5	

Anmerkung:

1.4410 ist eine Duplex-Sorte und 1.4547 ist eine super-austenitische Sorte. Diese Sorten werden im allgemeinen nicht im Bauwesen eingesetzt und fallen daher aus dem Rahmen dieser Bemessungshilfen

Korrosionsgerechter Entwurf

Der wichtigste Schritt bei der Verhinderung von Korrosionserscheinungen ist die Wahl einer geeigneten Stahlsorte und geeigneter Verarbeitungsverfahren, die auf die Umgebungsbedingungen abgestimmt sein müssen. Es kann jedoch nach Spezifizierung eines bestimmten Stahls durch die Detailplanung noch viel dazu

beigetragen werden, das Potential des jeweiligen Werkstoffes auszuschöpfen. Korrosionsvermeidung sollte vorzugsweise schon im Planungsstadium und während des detaillierten Entwurfs berücksichtigt werden.

Tabelle 3.9 enthält eine Prüfliste. Die Beachtungspunkte dienen dem Ziel, Korrosion zu vermeiden und nicht die Tragfähigkeit zu optimieren. Auch sind sie nicht unter allen Bedingungen zwingend. Ist die Korrosionsbelastung gering oder ist regelmäßiger Unterhalt gewährleistet, sind viele der Maßnahmen entbehrlich. Abbildung 3.3 zeigt weniger gute und gute Gestaltungslösungen zur Erzielung einer höchstmöglichen Lebensdauer.

Tabelle 3.9 Korrosionsschutzgerechter Entwurf

Vermeidung von Schmutzecken

- Winkel- und U-Profile so ausrichten, dass die Wahrscheinlichkeit von Schmutzrückständen minimiert wird
 - Entwässerungslöcher vorsehen, und zwar so, dass sie groß genug sind und keinerlei Verstopfungen auftreten
 - horizontal ausgerichtete Oberflächen vermeiden
 - Vorsehen von geringen Neigungen bei Seitensteifen, die nominell horizontal ausgewiesen sind
 - Verwendung von Rohr- und Stabquerschnitten (schließen der Röhren unter trockenem Gas oder Luft, wo das Risiko schädlicher Kondensatbildung besteht)
 - Vorsehen von glatten Oberflächen
-

Vermeidung von Spalten

- Verwendung von geschweißten vor geschraubten Verbindungen
 - Einsatz von Schließschweißungen oder Mastix-Verschlüssen
 - Vorzugsweise abschließende/profilierete Schweißnähte
 - Vermeidung von Ablagerungen von faulenden, organischen Stoffen
-

Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Spannungsrisskorrosion unter speziellen Umweltbedingungen (siehe 3.7.2)

- Minimierung der Eigenspannungen durch sorgfältige Wahl der Schweißfolge
 - Kugelstrahlen (jedoch kein Strahlen mit Eisen/Stahl).
-

Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Lochfraß (siehe Kapitel 10):

- Entfernen von Schweißspritzern
 - Beizen von nichtrostendem Stahl zur Entfernung unerwünschter Schweißprodukte. Stark oxidierende, chloridhaltige Reagenzien wie Eisenchlorid sind zu vermeiden; Beizbäder oder Beizpasten, die jeweils Mischungen aus Salpetersäure und Flußsäure enthalten, sind vorzuziehen. Schweißnähte sind grundsätzlich immer zu säubern, dass die Korrosionsbeständigkeit wiederhergestellt werden kann.
 - Vermeidung von Kontakt mit Baustahl (z.B. Arbeitsflächen und Werkzeuge sind ausschließlich für nichtrostende Stähle bestimmt)
 - Einhaltung eines geeigneten Wartungsprogramms.
-

Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Kontaktkorrosion (siehe 3.7.2):

- Unterbrechen elektrischer Strömungen
 - Gegebenfalls Einsatz von Anstrichen
 - Minimierung von Feuchtigkeit
 - Einsatz von Metallen mit ähnlichem elektrischen Potential.
-

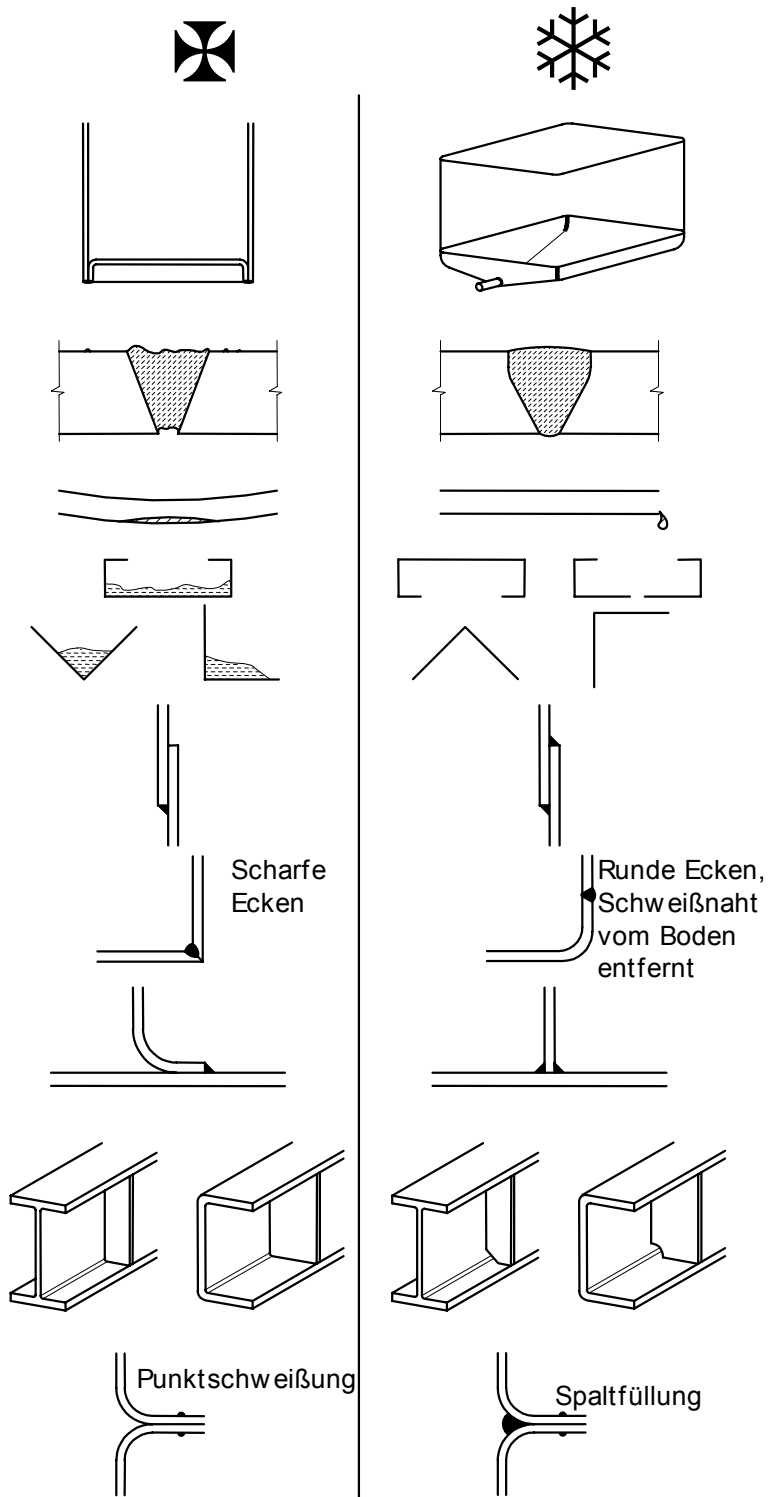


Abbildung 3.3 Schlechte und günstigere Detailausbildungen

4 QUERSCHNITTSWERTE

4.1 Allgemeines

Die Empfehlungen in Abschnitt 4 und 5 gelten für Querschnitte mit Querschnittsteilen entsprechend der Abmessungen in Kapitel 4.2 bzw. Tabelle 4.1.

Die Breiten/Dicken-Verhältnisse der Querschnittsteile, die sich teilweise oder vollständig unter Druck befinden können, bestimmen, ob der Querschnitt hinsichtlich lokalen Beulens gefährdet ist und die Querschnittstragfähigkeit abgemindert werden muss. Querschnittsteile und Querschnitte werden in Abhängigkeit ihrer Beulanfälligkeit den Klassen 1, 2, 3 oder 4 zugeordnet, abhängig von ihrem Rotationsvermögen in Klasse 1 bzw. 2, siehe Kapitel 4.3.

Der abgeminderten Querschnittstragfähigkeit von Querschnitten der Klasse 4 kann bei der Bemessung durch die Berücksichtigung mitwirkender Breiten Rechnung getragen werden, siehe Kapitel 4.4.1.

Auf Achsmaße bezogene Abmessungen dürfen nur bei der Ermittlung von Querschnittswerten von kaltgeformten Bauteilen und bei dünnwandigen Blechen zugrunde gelegt werden. Bei den übrigen Querschnitten sind die tatsächlichen Abmessungen zu berücksichtigen. Gemäß EN 1993-1-3 und EN 1993-1-5 dürfen auf Achsmaße bezogene Abmessungen bei der Berechnung von Widerstandswerten zugrunde gelegt werden. Ebenso erlaubt EN 1993-1-1 in bestimmten Fällen auf Achsmaße bezogenen Abmessungen für die Berechnung von Widerstandsgrößen (siehe 6.2.1(9) und 6.2.5(2) der EN 1993-1-1).

4.2 Maximale Breiten/Dicken-Verhältnisse

Tabelle 4.1 enthält maximale Breiten/Dicken-Verhältnisse für Querschnittsteile aus nichtrostendem Stahl.

4.3 Klassifizierung der Querschnitte

4.3.1 Allgemeines

Grundsätzlich werden Querschnitte aus nichtrostendem Stahl gleichermaßen wie solche aus Baustahl klassifiziert. Es werden im Folgenden vier Querschnittsklassen definiert:

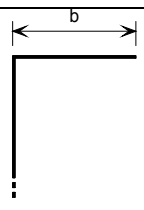
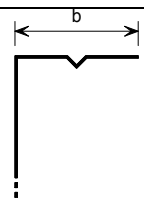
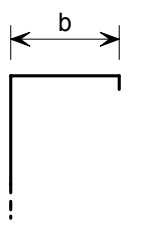
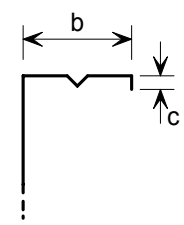
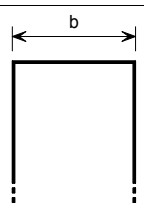
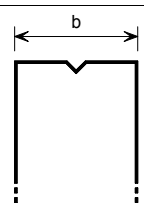
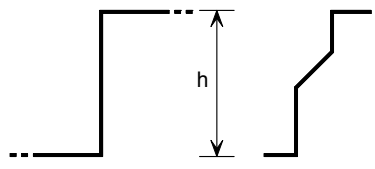
Klasse 1- Querschnitte sind diejenigen, die ein Fließgelenk mit einer Rotationskapazität bilden können, wie sie bei einer voll plastischen Tragwerksanalyse erforderlich ist.

Klasse 2- Querschnitte sind diejenigen, die die plastische Querschnittstragfähigkeit zwar erreichen, jedoch nur über begrenztes Rotationsvermögen verfügen.

Klasse 3- Querschnitte sind diejenigen, bei welchen die rechnerische Spannung in der äußersten Faser des Querschnitts die Streckgrenze erreicht, lokales Beulen jedoch das Erreichen des plastischen Momentenwiderstandes verhindert.

Klasse 4- Querschnitte sind diejenigen, bei denen lokales Beulen eintritt, bevor die Streckgrenze in einem oder in mehreren Querschnittsteilen erreicht wird.

Tabelle 4.1 Maximale Breiten-Dicken-Verhältnisse

a) Ebene Querschnittsteile oder Querschnittsteile mit Zwischensteife, die an einem Ende an einen Steg angrenzen, am anderen Ende ungestützt sind:	$b/t \leq 50$		
b) Flache Querschnittsteile oder Querschnittsteile mit Zwischensteife, die an einem Ende an einen Steg angrenzen, am anderen ungestützten Ende lediglich eine Lippe angeordnet ist:	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$		
c) Flache Querschnittsteile oder Querschnittsteile mit Zwischensteife, die beidseitig durch Stege oder Flansche gestützt sind:	$b/t \leq 400$		
	$h/t \leq 400$		
<p>Anmerkung: Bei flachen Querschnittsteilen wie unter a) angegeben, mit b/t Verhältnissen größer als etwa 30 und ebenen gestützten Querschnittsteilen, die nicht hier aufgeführt sind, mit b/t Verhältnissen größer als etwa 75, sind unter Gebrauchslasten sichtbare Verzerrungen möglich.</p>			

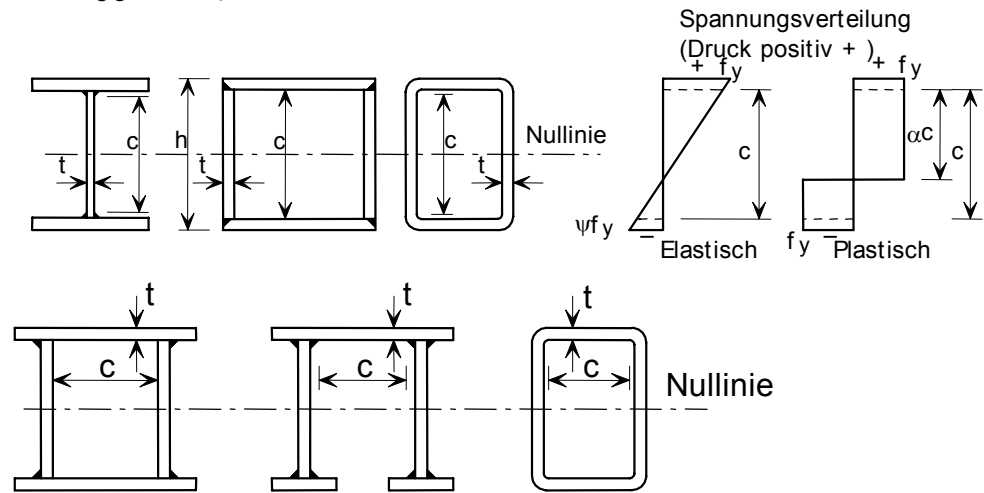
Die Klassifizierung eines Querschnitts richtet sich nach der höchsten (ungünstigsten) Klasse seiner teilweise oder vollständig gedrückten Querschnittsteile. Zu beachten ist, dass die Querschnittsklassifizierung abhängig ist vom Verhältnis zwischen dem sich einstellendem Biegemoment und der zugehörigen Normalkraft und somit entlang der Bauteilachse veränderlich ist.

4.3.2 Grenzen der Querschnittsklassifizierung

Abhängig von den Grenzwerten, die in Tabelle 4.2 angegeben sind werden Querschnitte den Klassen 1, 2 oder 3 zugewiesen. Werden die Kriterien der Klasse 3 nicht erfüllen, sind die Querschnitte der Klasse 4 zuzuordnen.

Tabelle 4.2 Maximale Breiten/Dicken-Verhältnisse für gedrückte Querschnittsteile

Beidseitig gestützte Querschnittsteile



Klasse	bei Biegung	Querschnittsteil auf Druck	Querschnittsteil auf Biegung und Druck	
1	$c/t \leq 56,0\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $c/t \leq 308\varepsilon/(13\alpha - 1)$ für $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 28\varepsilon/\alpha$	
2	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $c/t \leq 320\varepsilon/(13\alpha - 1)$ für $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq 29,1\varepsilon/\alpha$	
3	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 15,3\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Zu k_σ siehe 4.4.1	
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Stahlsorte	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Anmerkungen:

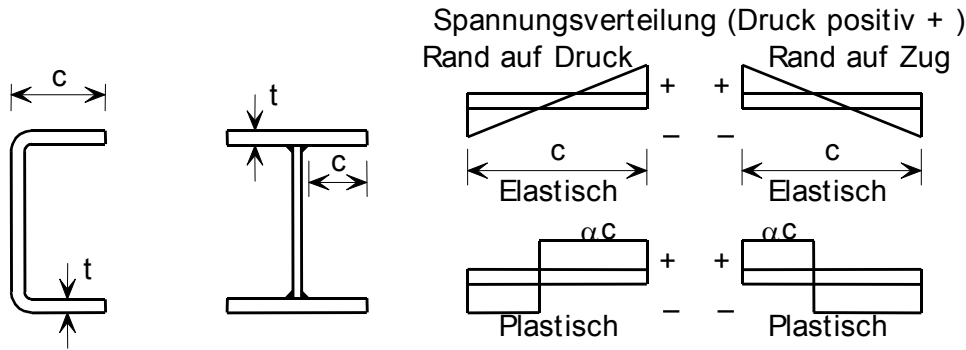
Bei Hohlprofilen kann auf der sicheren Seite liegend c mit $(h-2t)$ oder $(b-2t)$ bestimmt werden.

$E = 200000$ N/mm²

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right) \quad \text{bei Querschnitten, die bezüglich der starken Achse symmetrisch sind}$$

Tabelle 4.2 (Fortsetzung) Maximale Breiten/Dicken-Verhältnisse für gedrückte Querschnittsteile

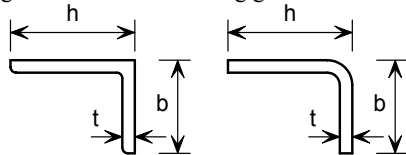
Einseitig gestützte Plattenstreifen



Klasse	Art des Querschnitts	Querschnittsteil auf Druck	Querschnittsteil auf Biegung und Druck	
			Rand unter Druck	Rand unter Zug
1	kaltgeformt	$c/t \leq 10,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	geschweißt	$c/t \leq 9,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	kaltgeformt	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	geschweißt	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	kaltgeformt	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 18,1\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	Zu k_σ siehe 4.4.1.
	geschweißt	$c/t \leq 11,0\varepsilon$	$c/t \leq 16,7\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	Zu k_σ siehe 4.4.1.

Winkel

siehe auch einseitig gestützte Flanschteile
 gilt nicht für linienförmig gestützte Winkel



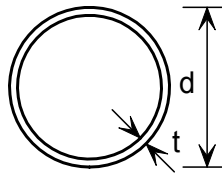
Klasse	Querschnitt unter Druck			
3	$h/t \leq 11,9 \varepsilon ; (b+h)/2t \leq 9,1 \varepsilon$			
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Grade	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Anmerkungen: $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

$\alpha = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)$ bei Querschnitten, die bezüglich der starken Achse symmetrisch sind

Tabelle 4.2 (Fortsetzung) Maximale Breiten/Dicken-Verhältnisse für gedrückte Querschnittsteile

Rundhohlprofile



Klasse	Querschnitt auf Biegung	Querschnitt auf Druck		
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$	$d/t \leq 50\varepsilon^2$		
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$	$d/t \leq 70\varepsilon^2$		
3	$d/t \leq 280\varepsilon^2$ Hinweis zu $d/t > 280\varepsilon^2$ siehe EN 1993-1-6	$d/t \leq 90\varepsilon^2$ Hinweis zu $d/t > 90\varepsilon^2$ siehe EN1993-1-6		
$\varepsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Sorte	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ε	1,03	1,01	0,698

Anmerkung: $E = 200000 \text{ N/mm}^2$

4.4 Mitwirkende Breiten

4.4.1 Mitwirkende Breiten bei Querschnittsteilen der Klasse 4

Die Querschnittseigenschaften von Querschnitten der Klasse 4 können rechnerisch unter Berücksichtigung der mitwirkenden Breiten unter teilweisem oder vollständigem Druck ermittelt werden. Alternativ können auch Versuche durchgeführt werden, siehe Abschnitt 9.

Die mitwirkende Querschnittsfläche eines Querschnitts der Klasse 4 unter vollständigem oder teilweisem Druck A_{eff} ist gleich der Bruttofläche eines Querschnitts abzüglich der Summe aller ausfallenden Flächen der schlanken Querschnittsteile. Die wirksame Fläche eines Querschnittsteils der Klasse 4 ist gleich der effektiven Breite b_{eff} , wie untenstehend berechnet, multipliziert mit der Elementdicke. Bei Biegebeanspruchung des Querschnitts muss zusätzlich das wirksame Flächenträgheitsmoment I_{eff} und der wirksame Querschnittswiderstand W_{eff} berechnet werden.

Die mitwirkenden Breiten von vollständig oder teilweise gedrückten Querschnittsteilen können unter Zuhilfenahme von Tabelle 4.3 für beidseitig gestützte Plattenstreifen bzw. Tabelle 4.4 für einseitig gestützte Plattenstreifen ermittelt werden.

Für die Berechnung der mitwirkenden Breite gedrückter Flansche kann das Spannungsverhältnis ψ , welches am Bruttoquerschnitt ermittelt wird, zugrunde gelegt werden (ψ ist in Tabelle 4.3 und 4.4 definiert). Zur Ermittlung der mitwirkenden Breite eines Stegelements ist das Spannungsverhältnis ψ am Querschnitt mit reduzierter Druckflanschfläche und Bruttofläche des Steges zugrunde zu legen.

Der Abminderungsbeiwert ρ kann folgendermaßen berechnet werden:

Für kaltgeformte oder geschweißte beidseitig gestützte Querschnittsteile:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{jedoch } \leq 1 \quad (4.1a)$$

Für kaltgeformte einseitig gestützte Querschnittsteile:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{jedoch } \leq 1 \quad (4.1b)$$

Für geschweißte einseitig gestützte Querschnittsteile:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{jedoch } \leq 1 \quad (4.1c)$$

wobei die Elementschlankheit $\bar{\lambda}_p$ definiert ist als:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (4.2)$$

hierin ist:

t die Plattendicke

k_σ der Beulwert entsprechend des Spannungsverhältnisses ψ aus Tabelle 4.3 oder aber 4.4

\bar{b} die maßgebend Breite gemäß nachstehender Angaben:

$\bar{b} = d$ bei Stegen (außer bei Rechteckhohlprofilen)

$\bar{b} =$ Stegweiten von Rechteckhohlprofilen, auf der sicheren Seite liegend als $h-2t$

$\bar{b} = b$ bei beidseitig gestützten Flanschstreifen (außer bei Rechteckhohlprofilen)

$\bar{b} =$ Flanschweiten von Rechteckhohlprofilen, auf der sicheren Seite liegend als $b-2t$

$\bar{b} = c$ bei einseitig gestützten Flanschstreifen

$\bar{b} = h$ bei gleichschenkligen und ungleichschenkligen Winkeln

ε ist der Materialbeiwert gemäß Definition in Tabelle 4.2

Im Allgemeinen verschiebt sich die Nulllinie um das Maß e in Bezug auf die Nulllinienlage des Bruttoquerschnitts, siehe Abbildungen 4.1 und 4.2, was bei der Berechnung der Querschnittswerte zu berücksichtigen ist.

Wird der Querschnitt durch eine Normalkraft beansprucht, berücksichtigen die Bemessungsempfehlungen in Abschnitt 5.5.2 das Zusatzmoment ΔM_{Ed} wie folgt:

$$\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N$$

wobei e_N die Verschiebung der Nulllinie durch eine Normalkraftbeanspruchung darstellt, siehe Abbildung 4.2.

Tabelle 4.3 Beidseitig gestützte Plattenstreifen

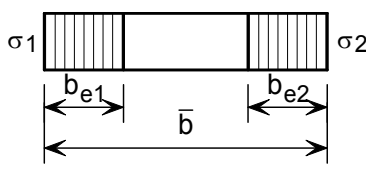
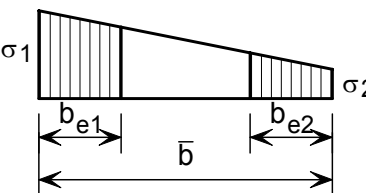
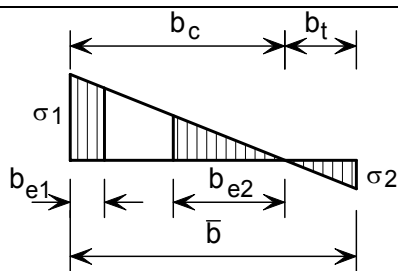
Spannungsverteilung (Druck ist positiv)				Mitwirkende Breite b_{eff}		
				$\psi = 1 :$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{\text{eff}} \quad b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}}$		
				$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2 b_{\text{eff}}}{5 - \psi} \quad b_{e2} = b_{\text{eff}} - b_{e1}$		
				$\psi < 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}} \quad b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Beulwert k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabelle 4.4 Einseitig gestützte Plattenstreifen

Spannungsverteilung (Druck positiv)			Mitwirkende Breite b_{eff}		
			$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho c$		
			$\psi < 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$+1 \geq \psi \geq -3$	
Beulwert k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
			$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho c$		
			$\psi < 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Beulwert k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

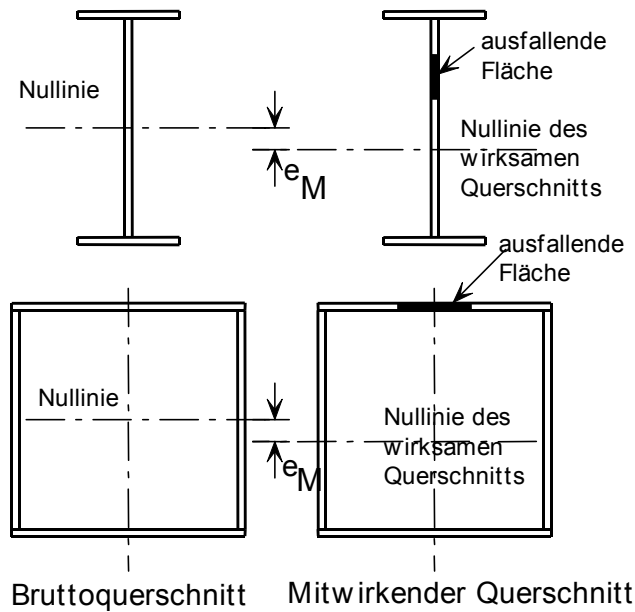


Abbildung 4.1 Querschnitt der Klasse 4 unter Biegebeanspruchung

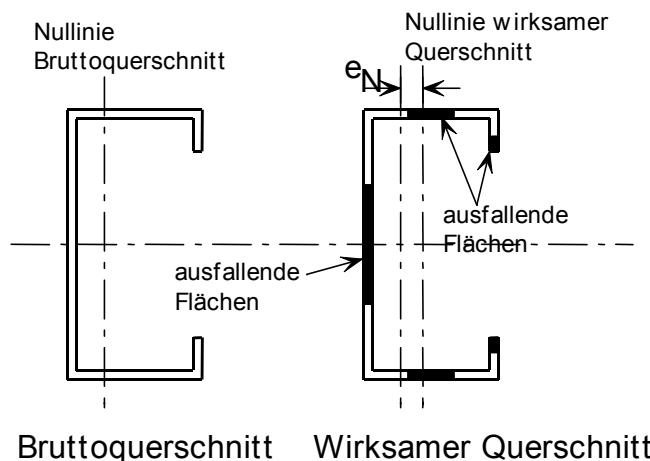


Abbildung 4.2 Querschnitt der Klasse 4 unter Druckbeanspruchung

4.4.2 Mittragende Breite

Eine Reduzierung auf die mittragende Breite kann vernachlässigt werden, falls $b_0 < L_e / 50$, wobei b_0 als auskragende Flanscbreite bzw. als halbe Breite eines innenliegenden Querschnittsteils anzusetzen ist und L_e der Abstand zwischen den Momentennullpunkten darstellt. Wird die genannte Grenze für b_0 überschritten, so ist eine Reduzierung auf die mittragende Breite in den Flanschen vorzunehmen; Hinweise für Baustahl sind EN 1993-1-5 zu entnehmen. Es ist zu beachten, dass EN 1993-1-5 die Berücksichtigung von reduzierten mittragenden Breiten sowohl im Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit fordert.

4.4.3 Flanscheindrehungen

Die Einfluss von Flanscheindrehungen (d.h. zur neutralen Ebene hin nach innen gerichtete Verkrümmung) auf die Tragfähigkeit sollte bei sehr breiten Flanschen in einem biegebeanspruchten Profil bzw. bei Flanschen in einem gebogenen biegebeanspruchten Profil, bei dem die konkave Seite druckbeansprucht ist,

berücksichtigt werden. Der Einfluss kann vernachlässigt werden, falls derartige Verdrehungen weniger als 5% der Querschnittshöhe betragen. Bei größeren Flanscheindrehungen sollte die Tragfähigkeit abgemindert werden, z.B. infolge einer teilweisen Reduzierung der Kragarmlänge der breiten Flansche. Mögliche Stegbiegung sollten ebenso berücksichtigt werden.

Die bei nichtrostenden Stahlträgern üblichen Breiten/Dicken-Verhältnisse von Flanschen sind i.d.R. nicht gefährdet hinsichtlich etwaiger Flanscheindrehungen. Gegebenenfalls sind die Hinweise für Baustahl in EN 1993-1-3 zu beachten.

4.5 Ausgesteifte Querschnittsteile

4.5.1 Randsteifen

Es gelten die Regeln für Baustahl in EN 1993-1-3.

4.5.2 Zwischensteifen

Es gelten die Regeln für Baustahl in EN 1993-1-3.

4.5.3 Trapezblechprofile mit ausgesteiften Flanschen

Der wirksame Querschnitt eines Flansches mit Zwischensteifen unter gleichmäßigem Druck ermittelt sich aus den reduzierten Flächen $A_{s,red}$ unter Berücksichtigung zweier an den Stegen angrenzenden Streifen der Breite $0,5b_{eff}$ bzw. $15t$, siehe Abbildungen 4.3 und 4.4.

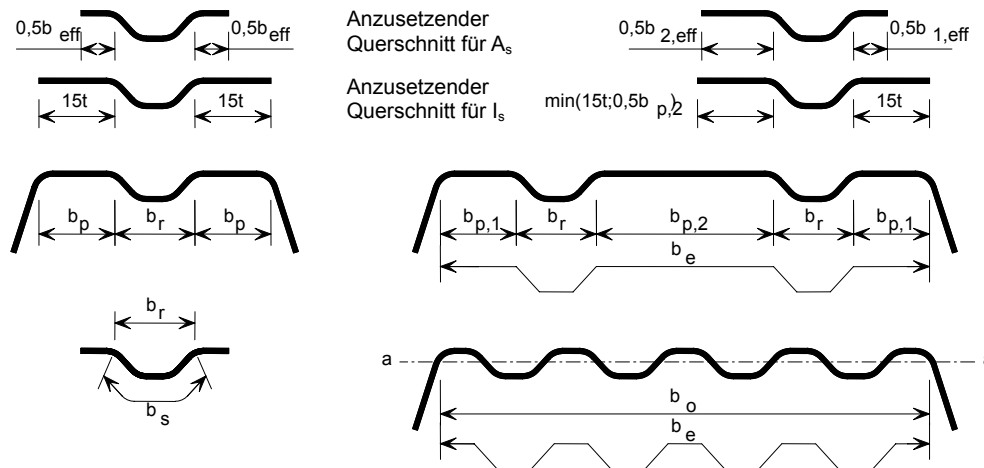


Abbildung 4.3 Druckflansch mit einer, zwei oder mehreren Steifen

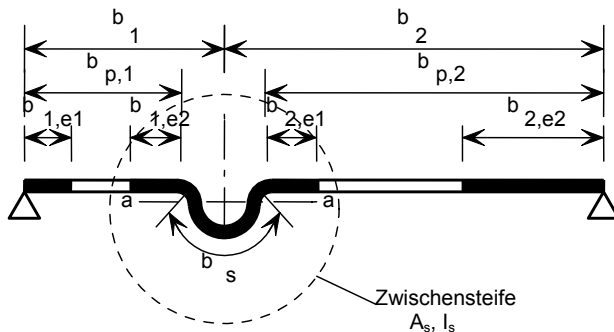


Abbildung 4.4 Zwischensteife

Bei einer mittig angeordneten Flanschsteife ist die elastische kritische Beulspannung $\sigma_{cr,s}$ (zur Berechnung von $\bar{\lambda}_d$) mit Gleichung (4.3) zu ermitteln:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} \quad (4.3)$$

hierin ist:

- b_p die Nennweite des ebenen Elements, wie in Abbildung 4.3, 4.4 und 4.5 gezeigt,
- b_s die Breite der Steife, als Umfang der Steife gemessen, siehe Abbildung 4.3, 4.4 und 4.5,
- A_s die wirksame Querschnittsfläche einer Zwischensteife, siehe Abbildung 4.3, 4.4 und 4.5,
- I_s das wirksame Flächenträgheitsmoment einer Zwischensteife, siehe Abbildung 4.3, 4.4 und 4.5
- k_w Koeffizient, der den teilweisen Rotationswiderstand des durch den Steg oder andere angrenzende Querschnittsteile ausgesteiften Flansches berücksichtigt, siehe unten; bei Berechnung des wirksamen Querschnitts unter axialem Druck ist der Wert $k_w=1,0$.

Bei zwei symmetrisch angeordneten Flanschsteifen ist die elastische, kritische Beulspannung $\sigma_{cr,s}$ mit Gleichung (4.4) zu ermitteln:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8b_l^2(3b_e - 4b_l)}} \quad (4.4)$$

hierin ist:

$$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s \quad (4.5)$$

$$b_l = b_{p,1} + 0,5b_r \quad (4.6)$$

mit:

- $b_{p,1}$ Nennweite eines Außenelements, wie in Abbildung 4.4 dargestellt
- $b_{p,2}$ Nennweite eines Innenelements, wie in Abbildung 4.4 dargestellt
- b_r Gesamtbreite einer Steife, siehe Abbildung 4.3.

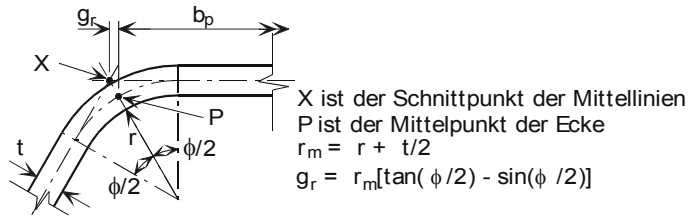
Der Wert für k_w kann über die Beulwellenlänge l_b des Druckflanschs wie folgt berechnet werden:

$$\text{wenn } \frac{l_b}{s_w} \geq 2, \quad k_w = k_{w0} \quad (4.7)$$

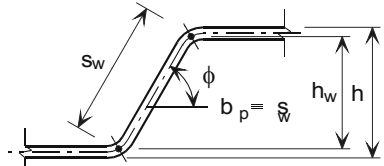
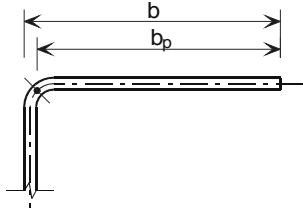
$$\text{wenn } \frac{l_b}{s_w} < 2, \quad k_w = k_{w0} - (k_{w0} - 1) \left[\frac{2l_b}{s_w} - \left(\frac{l_b}{s_w} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

hierin ist:

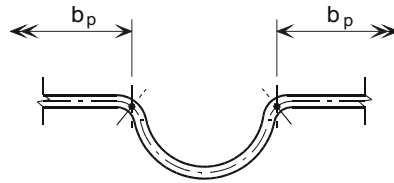
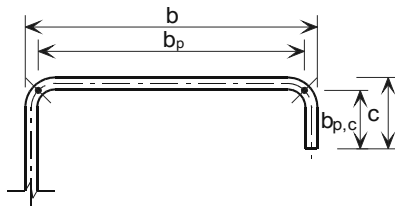
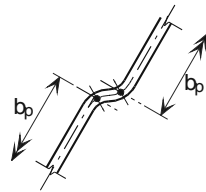
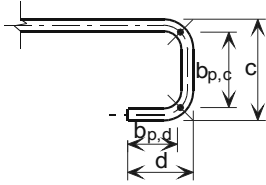
- s_w die schräge Steghöhe, siehe Abbildung 4.5.



a) Mittelpunkt der Ecke oder Biegung



c) Nennweite b_p für einen Steg
($b_p =$ geneigte Höhe s_w)



b) Nennweite b_p eines ebenen Elements b , c , und d

b) Nennweite b_p eines ebenen Elements an eine Steife angrenzend

Abbildung 4.5 Nennweiten von ebenen Elementen b_p unter Berücksichtigung der Ausrundungsradien

Alternativ kann der Einspannungskoeffizient k_w auf der sicheren Seite liegend zu 1,0 (entspricht einer gelenkigen Lagerung) angenommen werden.

Die Werte für l_b und k_{wo} können wie folgt ermittelt werden:

a) für einen Druckflansch mit einer Zwischensteife:

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2b_p + 3b_s)}{t^3}} \quad (4.9)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} \quad (4.10)$$

$$\text{mit } b_d = 2b_p + b_s \quad (4.11)$$

b) für einen Druckflansch mit zwei oder drei Zwischensteifen:

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{\frac{I_s b_1^2 (3b_e - 4b_1)}{t^3}} \quad (4.12)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1)}{b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3b_e - 4b_1)}} \quad (4.13)$$

Die abgeminderte mitwirkende Fläche einer Steife $A_{s,red}$ unter Berücksichtigung von Drillknicken ist wie folgt anzunehmen:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_y / \gamma_{MO}}{\sigma_{com,ser}} \quad \text{jedoch } A_{s,red} \leq A_s \quad (4.14)$$

hierin ist:

$\sigma_{com,ser}$ die maximale Druckspannung in der Steife (auf Basis des wirksamen Querschnitts berechnet) im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Bei nicht ausgesteiften Stegen, ist der Abminderungsbeiwert χ_d wie folgt zu ermitteln:

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_d \leq 0,65, \quad \chi_d = 1,0 \quad (4.15)$$

$$\text{wenn } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38, \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad (4.16)$$

$$\text{wenn } \bar{\lambda}_d \geq 1,38, \quad \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad (4.17)$$

wobei $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,s}}$.

Sind die Stege ebenfalls ausgesteift, wird auf EN 1993-1-3 verwiesen.

Die wirksamen Querschnittswerte werden unter Berücksichtigung des abgeminderten wirksamen Querschnitts $A_{s,red}$ bestimmt, der sich durch die abgeminderte Dicke $t_{red} = t A_{red} / A_s$ für alle Teile von A_s ergibt.

4.6 Berechnung der Querschnittswerte

4.6.1 Allgemeines

Die Berechnung der Querschnittswerte hat nach den im Ingenieurwesen üblichen Praktiken zu erfolgen, sie ist ggf. unter Ansatz der Nettofläche des Querschnitts bei lokaler Beulgefährdung oder bei Vorhandensein von Lochbohrungen zu ermitteln. Materialverjüngungen in kaltgeformten Ecken müssen wegen des Festigkeitsanstiegs aus der Kaltverfestigung nicht als abmindernd berücksichtigt werden.

4.6.2 Einfluss ausgerundeter Ecken

Der Einfluss ausgerundeter Ecken auf die Querschnittstragfähigkeit kann vernachlässigt werden, falls der innenliegende Radius $r \leq 5t$ und $r \leq 0.10b_p$ beträgt. Für diesen Fall kann man zur Vereinfachung von einem aus ebenen scharfkantigen Teilen zusammengesetzten Querschnitt ausgehen. Bei den Steifigkeitseigenschaften von Querschnitten sollte der Einfluss ausgerundeter Ecken dagegen immer berücksichtigt werden.

Der Einfluss ausgerundeter Ecken auf die Querschnittswerte kann mit hinreichender Genauigkeit durch die Abminderung der errechneten Querschnittswerte für einen ähnlichen, scharfkantigen Querschnitt berücksichtigt werden, siehe Abbildung 4.6, bei dem folgende Näherungen angewandt werden:

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) \quad (4.18)$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad (4.19)$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad (4.20)$$

wobei

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} \quad (4.21)$$

hierin ist:

- A_g die Fläche des Bruttoquerschnitts
- $A_{g,sh}$ der Wert A_g für den Querschnitt mit scharfen Ecken
- $b_{p,i}$ die Nennbreite des ebenen Elements i für einen Querschnitt mit scharfkantigen Ecken
- I_g das Flächenträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts
- $I_{g,sh}$ der Wert für I_g für einen Querschnitt mit scharfen Ecken
- I_w der Wölbwiderstand des Bruttoquerschnitts
- $I_{w,sh}$ der Wert I_w für einen Querschnitt mit scharfkantigen Ecken
- ϕ_j der Winkel zwischen zwei ebenen Elementen
- m die Anzahl der ebenen Elemente
- n die Anzahl der ausgerundeten Elemente
- r_j der Innenradius der ausgerundeten Elemente j

Die oben erläuterten Abminderungen können ebenso für die Berechnung der wirksamen Querschnittswerte A_{eff} , $I_{y,eff}$, $I_{z,eff}$ und $I_{w,eff}$ herangezogen werden, vorausgesetzt, dass sich die Nennweiten der ebenen Elemente auf die Schnittpunkte der Mittellinien beziehen.

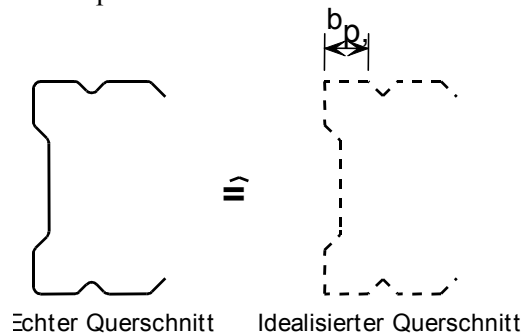


Abbildung 4.6 Wirklicher und idealisierter Querschnitt

4.6.3 Bruttoquerschnitt

Bei der Berechnung der Bruttoquerschnittswerte werden Löcher für Befestigungsmittel nicht berücksichtigt. Größere Öffnungen hingegen müssen eingerechnet werden.

4.6.4 Nettoquerschnitt

Die Nettofläche eines Querschnitts oder eines Querschnittsteils entspricht der Fläche des Bruttoquerschnitts abzüglich aller Öffnungen, einschließlich Löchern für Verbindungselemente. Bei den Abzügen für die Verbindungselemente ist der Lochnenndurchmesser einzusetzen.

Unter der Voraussetzung, dass die Löcher nicht versetzt angeordnet sind, entspricht die für die Löcher gesamte abzuziehende Fläche der Maximalsumme der Lochquerschnitte im Schnitt senkrecht zur Bauteilachse (siehe Versagensebene (2) in Abbildung 4.7). Sind die Löcher versetzt angeordnet, dann sollte als gesamte abzuziehende Fläche der größere der folgenden Werte angesetzt werden:

- Abzugsfläche für nicht versetzt angeordnete Löcher

- $t \left(nd_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right)$

mit:

- s Versatzmaß, d.h. der Abstand der Mittelpunkte zweier aufeinander folgender Löcher in der Reihe, gemessen parallel zur Bauteilachse
- p Weitenmaß, d.h. der Abstand der Mittelpunkte der gleichen zwei Löcher, gemessen senkrecht zur Bauteilachse
- t Blechdicke
- n Anzahl der Löcher, die sich in beliebiger Diagonalen- oder Zick-Zack-Linie fortlaufend durch das Bauteil bzw. den Bauteilabschnitt erstrecken, siehe Abbildung 4.7
- d_0 Lochdurchmesser

Bei Querschnitten wie Winkelprofile mit Löchern in beiden Schenkeln, sollte das Maß auf die Profilmittelachsen bezogen gemessen werden, siehe Abbildung 4.8.

Für Winkelprofile, die nur über einen Schenkel angeschlossen sind, siehe Abschnitt 6.2.

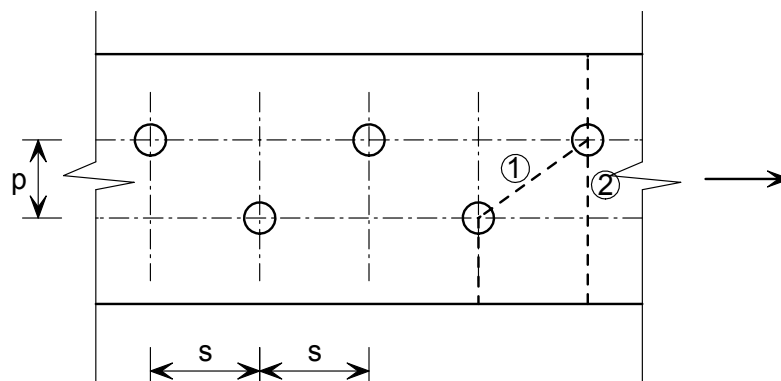


Abbildung 4.7 Versetzte Löcher und maßgebende Bruchlinien 1 und 2

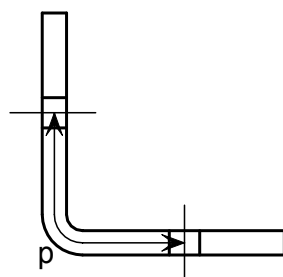


Abbildung 4.8 Weitenmaß bei Winkelprofilen mit Löchern in beiden Schenkeln

4.7 Querschnittstragfähigkeit

4.7.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt wird ausschließlich die Querschnittstragfähigkeit behandelt; eine Stabilitätsuntersuchung ist ebenfalls erforderlich, um die Bauteiltragfähigkeit sicherzustellen. Bauteilstabilität wird in Kapitel 5 behandelt. Die γ_M -Beiwerte, auf die sich in diesem Abschnitt bezogen wird, enthält Tabelle 2.1.

Die Kaltverfestigung infolge Kaltumformung im Zuge der Fertigung (siehe Abschnitt 3.2.2) steigert im Allgemeinen die Querschnittstragfähigkeit, jedoch reichen die Daten für nichtrostende Stähle zur Zeit noch nicht aus, Bemessungsempfehlungen zu formulieren. Es wird daher vorgeschlagen, dass die verbesserten Eigenschaften infolge Kaltverfestigung versuchsgestützt nachzuweisen sind (siehe Abschnitt 9).

In Ausnahmefällen kann es zulässig sein, den Einfluss aus der Verfestigung nichtrostender Stähle bei der Bemessung zu berücksichtigen, siehe Abschnitt 4.7.7.

4.7.2 Zugtragfähigkeit des Querschnitts

Die Querschnittstragfähigkeit bei reiner Zugbeanspruchung, $N_{t,Rd}$, ist der kleinere Wert:

a) des Bemessungswiderstandes des Bruttoquerschnitts

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.22)$$

b) der Bemessungsgrenztragfähigkeit des Nettoquerschnitts bei Löchern für Verbindungselemente

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.23)$$

hierbei ist:

A_g der Bruttoquerschnitt,

A_{net} der Nettoquerschnitt (siehe Abschnitt 4.6.4)

f_y die charakteristische Streckgrenze (im Allgemeinen wird die minimal ausgewiesene plastische 0,2%-Dehngrenze angenommen, siehe Tabelle 3.1)

f_u die charakteristische Zugfestigkeit (im Allgemeinen wird der minimal ausgewiesene Wert angenommen, siehe Tabelle 3.1)

$$k_r = [1 + 3r(d_0 / u - 0,3)] \text{ jedoch } k_r \leq 1,0 \quad (4.24)$$

r = [Anzahl der Schrauben im Querschnitt]/[Gesamtanzahl der Schrauben in der Verbindung]

d_0 der Lochnennendurchmesser

u = $2e_2$ jedoch $u \leq p_2$

4.7.3 Drucktragfähigkeit von Querschnitten

Die Drucktragfähigkeit eines Querschnitts, $N_{c,Rd}$, mit einer resultierenden Kraft im Schwerpunkt des Querschnitts (bei Querschnitten der Klasse 1, 2 und 3) oder des

wirksamen Querschnitts (bei Querschnitten der Klasse 4) kann bestimmt werden durch:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (4.25)$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (4.26)$$

Anmerkung: Nicht doppeltsymmetrische Querschnitte der Klasse 4 sind gemäß Abschnitt 4.7.6 unter der Berücksichtigung des Zusatzmoments ΔM_{Ed} durch Exzentrizität der der Schwerelinienlage des wirksamen Querschnitts zu bestimmen, siehe Abschnitt 4.4.1.

4.7.4 Biegetragfähigkeit von Querschnitten

Ohne Quer- und Axialkräfte ermittelt sich die Bemessungsbiegetragfähigkeit von Querschnitten bei einachsiger Biegung, $M_{c,Rd}$, aus:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1 und 2} \quad (4.27)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 3} \quad (4.28)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (4.29)$$

hierin ist:

- W_{pl} das plastische Widerstandsmoment
- $W_{el,min}$ das elastische Widerstandsmoment bezogen auf die Faser mit der maximalen elastischen Spannung (zu beachten jedoch Abschnitt 4.1 für kaltgeformte Querschnitte)
- $W_{eff,min}$ das effektive Widerstandsmoment bezogen auf die Faser mit der maximalen elastischen Spannung (zu beachten jedoch Abschnitt 4.1 für kaltgeformte Querschnitte).

Für Querschnitte unter zweiachsiger Biegung gilt Abschnitt 4.7.6.

4.7.5 Schubtragfähigkeit von Querschnitten

Die plastische Schubtragfähigkeit eines Querschnitts $V_{pl,Rd}$ bestimmt sich im Allgemeinen aus:

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} \quad (4.30)$$

hierin ist:

- A_v die schubwirksame Fläche, die folgendermaßen anzusetzen ist:
 - a) Bei gewalzten I- und H-Profilen mit Belastung parallel zum Steg $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$, jedoch mindestens $\eta h_w t_w$
 - b) bei gewalzten U-Profilen mit Belastung parallel zum Steg $A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$
 - c) bei gewalzten T-Profilen mit Belastung parallel zum Steg $0,9(A - bt_f)$
 - d) bei geschweißten I-, H- und Rechteckhohlprofilen mit Belastung parallel zum Steg $\eta \sum (h_w t_w)$
 - e) bei geschweißten I-, H-, U- und Rechteckhohlprofilen mit Belastung parallel zu den Flanschen $A - \sum (h_w t_w)$

- f) bei kaltgeformten Rechteckhohlprofilen mit gleichbleibender Dicke
 - i. Belastung parallel zur Höhe $Ah/(b+h)$
 - ii. Belastung parallel zur Breite $Ab/(b+h)$
- g) bei Rundhohlprofilen und Röhrenquerschnitten mit gleichbleibender Dicke $2A/\pi$

wobei:

A die Querschnittsfläche

b die Gesamtbreite

h die Gesamthöhe

h_w die Steghöhe

r der Wurzelradius

t_f die Flanschdicke

t_w die Stegdicke (falls die Stegdicke nicht konstant ist, sollte für t_w die kleinste Dicke angesetzt werden).

η siehe EN 1993-1-5. (in EN 1993-1-4 ist der Wert $\eta = 1,20$ angegeben.)

Anmerkung: Der gleiche Wert für η , der für die Ermittlung der plastischen Schubtragfähigkeit verwendet wird, sollte auch zur Ermittlung der Tragfähigkeit gegen Schubbeulen verwendet werden.

Der Tragfähigkeit gegen Schubbeulen ist ebenfalls zu überprüfen, siehe Abschnitt 5.4.3.

4.7.6 Querschnittstragfähigkeit bei Interaktion

Bei Normalkraftbeanspruchung ist deren mögliche Auswirkung auf die plastische Momententragfähigkeit zu berücksichtigen. Bei Querschnittsklassen 1 und 2 sollte die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (4.31)$$

wobei:

$M_{N,Rd}$ Bemessungswert der plastischen Momententragfähigkeit, reduziert infolge des Einflusses der Normalkraft N_{Ed} .

Bei doppeltsymmetrischen I- und H-Profilen oder anderen Flanschabschnitten braucht die Auswirkung der Normalkraft auf die Momententragfähigkeit um die y-y Achse nicht berücksichtigt zu werden, sofern die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad \text{und} \quad (4.32a)$$

$$N_{Ed} \leq 0,5h_w t_w f_y / \gamma_{M0} \quad (4.32b)$$

Sind keine Querkräfte vorhanden, sollte bei den Querschnittsklassen 3 und 4 die maximalen Längsspannungen die Bedingung erfüllen:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_y / \gamma_{M0} \quad (4.33)$$

wobei:

$\sigma_{x,Ed}$ der Bemessungswert der örtlichen Längsspannung infolge Biegemoment und Normalkraft, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Löchern.

Bei der Querschnittsklasse 4 sollte das folgende Kriterium erfüllt sein:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (4.34)$$

wobei:

A_{eff} die wirksame Querschnittsfläche bei gleichmäßiger Verteilung der Druckbeanspruchung

$W_{eff,min}$ das wirksame Widerstandsmoment bei reiner Biegung um die maßgebliche Achse

e_N die Exzentrizität der maßgebenden Nulllinie bei reiner Druckbeanspruchung.

Es ist zu beachten, dass bei Winkelprofilen anstelle der y- und z-Achsen entsprechend die u- und v- Achsen gelten.

Überschreitet V_{Ed} 50% von $V_{pl,Rd}$, so ist die Bemessungstragfähigkeit des Querschnitts unter Kombinationen von Axialkräften und Momenten mit einer reduzierten Streckgrenze $(1 - \rho) f_y$ für den Schubanteil zu ermitteln, wobei $\rho = (2V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$ ist.

4.7.7 Nutzung des Verfestigungsverhaltens

Unter bestimmten Voraussetzungen, beispielsweise bei Trägern unter kurzzeitig wirkender außergewöhnlicher Belastung, ist es zulässig, die günstige Wirkung der Verfestigung von nichtrostenden Stählen bei der Bemessung auszunutzen.

Dies kann durch die Annahme einer höheren Streckgrenze σ_0 in allen Berechnungen anstelle der plastischen 0,2%-Dehngrenze f_y erfolgen. Falls keine detaillierten Untersuchungen erfolgen sollen, wie beispielsweise die Durchführung nichtlinearer Finite-Element-Analysen, ist es empfehlenswert, die folgenden Einschränkungen einzuhalten:

- Der Querschnitt sollte den Klassen 1 oder 2 angehören, wenn σ_0 anstelle von f_y bei der Berechnung von ε in Tabelle 4.2 eingesetzt wird.
- Der Querschnitt wird lediglich durch Biegung um die starke Achse beansprucht.
- Das betreffende Bauteil ist in keiner Weise stabilitätsgefährdet (Biegeknicken, Torsionsknicken, Biegedrillknicken oder Drillknicken – siehe Kapitel 5), ebenso auf der Basis von σ_0 in allen Nachweisen.
- Verbindungen zu benachbarten Bauteilen und die Bauteile selbst sind ausreichend tragfähig, den unterstellten Grenzlasten standzuhalten.

Besondere Aufmerksamkeit gilt der Beurteilung der Tragfähigkeit von Verbindungen.

Bei Querschnitten der Klasse 3 und 4, können erhöhte Festigkeiten unterstellt werden, vorausgesetzt dass diese Werte experimentell gemäß Abschnitt 9 belegt werden können.

5 BEMESSUNG VON BAUTEILEN

5.1 Einleitung

Die Nachweisführung bei Bauteilen aus nichtrostendem Stahl ist ähnlich der Nachweisführung von Bauteilen aus Baustahl. Es wird empfohlen, die Schnittgrößen mit einer elastischen Tragwerksberechnung zu ermitteln.

Zusätzlich zur Querschnittstragfähigkeit, siehe Kapitel 4, ist das Stabilitätsverhalten der Bauteile zu untersuchen, wie es im vorliegenden Kapitel behandelt wird.

Näherungsweise kann die Stabilitätsgefährdung bei Bauteilen aus nichtrostendem Stahl unter Verwendung des Tangentenmoduls bezogen auf die Beulspannung, im Gegensatz zum Ansatz des Anfangsmoduls wie es für Baustähle üblich ist, untersucht werden. Bei der Unterstellung vergleichbarer geometrischer und struktureller Imperfektionen für Baustahl und nichtrostenden Stahl führt dies im Allgemeinen zu zufriedenstellenden Ergebnissen, solange die gleichen Regeln wie für Baustahl zugrunde liegen. Deshalb kann dieses Näherungsverfahren dem Tragwerksplaner zur Verfügung gestellt werden. Das Ergebnis ist jedoch iterativ zu ermitteln, weswegen in diesen Bemessungshilfen auf seine Darstellung verzichtet wurde. Ausgewählte Fälle, für die effektive Bemessungskurven hergeleitet wurden, können dem Handbuch entnommen werden. Diese Bemessungskurven können mit dem Anfangsmodul anstelle des Tangentenmoduls angewendet werden. Stattdessen wurde Wert darauf gelegt, gegen vorliegende Versuchsdaten zu kalibrieren.

Die folgenden Abschnitte sind für einfach-, doppelt- oder punktsymmetrische gleichförmige Querschnitte anwendbar. Die Tragfähigkeit von unsymmetrischen Querschnitten ist durch geeignete experimentelle Untersuchungen nachzuweisen.

5.2 Zugglieder

Bauteile, die ausschließlich auf Zug beansprucht werden, sind nicht stabilitätsgefährdet. Maßgebend bei der Bemessung ist daher die Querschnittstragfähigkeit, siehe Abschnitt 4.7.2, und die Tragfähigkeit der Verbindungen, siehe Kapitel 6.

Für Winkelprofile mit Verbindungen an einem Schenkel oder für andere unsymmetrisch angeschlossene Bauteile gilt:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd} \quad (5.1)$$

wobei die Definitionen des Abschnitts 4.7.2 gelten, und $N_{u,Rd}$ mit den Ausdrücken 6.6, 6.7 oder 6.8 des Abschnitts 6.2.3 ermittelt werden.

5.3 Druckglieder

5.3.1 Allgemeines

Druckbeanspruchte Bauteile sind gegen eine Anzahl möglicher Stabilitätsmoden gefährdet, wie:

- Plattenbeulen (nur bei Querschnitten der Klasse 4)

- Biegeknicken
- Drillknicken
- Biegedrillknicken

Doppelsymmetrische Querschnitte (Rundrohrprofile, Rechteckhohlprofile, I-Profile etc)

Doppelt symmetrische Querschnitte brauchen nicht gegen Biegedrillknicken nachgewiesen zu werden, da Schubmittelpunkt und Schwerpunkt zusammenfallen. Jedoch kann Drillknicken maßgebend werden.

Rundrohrprofile und Kastenprofile sind in Bezug auf Drillknicken gefährdet.

Bei den im Bauwesen üblichen Rechteckhohlprofilen ist Drillknicken nicht maßgebend. Bei Rechteckhohlprofilen muss Drillknicken nur dann beachtet werden, wenn ungewöhnlich hohe h/b-Verhältnisse vorliegen.

Einfach symmetrische Querschnitte (gleichschenklige Winkelprofile, U-Profile)

Es ist notwendig, Querschnitte von U-Profilen und gleichschenkligen Winkelprofilen auf Biegedrillknicken zu überprüfen, da Schubmittelpunkt und Schwerpunkt nicht zusammenfallen.

Punktsymmetrische Querschnitte (Z-Profile, Kreuzprofile etc)

Drillknicken ist im Allgemeinen der kritische Knickmodus.

5.3.2 Plattenbeulen

Plattenbeulen wird bei Querschnitten der Klasse 4 durch eine wirksame Querschnittsfläche berücksichtigt. Es ist zu beachten, dass das Zusatzmoment aus der Exzentrizität der Nulllinienlage des wirksamen Querschnitts gegenüber dem Bruttoquerschnitt asymmetrischer Querschnitte der Klasse 4 entsprechend Abschnitt 5.5 zu berücksichtigen ist.

5.3.3 Biegeknicken

Die Tragfähigkeit bei Biegeknicken ergibt sich aus:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 und 3} \quad (5.2a)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (5.2b)$$

wobei:

A_{eff} ist der wirksame Querschnitt bei Querschnitten der Klasse 4,

A ist der Bruttoquerschnitt,

χ ist der Abminderungsbeiwert, der das Knicken berücksichtigt; er berechnet sich aus:

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (5.3)$$

mit:

$$\varphi = 0,5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) \quad (5.4)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2, 3} \quad (5.5a)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E} \frac{A_{\text{eff}}}{A}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (5.5b)$$

hierin ist:

- α der Imperfektionsbeiwert gemäß Definition in Tabelle 5.1
- N_{cr} die elastische Knicklast für die betrachtete Versagensform, bezogen auf die Bruttoquerschnittswerte
- $\bar{\lambda}_0$ die dimensionslose Grenzschlankheit gemäß Definition in Tabelle 5.1
- L_{cr} die Knicklänge in der betrachteten Knickebene, ermittelt unter Berücksichtigung der Randbedingungen
- i der Trägheitsradius um die maßgebende Achse, ermittelt in Bezug auf den Bruttoquerschnitt

In Abbildung 5.1 sind die Knickspannungslinien dargestellt. Die Werte für α und $\bar{\lambda}_0$ in Tabelle 5.1 gelten nicht für Hohlprofile, die nach der Fertigung lösungsgeglüht werden. Bei dimensionslosen Schlankheiten $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$ oder bei $\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{cr}}} \leq \bar{\lambda}_0^2$ dürfen Stabilitätseffekte vernachlässigt werden und es sind nur Querschnittsnachweise erforderlich.

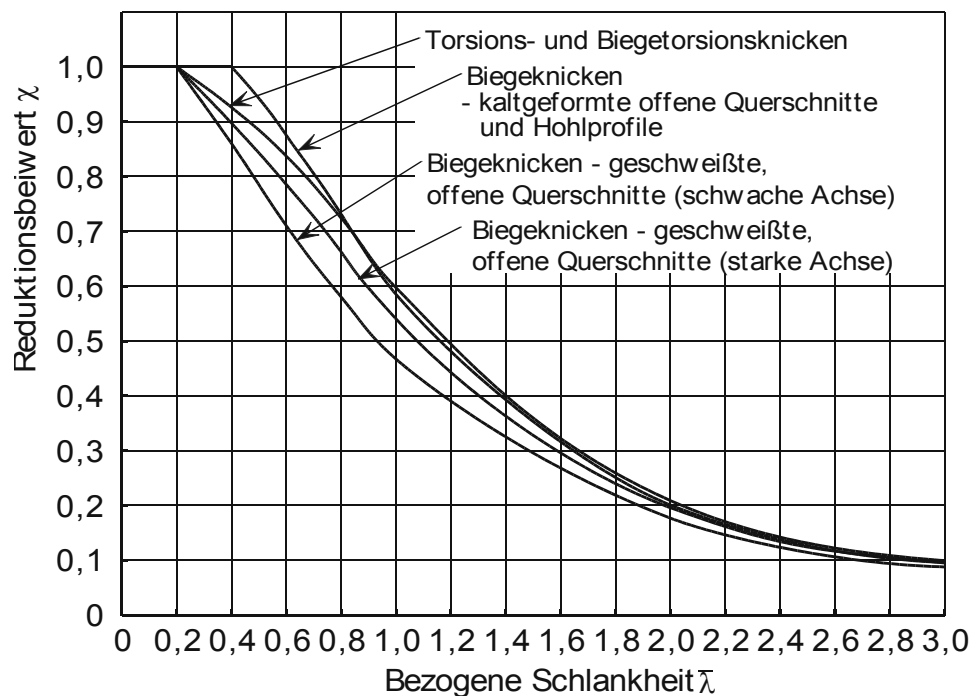


Abbildung 5.1 Knickspannungslinien für Biegeknicke, Drill- und Biegedrillknicke

Die Ermittlung der Knicklänge sollte auf der Grundlage strukturmechanischer Prinzipien erfolgen, unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen.

Tabelle 5.1 Werte für α und $\bar{\lambda}_0$ für Biegeknicken, Drill- und Biegedrillknicken

Knickmodus	Art des Bauteils	α	$\bar{\lambda}_0$
Biegeknicken	Kaltgeformte, offene Querschnitte	0,49	0,40
	Hohlprofile (geschweißt und schweißnahtfrei)	0,49	0,40
	Geschweißte offene Profile (starke Achse)	0,49	0,20
	Geschweißte offene Profile (schwache Achse)	0,76	0,20
Drill- und Biegedrillknicken	Alle Bauteile	0,34	0,20

5.3.4 Drill- und Biegedrillknicken

Die Tragfähigkeit zu diesen Knickmoden ist gemäß Abschnitt 5.3.3 zu bestimmen, indem entsprechend der Gleichungen 5.6 und 5.7 $\bar{\lambda}$ durch $\bar{\lambda}_T$ ersetzt wird und für $\alpha = 0,34$ und $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ angesetzt wird.

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \text{ bei Querschnitten der Klasse 1, 2 und 3} \quad (5.6a)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \text{ bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (5.6b)$$

hierin ist:

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \text{ und } N_{cr} < N_{cr,T}$$

mit:

$N_{cr,T}$ ist die ideal-elastische Drillknickkraft

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} \right) \quad (5.7a)$$

$N_{cr,TF}$ ist die ideal-elastische Biegedrillknickkraft.

Für Querschnitte, die symmetrisch bezogen auf die y-y-Achse sind (z.B. $z_o = 0$), gilt:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left(\frac{y_o}{i_o} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (5.7b)$$

wobei:

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2$$

i_y und i_z sind die Trägheitsradien des Bruttoquerschnitts um die y- bzw. die z-Achse

y_o und z_o sind die Koordinaten des Schubmittelpunktes bezogen auf den Bruttoquerschnitt

G ist der Schubmodul

l_T ist die Knicklänge des Bauteils für Torsionsknicken (siehe EN 1993-1-3)

I_T ist das Torsionsträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts

I_w das Wölbträgheitsmoment des Bruttoquerschnitts

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_o}{i_o} \right)^2$$

$N_{cr,y}$ und $N_{cr,z}$ sind die ideal-elastischen Normalkräfte für Biegeknicken um die y-y- bzw. die z-z-Achse.

Bei doppeltsymmetrischen Querschnitten fällt der Schubmittelpunkt mit dem Schwerpunkt zusammen, daher sind $y_o = 0$ und $z_o = 0$ und

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T}, \text{ vorausgesetzt dass } N_{cr,T} < N_{cr,y} \text{ und } N_{cr,T} < N_{cr,z}.$$

Es ist zu beachten, dass für Winkelprofile anstelle der y- und z- Achsen in den obigen Formulierungen die u- und v- Achsen gelten.

5.4 Biegebeanspruchung von Bauteilen

5.4.1 Allgemeines

Ein Bauteil befindet sich bei Beanspruchung normal zur Längsachse unter einfacher Biegung, wenn es so gelagert ist, dass keine Verwölbungen, Zug- oder Druckendlasten entstehen.

Folgende Kriterien sollten bei der Ermittlung der Momententragfähigkeit eines Trägers beachtet werden:

- Fließen des Querschnitts (siehe Abschnitt 4.7)
- Plattenbeulen (nur bei Querschnitten der Klasse 4 - siehe Abschnitt 4.7)
- Biegedrillknicken (siehe Abschnitt 5.4.2)
- Schubbeulen (siehe Abschnitt 5.4.3)
- Lokale Festigkeiten an Leisteinleitungs- und Auflagerpunkten.

Bei biegeknickgefährdeten Bauteilen sind mittragende Breiten und Flanschverdrehungen bei der Bemessung zu berücksichtigen, siehe Abschnitt 4.4.2 und Abschnitt 4.4.3.

Bei zweiachsiger Biegung ist wie in Abschnitt 5.5.2 beschrieben fortzufahren.

5.4.2 Biegedrillknicken

Biegedrillknicken kann in den folgenden Fällen ausgeschlossen werden:

- Biegebeanspruchung von Trägern um die schwache Achse,
- über die Bauteillänge seitlich gestützte Träger
- Träger mit einem bezogenen dimensionslosen Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken $\bar{\lambda}_{LT}$ (siehe unten) $\leq 0,4$ bzw. für $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$.

In allen anderen Bauteilklassen ist die Tragfähigkeit bei Biegedrillknicken folgendermaßen zu bestimmen:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1} \quad (5.8)$$

hierin ist:

$W_y = W_{pl,y}$ für Querschnitte der Klasse 1 oder 2

$W_y = W_{el,y}$ für Querschnitte der Klasse 3

$W_y = W_{eff,y}$ für Querschnitte der Klasse 4

χ_{LT} Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken, der sich bestimmt aus:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (5.9)$$

mit:

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (5.10)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (5.11)$$

α_{LT} Imperfektionsbeiwert

= 0,34 bei kaltgeformten Querschnitten und Hohlprofilen (geschweißt und nahtlos)

= 0,76 bei geschweißten offenen Querschnitten und anderen Querschnitten, für die keine Versuchsdaten verfügbar sind

M_{cr} das ideal-elastische Biegemoment für Biegedrillknicken (Anhang B).

Es ist beachten, dass bei Winkelprofilen anstelle der oben verwendeten y- und z-Achse die Bezeichnungen der u- und v-Achse gelten.

Abbildung 5.2 zeigt die Knickspannungslinien für Biegedrillknicken.

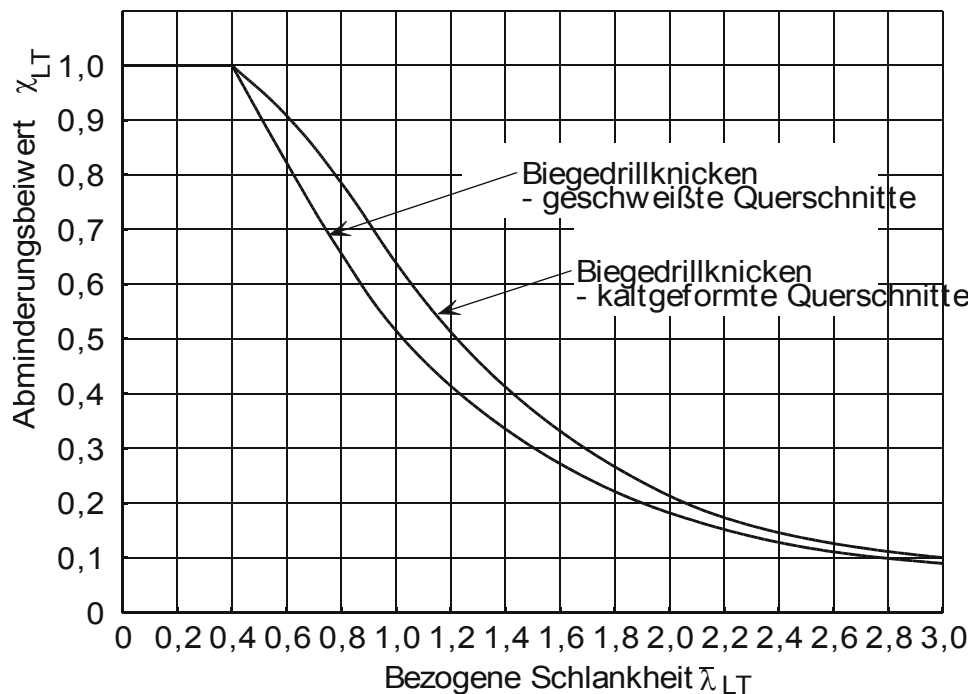


Abbildung 5.3 Knickspannungslinien für Biegedrillknicken

5.4.3 Schubtragfähigkeit

Die Schubtragfähigkeit wird entweder durch die plastische Schubtragfähigkeit oder die Schubbeultragfähigkeit (siehe Kapitel 4.7.5) bestimmt.

Schubbeulen muss nur dann nachgewiesen werden, wenn $h_w/t \geq 52\varepsilon/\eta$ bei nicht aussteiften Stegen bzw. $h_w/t \geq 23\varepsilon\sqrt{k_\tau}/\eta$ bei aussteiften Stegen erfüllt ist.

Die Schubbeultragfähigkeit für einen Träger ist folgendermaßen zu bestimmen:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.12a)$$

hierin wird der Beitrag des Steges erfasst durch:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.12b)$$

wobei:

- h_w die lichte Höhe zwischen den Flanschen (Abbildung 5.3),
- ε gemäß 0
- k_τ der Beiwert für das Schubbeulen
- $V_{bw,Rd}$ der Beitrag des Steges zur Schubbeultragfähigkeit,
- $V_{bf,Rd}$ der Beitrag der Flansche zur Schubbeultragfähigkeit,
- f_{yw} die charakteristische Streckgrenze des Steges,
- η siehe EN 1993-1-5 (in EN 1993-1-4 wird der Wert $\eta = 1,20$ angegeben.)

Anmerkung: Der gleiche Wert für η , der für die Ermittlung der Tragfähigkeit gegen Schubbeulen verwendet wird, sollte auch zur Ermittlung der plastischen Schubtragfähigkeit verwendet werden.

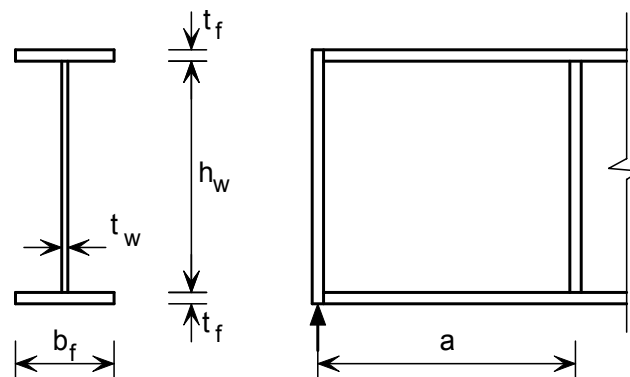


Abbildung 5.3 Definition der geometrischen Bezeichnungen

Bei Stegen mit Quersteifen am Auflager und bei Stegen mit Zwischenquer- und/oder Längssteifen ergibt sich der Stegbeitrag χ_w zu:

$$\chi_w = \eta \quad \text{für } \bar{\lambda}_w \leq 0,60/\eta \quad (5.13a)$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^2} \quad \text{für } \bar{\lambda}_w > 0,60/\eta \quad (5.13b)$$

Bei Stegen mit Quersteife nur am Auflager, kann der dimensionslose Schlankheitsparameter $\bar{\lambda}_w$ berechnet werden mit:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) \quad (5.14)$$

Bei Stegen mit Quersteifen am Auflager und Zwischenquersteifen und/oder Längssteifen ist $\bar{\lambda}_w$ anzunehmen mit:

$$\bar{\lambda}_w = \left(\frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) \quad (5.15)$$

wobei k_τ den kleinsten Schubbeulkoeffizienten des Stegblechs darstellt. Für Stege mit starren Quersteifen und ohne Längssteifen oder mit mehr als zwei Längssteifen kann k_τ wie folgt ermittelt werden:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{falls } a/h_w \geq 1 \quad (5.16a)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{falls } a/h_w < 1 \quad (5.16b)$$

hierin ist:

$$k_{\tau st} = 9(h_w/a)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right)^3} \quad \text{jedoch nicht kleiner als } \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}}$$

mit:

a der Abstand zwischen den Mittellinien der Quersteifen ist, siehe Abbildung 5.3.

I_{sl} das Flächenträgheitsmoment der Längssteife um die z-Achse ist.

Gleichung 5.16 gilt auch für Bleche mit einer oder zwei Längssteifen, falls das Seitenverhältnis $a/h_w \geq 3$ ist. Für Bleche mit einer oder zwei Längssteifen und einem Seitenverhältnis $a/h_w < 3$, wird auf EN 1993-1-5 Anhang A3 verwiesen.

Aus Vereinfachungsgründen darf der Beitrag der Flansche χ_f vernachlässigt werden. Wenn jedoch Beanspruchbarkeit des Flansches durch das Biegemoment nicht vollständig ausgenutzt wird ($M_{Ed} < M_{f,Rd}$), kann der Beitrag der Flansche wie folgt ermittelt werden:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left[\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right]^2 \right] \quad (5.17)$$

mit:

b_f und t_f für den Flansch, der die geringste Axialbeanspruchbarkeit aufweist, wobei b_f nicht größer als $15 \varepsilon t_f$ auf jeder Seite des Steges angesetzt wird

$M_{f,Rd}$ das Grenzbiegemoment des nur aus den wirksamen Flanschabschnitten zusammengesetzten Querschnitts

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}}$$

$$c = a \left(0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right) \quad \text{und} \quad \frac{c}{a} \leq 0,65$$

f_{yf} die charakteristische Streckgrenze des Flansches.

Wird zugleich eine Axiallast N_{Ed} aufgebracht, so ist der Wert für $M_{f,Rd}$ mit folgendem Term abzumindern:

$$\left[1 - \frac{N_{Ed}}{\frac{(A_{f1} + A_{f2})f_{yf}}{\gamma_{M0}}} \right] \quad (5.18)$$

Hierin sind A_{f1} und A_{f2} die Flächen des oberen bzw. unteren Flansches.

Der Nachweis sollte folgendermaßen durchgeführt werden:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.19)$$

mit:

V_{Ed} die Bemessungsquerkraft einschließlich Schub aus Torsion.

Der Bauteilnachweis bei zweiachsiger Biegung und axialem Druck sollte folgendermaßen durchgeführt werden:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (5.20)$$

wobei:

A_{eff} der wirksame Querschnitt (Abschnitt 4.4.1)

$e_{y,N}$ die Verschiebung der Nulllinienlage in Bezug auf die-y-Achse (Abschnitt 4.4.1)

$e_{z,N}$ die Verschiebung der Nulllinienlage in Bezug auf die-z-Achse (Abschnitt 4.4.1)

$M_{y,Ed}$ das Bemessungsbiegemoment um die y-Achse

$M_{z,Ed}$ das Bemessungsbiegemoment um die z-Achse

N_{Ed} die Bemessungsnormalkraft

$W_{y,eff}$ das wirksame Widerstandsmoment um die y-Achse (Abschnitt 4.4.1)

$W_{z,eff}$ das wirksame Widerstandsmoment um die z-Achse (Abschnitt 4.4.1).

Die Einwirkungen M_{Ed} und N_{Ed} sollten gegebenenfalls globale Einflüsse aus Theorie II. Ordnung berücksichtigen. Der Plattenbeulnachweis für das Stegblech sollte für resultierende Spannungen in einem Abstand, der dem kleineren Wert aus 0,4a und 0,5b entspricht, ausgehend von dem Stegblechrand, wo die Spannungen am größten sind, durchgeführt werden.

Unter der Voraussetzung, dass $\bar{\eta}_3$ (siehe unten) nicht größer ist als 0,5 ist, braucht die Bemessungstragfähigkeit für die Kombination von Biegemoment und Normalkraft bei Querkraftbeanspruchung nicht abgemindert zu werden. Ist $\bar{\eta}_3$

größer als 0,5, dann sollte die Kombination aus Biegung und Querkraft im Stegblech eines I- oder Kastenträgers der folgenden Bedingung genügen:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{für} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (5.21)$$

wobei:

$M_{f,Rd}$ das plastische Grenzbiegemoment des nur aus den wirksamen Flanschabschnitten zusammengesetzten Querschnitts

$M_{pl,Rd}$ das plastische Grenzbiegemoment des aus den wirksamen Flanschabschnitten und dem, ungeachtet dessen Querschnittsklasse, vollständig wirksamen Steg zusammengesetzten Querschnitts.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad (5.22)$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad (5.23)$$

Spannungen sind mit positivem Vorzeichen einzusetzen. M_{Ed} und V_{Ed} sollten gegebenenfalls Einflüsse aus Theorie II. Ordnung einschließen.

Das Kriterium in Gleichung 5.21 sollte an jedem Querschnitt erfüllt sein, braucht aber bis zu einem Abstand von $h_w/2$ von einem querausgesteiften Auflager nicht nachgewiesen zu werden.

Wird eine Normalkraft N_{Ed} aufgebracht, so ist $M_{pl,Rd}$ durch den abgeminderten plastischen Momentenwiderstand $M_{N,Rd}$ entsprechend Abschnitt 6.2.9 von EN 1993-1-1 zu ersetzen, und $M_{f,Rd}$ ist gemäß Gleichung 5.18 abzumindern. Es wird auf EN 1993-1-5 verwiesen, wenn die Axiallast so groß ist, dass sich der gesamte Steg unter Druckbeanspruchung befindet.

5.4.4 Stegfließen, Krüppeln und Beulen

Bei seitlich gehaltenen Flanschen bestimmt sich die Tragfähigkeit eines nicht ausgesteiften Steges bei Beanspruchung durch Einzellasten bzw. resultierender Lagerreaktionen aus einem der drei möglichen Versagensformen:

- Plastisches Fließen des Steges in unmittelbarer Flanschnähe, in Verbindung mit plastischen Verformungen des Flansches,
- Krüppeln als lokale Beulerscheinung und Fließen des Steges, in Verbindung mit plastischen Verformungen des Flansches,
- Beulen des Steges über nahezu seine gesamte Höhe.

Bei kaltgeformten Profilen kann die Vorgehensweise gemäß EN 1993-1-3 für Baustähle angewendet werden.

Bei gewalzten und geschweißten Trägern ist folgendes Näherungsverfahren auf der Grundlage der Vorgehensweise aus EN 1993-1-5 anzuwenden.

Bei unausgesteiften oder ausgesteiften Stegen sollte die Bemessungstragfähigkeit für lokales Beulen unter querwirkenden Kräften wie folgt ermittelt werden:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad (5.24)$$

mit:

t_w Stegdicke

f_{yw} Streckgrenze des Stags

L_{eff} mittragende Länge für die Tragfähigkeit gegenüber Querkraften, die wie folgt angesetzt werden sollte:

$$L_{eff} = \chi_F l_y$$

wobei:

l_y die tatsächliche Lasteinleitungslänge entsprechend der Länge des Steifenaufagers s_s

χ_F der Abminderungsbeiwert für lokales Beulen

Zusätzlich ist der Querkraftereinfluss auf die Momententragfähigkeit des Bauteils zu beachten.

Zur Bestimmung von L_{eff} ist zwischen drei Arten der Lasteinleitung zu unterscheiden:

- Kräfte, die über den Flansch eingeleitet und durch Querkraften im Steg aufgenommen werden (Abbildung 5.4a),
- Kräfte, die über einen Flansch eingeleitet und direkt durch den Steg in den gegenüberliegenden Flansch geleitet werden (Abbildung 5.4b),
- Kräfte die über einen Flansch neben einem nicht ausgesteiften Ende eingeleitet werden (Abbildung 5.4c),

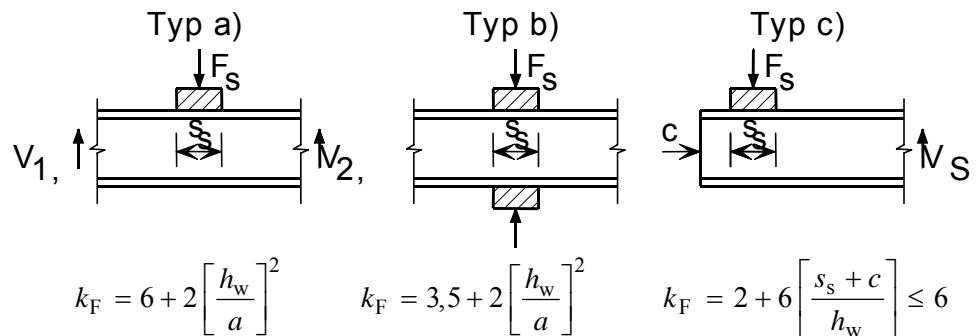


Abbildung 5.4 Beulbeiwerte für unterschiedliche Arten der Lasteinleitung in den Steg

Lasteinleitungslänge

Die Länge der Lasteinleitung s_s auf dem Flansch ist gleich dem Abstand, über den die eingetragene Last tatsächlich verteilt ist, und kann durch Ausbreitung der Last durch den Stahl unter einer Neigung von 45° bestimmt werden, siehe Abbildung 5.5. Jedoch kann s_s nicht größer als die Steghöhe h_w sein.

Liegen mehrere konzentrierte Lasten eng beieinander, so ist die Tragfähigkeit für jede einzelne Last sowie für die Gesamtlast mit s_s als dem Abstand zwischen den Mitten der äußeren Lasten zu überprüfen.

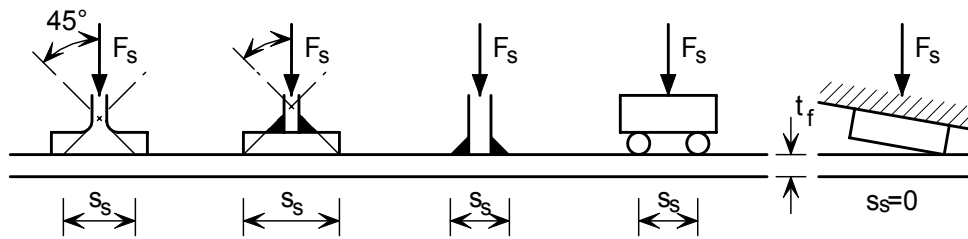


Abbildung 5.5 Lasteinleitungslänge

Mitwirkende Belastungslänge

Die mitwirkende Lastlänge l_y ist mit zwei einheitenfreien Parametern m_1 und m_2 zu berechnen, die sich folgendermaßen ergeben:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (5.25)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad (5.26a)$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (5.26b)$$

In den Fällen a) und b) in Abbildung 5.4, ergibt sich l_y mit

$$l_y = s_s + 2 t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right) \quad (5.27)$$

jedoch sollte l_y den Abstand zwischen zwei benachbarten Quersteifen nicht überschreiten.

Im Fall c) ist l_y als das Minimum der Werte aus den Gleichungen 5.28 und 5.29 zu bestimmen. Jedoch ist in Gleichung 5.30 s_s zu Null zu setzen, wenn die Konstruktion, über die die Kraft eingeleitet wird, nicht die Neigung des Trägers aufweist, siehe Abbildung 5.5.

$$l_y = l_e + t_f \left[\sqrt{\frac{m_1}{2} + \left[\frac{l_e}{t_f} \right]^2} + m_2 \right] \quad (5.28)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (5.29)$$

hier ergibt sich l_e aus:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (5.30)$$

Mitwirkende Länge der Tragfähigkeit

Die mitwirkende Länge der Tragfähigkeit ergibt sich aus:

$$L_{\text{eff}} = \chi_F l_y \quad (5.31)$$

mit

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad (5.32)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad (5.33)$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (5.34)$$

hierin ist:

k_F der Beulbeiwert der entsprechenden Art der Lasteinleitung und Lagerung (Abbildung 5.4)

Zu beachten ist, dass zur Berechnung von m_2 ein Wert für $\bar{\lambda}_F$ anzunehmen ist. Nach Berechnung des Wertes für $\bar{\lambda}_F$ ist dann gegebenenfalls der Wert von m_2 erneut zu bestimmen.

5.4.5 Quersteifen

Quersteifen an den Auflagern und an anderen Stellen externer Lasteinleitung sollten vorzugsweise beidseitig und symmetrisch zum Steg angeordnet werden. Diese Steifen sind auf plastisches Stauchen und Beulen nachzuweisen. Zwischensteifen, die nicht durch eine externe Last beansprucht werden, müssen hingegen nur auf Beulen nachgewiesen werden.

Der für den Beulnachweis zu verwendende wirksame Querschnitt sollte eine mittragende Stegbreite, wie in Abbildung 5.6 angezeigt, enthalten. An Bauteilenden (oder an Öffnungen im Stegblech) darf die mitwirkende Stegbreite nicht größer sein als die zur Verfügung stehende.

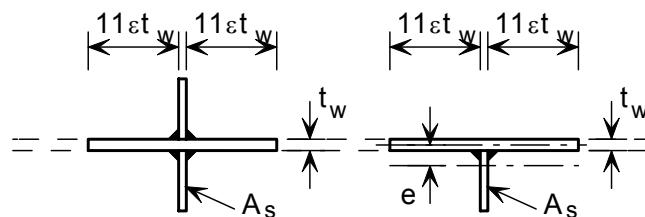


Abbildung 5.6 Wirksamer Steifenquerschnitt bei Beulen

Für Beulen aus der Ebene kann die Beultragfähigkeit $N_{b,Rd}$ der Steife entsprechend Abschnitt 5.3.3 bestimmt werden, indem $\alpha = 0,49$ und $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ angenommen werden. Die Knicklänge l der Steife sollte entsprechend der Lagerungsbedingungen angesetzt werden, jedoch nicht kleiner als $0,75h_w$ sein, was für den Fall gilt, dass beide Enden seitlich gehalten sind. Ein größerer Wert von l sollte bei ungünstigeren Lagerungsbedingungen verwendet werden. Die Torsionsknicktragfähigkeit des Kreuzstoßes sollte ebenfalls nachgewiesen werden.

Bei einseitigen Steifen oder anderen unsymmetrischen Steifen ist die sich ergebende Exzentrizität gemäß Abschnitt 5.5.2 zu berücksichtigen.

An Auflagern oder Zwischensteifen an denen erhebliche Lasten eingeleitet werden, muss die Beultragfähigkeit größer sein als die Reaktionskraft oder Last. An

anderen Zwischenstellen kann die Druckkraft in der Steife N_{Ed} folgendermaßen bestimmt werden:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.35)$$

wobei

V_{Ed} die Bemessungsquerkraft im Bauteil ist

Der obere Ausdruck ist unter der Annahme einer entfernten Steife zu berechnen.

Das Flächenträgheitsmoment I_s einer Steife hat folgendes zu erfüllen:

$$a / h_w < \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq 1,5 h_w^3 t^3 / a^2 \quad (5.36)$$

$$a / h_w \geq \sqrt{2}, \quad I_{st} \geq 0,75 h_w t^3 \quad (5.37)$$

5.4.6 Bestimmung der Verformungen

Verformungen sind für die Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu bestimmen.

Die Verformungen elastischer Träger (d.h. solche, die kein Fließgelenk enthalten) können mit den üblichen statischen Berechnungsmethoden unter Verwendung des Sekantenmoduls anstelle des Elastizitätsmoduls abgeschätzt werden. Der Sekantenmodul variiert mit dem Spannungsniveau im Träger; Anhang C enthält hierzu Bemessungswerte. Es handelt sich hierbei um eine vereinfachte Methode, die zur Abschätzung von Verformungen zu hinreichend genauen Ergebnissen führt, solange sich der Sekantenmodul auf die Maximalspannung bezieht und diese nicht größer als 65% der 0,2%-Streckgrenze ist. Bei höheren Spannungsniveaus ist das Verfahren sehr konservativ, so dass genauere Methoden (z.B. unter Einbeziehung der vollständigen Spannungsintegration entlang der Bauteilachse) angewandt werden sollten.

Im Fall von Querschnitten der Klasse 4 und/oder Bauteilen, bei denen der Einfluss der mittragenden Breite beachtet werden muss, ist ein wirksamer Querschnitt in den Berechnungen zu verwenden. In erster Näherung reicht es aus, den wirksamen Querschnitt mit den mittragenden Breiten gemäß Abschnitt 4.4.1 und/oder Abschnitt 4.4.2 zu verwenden. Bessere Ergebnisse erzielt man bei Ansatz des wirksamen Querschnitts unter Berücksichtigung der sich im Querschnitt einstellenden Spannung, indem ε gemäß Abschnitt 4.4.1 (und nicht gemäß Abschnitt 4.4.2) bestimmt wird:

$$\varepsilon = \left[\frac{235}{\sigma} \frac{E}{210000} \right]^{1/2} \quad (5.38)$$

wobei:

σ die vorliegende Spannung im Querschnittsteil des wirksamen Querschnitts ist,

E der Elastizitätsmodul ist.

5.5 Bauteile bei Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung

5.5.1 Axialer Zug und Biegung

Die Tragfähigkeit von Zuggliedern, die unter Biegebeanspruchung stehen, sind gegen Biegedrillknicken gemäß Abschnitt 5.4.2 unter reiner Biegung zu überprüfen. Ebenso sind die Querschnittsnachweise bei kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung an den maßgebenden Bemessungsstellen zu führen. Die folgende Bedingung ist einzuhalten:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (5.39)$$

hierin ist:

- N_{Ed} der Bemessungswert der axialen Zugkraft im Bauteil an der kritischen Stelle,
- N_{Rd} der Bemessungswert der Zugtragfähigkeit des Bauteils
- $M_{y,Ed}$ der Bemessungswert des Biegemoments um die starke Achse im kritischen Schnitt
- $M_{z,Ed}$ der Bemessungswert des Biegemoments um die schwache Achse im kritischen Schnitt
- $M_{y,Rd}$ der Bemessungswert des Momentenwiderstands bezüglich der starken Achse, wenn keine Axiallasten vorliegen, einschließlich einer Abminderung aufgrund von Querkrafteinflüssen (Abschnitt 4.7.4)
- $M_{z,Rd}$ der Bemessungswert des Momentenwiderstands bezüglich der schwachen Achse, wenn keine Axiallasten vorliegen, einschließlich einer Abminderung aufgrund von Querkrafteinflüssen (Abschnitt 4.7.4)

5.5.2 Axialer Druck und Biegung

Zusätzlich zum Nachweis der ausreichenden Querschnittstragfähigkeit (siehe Abschnitt 4.7.6) über die volle Länge des Trägers und der Einhaltung allgemeiner Anforderungen an den Träger (siehe Abschnitt 5.4) sind die Interaktionseffekte aus Druckbeanspruchung und Biegebeanspruchung zu untersuchen.

Axialer Druck und Biegung um die starke Achse:

Folgende Bedingungen sind zu erfüllen,

- um vorzeitiges Knicken um die starke Achse zu verhindern:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.40)$$

- um vorzeitiges Knicken bezüglich der schwachen Achse zu verhindern (bei Bauteilen, die Biegedrillknickgefährdet sind):

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \quad (5.41)$$

Axialer Druck und Biegung bezüglich der schwachen Achse:

- um vorzeitiges Knicken bezüglich der schwachen Achse zu verhindern:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.42)$$

Axialer Druck und Doppelbiegung:

Alle Bauteile müssen folgende Bedingung zu erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.43)$$

Bauteile, die Biegedrillknickgefährdet sind, müssen zusätzlich folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left(\frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.44)$$

In obigen Beziehungen sind:

e_{Ny} und e_{Nz} die Versatzmaße der Nulllinien, für den Fall, dass der Querschnitt gleichmäßig druckbeansprucht ist

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ und $M_{z,Ed}$ die Bemessungswerte der Druckkraft und der maximalen Biegemomente um die y-y- bzw. z-z-Achse längs des Bauteils

$(N_{b,Rd})_{\min}$ das Minimum von $N_{b,Rd}$ für die folgenden vier Knickmoden: Biegeknicken um die y-Achse, Biegeknicken um die z-Achse, Drillknicken und Biegedrillknicken (siehe Abschnitte 5.3.3 und 5.3.4);

$(N_{b,Rd})_{\min 1}$ das Minimum von $N_{b,Rd}$ für die folgenden drei Knickmoden: Biegeknicken um die z-Achse, Torsionsknicken und Biegedrillknicken (siehe Abschnitte 5.3.3 und 5.3.4);

$\beta_{W,y}$ und $\beta_{W,z}$ die Werte für β_W entsprechend der y- und z-Achse, worin:

$$\begin{aligned} \beta_W &= 1 \text{ für Querschnitte der Klasse 1 oder 2 ist,} \\ &= W_{el}/W_{pl} \text{ für Querschnitte der Klasse 3 ist,} \\ &= W_{eff}/W_{pl} \text{ für Querschnitte der Klasse 4 ist.} \end{aligned}$$

$W_{pl,y}$ und $W_{pl,z}$ die plastischen Widerstandsmomente für die y- bzw. z-Achse;

$M_{b,Rd}$ die Tragfähigkeit bei Biegedrillknicken (siehe Abschnitt 5.4.2).

k_y , k_z , k_{LT} die Interaktionsbeiwerte

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{jedoch} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad \text{jedoch} \quad 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}}$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Es ist zu beachten, dass alternativ zu obigen Gleichungen im Nationalen Anhang abweichende Interaktionsformeln angegeben sein können.

Es ist zu beachten, dass bei Winkelprofilen die y- und z-Achse in obigen Beziehungen entsprechend durch die u- und v-Achsen ausgetauscht werden müssen.

6 BEMESSUNG VON VERBINDUNGEN

6.1 Allgemeine Empfehlungen

6.1.1 Dauerhaftigkeit

Zum Erhalt einer optimalen Korrosionsbeständigkeit müssen Anschlüsse sorgfältig durchkonstruiert werden.

Dies gilt insbesondere für Anschlüsse, die Witterungseinflüssen ausgesetzt sind und durch Spritzwasser, Feuchtigkeit oder Tauwasser etc. beansprucht werden. Sofern möglich, sind Verbindungen in Bereichen anzuordnen, wo nicht mit Feuchtigkeit zu rechnen ist. Dadurch können Korrosionsprobleme verringert bzw. umgangen werden. Es sollte immer beachtet werden, dass durch einfache Maßnahmen Feuchtigkeitsquellen vermieden werden können. Beispielsweise kann bereits durch ausreichende Belüftung oder die Sicherstellung einer Raumtemperatur, die oberhalb der Taupunkttemperatur liegt, die Bildung von Kondenswasser vermieden werden.

Sind dennoch der Feuchtigkeit ausgesetzte Verbindungen aus Kohlenstoffstahl in Kombination mit nichtrostendem Stahl unvermeidbar, so muss galvanische Korrosion ausgeschlossen werden, siehe Abschnitt 3.7.2. Die Verwendung von Schrauben aus Baustahl in Bauteilen aus nichtrostendem Stahl ist grundsätzlich zu vermeiden. Bei erheblicher Korrosionsneigung von geschraubten Verbindungen sind Teile aus Baustahl und aus nichtrostendem Stahl elektrisch zu isolieren. Dies erfordert den Einsatz von isolierenden Unterlegscheiben und ggf. isolierenden Hülsen; eine übliche und praxiserichte Lösung zeigt Abbildung 6.1. Bei Offshore-Anlagen werden von den Zulassungsbehörden teilweise zusätzliche Maßnahmen gefordert. Aus diesem Grund sollte der Tragwerksplaner bzw. der Konstrukteur frühzeitig mit der zuständigen Behörde Kontakt aufnehmen, damit die genauen Anforderungen berücksichtigt werden können.

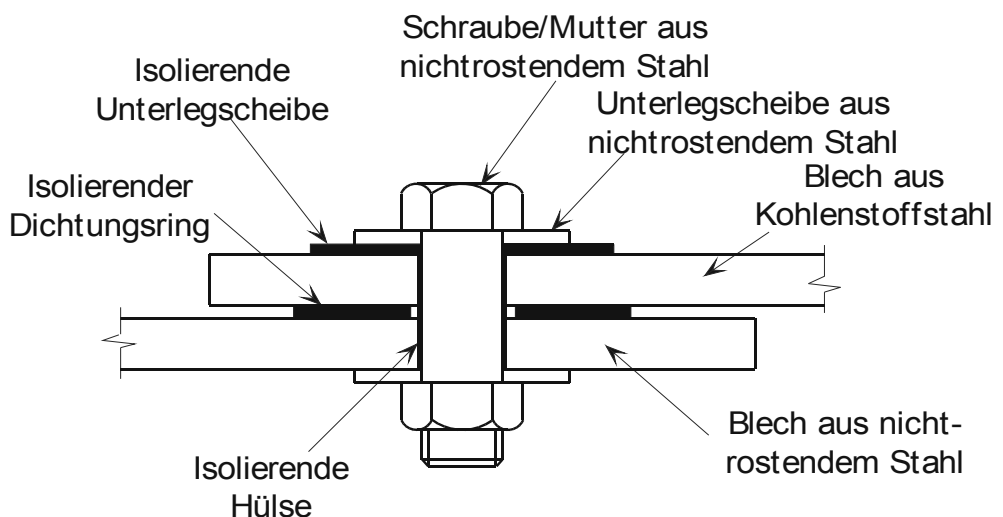


Abbildung 6.1 Gebräuchliche Detaillösung zur Verbindung ungleicher Materialien (Vermeidung von galvanischer Korrosion)

Bei geschweißten Verbindungen aus Baustahl und nichtrostendem Stahl wird im Allgemeinen empfohlen, Beschichtungen, die auf den Baustahl aufgetragen

werden, auch auf der Schweißung selbst und auf einen gewissen Bereich des nichtrostenden Stahls auszudehnen.

Bei der Wahl der für die jeweiligen Umgebungsbedingungen geeigneten Materialien ist besonders auf Spaltkorrosion in geschraubten Verbindungen zu achten (siehe Abschnitt 3.7.2).

Die schweißtypische Abfolge von Erhitzen und Erkalten beeinflusst die Mikrostruktur aller nichtrostender Stähle, wenngleich in unterschiedlichem Maße. Von besonderer Wichtigkeit ist sie bei Duplex-Stählen. Es ist notwendig, dass geeignete Schweißverfahren und Zusatzwerkstoffe angewendet werden und dass qualifizierte Schweißer die Arbeiten vornehmen. Anleitungen hierzu finden sich in Abschnitt 10.4.

6.1.2 Bemessungsannahmen

Verbindungen können so ausgelegt werden, dass die Schnittgrößen auf realistische Art und Weise abgeführt werden, unter Berücksichtigung der relativen Steifigkeiten der Anschlusskomponenten. Die Schnittgrößen müssen im Gleichgewicht zu den äußeren Kräften stehen. Jedes Element, das sich am unterstellten Lastabtrag beteiligt, sollte in der Lage sein, die in der Tragwerksanalyse unterstellten Kräfte bei den daraus resultierenden Verformungen innerhalb der Komponentenverformungskapazität aufzunehmen.

6.1.3 Schnittpunkte und Stöße

Die an einem Anschluss zusammenlaufenden Bauteile werden normalerweise so angeordnet, dass ihre Schwerachsen sich in einem Punkt schneiden. Besteht eine Ausmittigkeit in den Schnittpunkten, sind Bauteile und Verbindungen so auszulegen, dass die daraus resultierende Momente aufgenommen werden können. Im Fall von Anschlüssen mit Winkeln oder T-Profilen mit mindestens zwei Schrauben an jeder Seite kann die Versatzlinie aus dem Schraubenanschluss in den Winkeln und T-Profilen anstelle der Schwerachse zur Bestimmung der Unterschneidung im Anschlussbereich unterstellt werden.

Trägerstöße sollten vorzugsweise so nah wie möglich an den Momentennullpunkten angeordnet werden. Bei Stützenstößen ergibt sich die Beachtung der Zusatzmomente gemäß Theorie 2. Ordnung ($P-\delta$ Effekte).

6.1.4 Weitere allgemeine Betrachtungen

Wird eine Verbindung stoßartig, dynamisch oder häufig auf einem bestimmten Spannungsniveau beansprucht, so ist Schweißen die bevorzugte Verbindungstechnik. Die Verbindungen sollten auf ihre Ermüdungsfestigkeit hin überprüft werden (siehe Kapitel 8).

Leichte Verarbeitung und Montage sind beim Entwurf von Verbindungen und Stößen zu beachtende Aspekte. Es ist zu achten auf:

- die Verwendung standardisierter Details,
- die Toleranzen für eine sichere Montage,
- die Aussparungen, um die Befestigungsmittel anzuziehen,
- die Zugänglichkeit beim Schweißen,
- die Anforderungen an das Schweißverfahren,
- die Auswirkungen der Winkel- und Längentoleranzen bei der Montage.

Es ist anzumerken, dass bei austenitischen Stählen größere Schweißverwerfungen auftreten als bei Baustählen (siehe Abschnitt 10.4.4). Auf die Anforderungen bei späteren Inspizierungen und Wartung ist ebenso zu achten.

6.2 Geschraubte Verbindungen

6.2.1 Allgemeines

Die Empfehlungen in diesem Kapitel beziehen sich auf Verbindungen mit Schrauben in Schraublöchern, wo Schub, Zug oder eine kombinierte Beanspruchung aus Schub und Zug auftritt. Es ist allgemeiner Standard, unter Schraubenköpfen und Muttern Unterlegscheiben vorzusehen. Hinweise zu geeigneten Werkstoffen für Schrauben und Muttern befinden sich in Abschnitt 3.1.2 und Abschnitt 10.5.

Schubkräfte werden über Lochleibung zwischen den Schrauben und den angeschlossenen Teilen übertragen. Es gibt keine Empfehlungen für Verbindungen in denen der Schub durch Reibung übertragen wird, siehe jedoch auch Abschnitt 6.2.2.

Die Festigkeit einer Verbindung ist als die minimale Festigkeit der angeschlossenen Teile (siehe Abschnitt 6.2.3) und der Verbindungsmittel (siehe Abschnitt 6.2.4) anzunehmen.

6.2.2 Vorgespannte Schrauben

Schrauben aus nichtrostendem Stahl können als vorgespannte Schrauben verwendet werden, vorausgesetzt, dass geeignete Vorspannverfahren zur Anwendung kommen. Werden Schrauben aus nichtrostendem Stahl stark angedreht, können sich Fresserscheinungen als problematisch erweisen. Wird Vorspannung eingetragen, muss der zeitabhängigen Spannungs-Relaxation Rechnung getragen werden. Verbindungen sind nicht so zu entwerfen, dass sie weder bei Gebrauchstauglichkeit noch bei Grenztragfähigkeit als schlupffrei bemessen werden, es sei denn, ihre Eignung kann experimentell nachgewiesen werden.

6.2.3 Angeschlossene Elemente

Löcher

Löcher können durch Bohren oder Stanzen erzeugt werden. Jedoch kann infolge der Kaltverfestigung in Verbindung mit dem Stanzvorgang die Anfälligkeit gegen Korrosion erhöht werden, weswegen gestanzte Löcher unter aggressiven atmosphärischen Bedingungen weniger geeignet sind (z.B. in Industrielatmosphäre oder Meeresnähe).

Die maximalen Lochspiele in Standardlöchern betragen:

- 1 mm für M12 und M14 Schrauben (M14 ist nicht standardisiert)
- 2 mm für M16 bis M24 Schrauben
- 3 mm für M27 und größere Schrauben

Anordnung der Löcher

Der Randabstand rechtwinklig zur Spannungsrichtung ist als der Abstand zwischen Lochmitte und der benachbarten Kante des angeschlossenen Teils definiert; der Randabstand parallel zur Spannung (Endabstand) ist ähnlich definiert, nur eben in Richtung der Spannung.

Der minimale Wert für den Endabstand e_1 oder der des Randabstands e_2 , (siehe Abbildung 6.2) beträgt $1,2d_0$, wobei d_0 der Lochdurchmesser ist. Es ist zu beachten, dass der Endabstand größer sein kann, damit ein ausreichender Lochleibungswiderstand gewährleistet werden kann, siehe unten.

Der Höchstwert für den End- oder Randabstand ist auf $4t + 40$ mm zu beschränken, wobei t die Blechdicke (in mm) der dünneren Außenlage ist.

Der minimale Mittenabstand beträgt $2,2d_0$ in Spannungsrichtung p_1 (siehe Abbildung 6.2). Der entsprechende Minimalabstand p_2 senkrecht zur Spannungsrichtung beträgt $2,4d_0$.

Der Maximalabstand der Schrauben ist für jede Richtung so zu wählen, dass auch lokalen Instabilitäten der Lagen Rechnung getragen wird, siehe EN 1993-1-8.

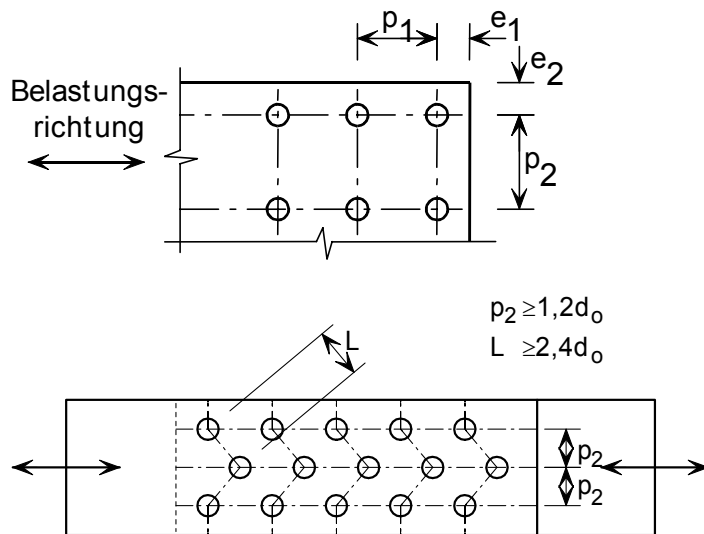


Abbildung 6.2 Abstandsbezeichnungen der Löcher

Bei versetzten Schraubenreihen darf der Achsabstand $p_2=1,2d_0$ betragen, wenn der Abstand L zwischen je zwei Schrauben bei versetzten Schraubenreihen mindestens $2,4d_0$ beträgt, siehe Abbildung 6.2.

Beanspruchbarkeit auf Lochleibung

Die Tragfähigkeit einer Schraubenverbindung aus nichtrostendem Stahl wird üblicherweise durch Gebrauchstauglichkeitskriterien bestimmt, durch die die Lochaufweitung unter Gebrauchslasten begrenzt ist. Um einen separaten Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu vermeiden, wird ein Grenzwert für die Lochaufweitung im Grenzzustand der Tragfähigkeit definiert durch Ansatz eines verminderten Wertes der Zugfestigkeit $f_{u,red}$ mit:

$$f_{u,red} = 0.5f_y + 0.6f_u \text{ jedoch } \leq f_u \quad (6.1)$$

Der Wert $F_{b,Rd}$ ist gegeben durch:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{u,red} d t}{\gamma_{M2}} \quad (6.2)$$

Wobei α_b der kleinste Wert ist von:

- α_d
- $f_{ub} / f_{u,red}$
- 1.0

wobei:

d der Schraubendurchmesser

t die Blechdicke

f_{ub} die charakteristische Zugfestigkeit der verbundenen Bleche (verwendet wird die Mindestzugfestigkeit nach Tabelle 3.1).

$\alpha_d = e_1 / 3d_0$ für Randschrauben in Beanspruchungsrichtung

$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ für innenliegende Schrauben in Beanspruchungsrichtung

k_1 der kleinere Wert aus $2,8 \frac{e_2}{d_o} - 1,7$ und 2,5 für Randschrauben senkrecht zur Beanspruchungsrichtung

k_1 der kleinere Wert aus $1,4 \frac{p_2}{d_o} - 1,7$ und 2,5 für innenliegende Schrauben senkrecht zur Beanspruchungsrichtung

Im Falle einfacher Überlappungen mit nur einer Schraubenreihe sind die Schrauben sowohl unter dem Schraubenkopf als auch unter der Mutter mit Unterlegscheiben zu versehen und die Beanspruchbarkeit gegen Lochleibung sollte wie folgt begrenzt werden:

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 f_{u,red} d t}{\gamma_{M2}} \quad (6.3)$$

Die Beanspruchbarkeit einer Schraubengruppe kann als die Summe der Lochleibungswiderstände $F_{b,Rd}$ der einzelnen Schrauben bestimmt werden, vorausgesetzt, dass der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit gegen Abscheren größer oder gleich dem Bemessungswert der Beanspruchbarkeit gegen Lochleibung $F_{b,Rd}$ ist. Sonst ist die Beanspruchbarkeit einer Gruppe von Schrauben zu bestimmen, indem die kleinste Beanspruchbarkeit eines einzelnen Verbindungsmittels mit der Anzahl der Befestigungsmittel multipliziert wird.

Beanspruchbarkeit auf Zug

Die Tragfähigkeit des angeschlossenen Teils auf Zug entspricht dem kleineren Wert von:

a) dem plastischen Widerstand des Bruttoquerschnitts

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

b) der Grenztragfähigkeit des Nettoquerschnitts an den Löchern für die Verbindungselemente

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.5)$$

wobei die Definitionen der Terme in Abschnitt 4.7.2 angegeben werden.

Es ist zu beachten, dass die Gleichungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit des Nettoquerschnitts in einer Scherfuge nur dann anzuwenden sind, wenn Unterlegscheiben jeweils unter Schraubenkopf und Mutter angeordnet sind.

Ist duktiler Verhalten erforderlich, so muss der plastische Widerstand des Bruttoquerschnitts kleiner als die Grenztragfähigkeit des Nettoquerschnitts sein. Anforderungen an Duktilität und Rotationskapazität sind in EN 1993-1-8 gegeben. Bemessungskriterien für Erdbeben enthält EN 1998.

Bemessung gegen Ausknöpfen

Es gelten die Hinweise von EN 1993-1-8.

Einschenkliche Anschlüsse von Winkelprofilen und andere unsymmetrisch angeschlossenen Bauteile auf Zug

Die Exzentrizität der Befestigungsmittel in Endverbindungen und die Auswirkung des Abstands und des Randabstands der Schrauben ist bei der Bestimmung des Bemessungswiderstands unsymmetrischer Bauteile genauso zu berücksichtigen wie bei symmetrischen Bauteilen, die unsymmetrisch angeschlossen werden so wie einschenkliche Anschlüsse bei Winkelprofilen.

Winkel, die mit einer einzelnen Schraubenreihe an einem Schenkel angeschlossen werden, können als zentrisch beansprucht angesehen werden, und der Bemessungswert der Grenzbeanspruchung des Nettoquerschnitts bestimmt sich mit:

$$\text{Bei 1 Schraube gilt: } N_{u,Rd} = \frac{2,0(e_2 - 0,5d_0)t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.6)$$

$$\text{Bei 2 Schrauben gilt: } N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

$$\text{Bei drei oder mehr Schrauben gilt: } N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.8)$$

wobei:

β_2 und β_3 jeweils ein Abminderungsbeiwert abhängig vom Maß p_1 aus Tabelle 6.1 ist. Bei Zwischenwerten für p_1 kann der Wert β durch lineare Interpolation bestimmt werden.

A_{net} der Nettoquerschnitt des Winkels ist. Bei ungleichschenkligen Winkeln, die am kürzeren Schenkel angeschlossen werden, ist A_{net} gleich dem Nettoquerschnitt eines entsprechend gleichschenkligen Winkels jeweils mit Schenkellängen, die der des kürzeren Schenkels entsprechen.

Tabelle 6.1 Abminderungsbeiwerte β_2 und β_3

Verbindung	Beiwert	Abstand p_1	
		$\leq 2,5d_0$	$\geq 5,0d_0$
2 Schrauben	β_2	0,4	0,7
3 Schrauben und mehr	β_3	0,5	0,7

6.2.4 Verbindungselemente

Nettoflächen

Die Schraubenfläche, die bei den Berechnungen zugrunde gelegt wird, entspricht der Zugspannungsfläche, wie auch in der entsprechenden Produktnorm festgelegt.

Bei Schrauben auf Abscheren, kann der größere Schaftdurchmesser verwendet werden, wenn gewährleistet werden kann, dass das Gewinde nicht in der Scherfuge liegt; es ist die Möglichkeit zu beachten, dass Schrauben von beiden Seiten eingesetzt werden können. Kann keine Sicherheit hierfür gegeben werden, ist der Spannungsquerschnitt zu verwenden.

Schertragfähigkeit

Die Schertragfähigkeit einer Schraubenverbindung hängt von der Anzahl der Scherflächen und ihrer Positionen entlang der Schraubenachse ab. Bei Ausbleiben von planmäßigem Zug kann für jede Scherfläche die Tragfähigkeit bestimmt werden mit:

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (6.9)$$

wobei:

A Bruttoquerschnittsfläche der Schraube (falls die Scherfuge im Schraubenschaft liegt) bzw. Spannungsquerschnitt der Schraube (falls die Scherfuge im Schraubengewinde liegt)

f_{ub} Zugfestigkeit der Schraube

Der Wert für α kann im Nationalen Anhang festgelegt sein. Die empfohlenen Werte sind:

- falls die Scherfuge im Schraubenschaft liegt, $\alpha = 0,6$

- falls die Scherfuge im Schraubengewinde liegt, $\alpha = 0,5$.

Zugtragfähigkeit

Die Zugtragfähigkeit einer Schraube $F_{t,Rd}$ ergibt sich mit:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.10)$$

wobei:

$k_2 = 0,63$ für Senkkopfschrauben ist, andernfalls ist $k_2 = 0,9$.

Sind Befestigungsmittel zur Aufnahme von Zugkräften erforderlich, sind diese so zu auszulegen, dass auch Abstützkräfte abgetragen werden können, wenn dies

erforderlich ist. Hinweise zur Berücksichtigung von Abstützkräften befinden sich in EN 1993-1-8.

Kombination aus Abscheren und Zug

Wird eine Schraube gleichzeitig durch eine Schubkraft $F_{v,Ed}$ und eine Zugkraft (einschließlich aller Abstützeffekte) $F_{t,Ed}$ beansprucht, so ist die Interaktion zu berücksichtigen. Dem kann Rechnung getragen werden, indem nachstehende Beziehung eingehalten wird:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.10)$$

Hierin sind $F_{v,Rd}$ und $F_{t,Rd}$ wie oben zu bestimmen. Es ist zu beachten, dass die Bemessungskraft (einschließlich der Abstützkräfte) kleiner sein muss als die Zugtragfähigkeit.

Lange Anschlüsse und große Klemmlängen

Bei Stößen von unüblicher Länge (von etwa 500 mm oder von 15 Schraubendurchmesser hintereinander) oder wenn die Klemmlänge (d.h. die Gesamtdicke aller verbundenen Lagen) größer ist als der fünffache Schraubendurchmesser, ist die Schertragfähigkeit abzumindern. Solange kein Datenmaterial für nichtrostende Stähle vorliegt, wird empfohlen auf die Regeln für Baustahl in EN 1993-1-8 zurückzugreifen.

6.3 Verbindungsmittel für dünnwandige Bauteile

Die Bemessung von Verbindungen von Profiblechen aus nichtrostendem Stahl bei Verwendung von selbstschneidenden Blechschrauben kann gemäß EN 1993-1-3 erfolgen, mit der Ausnahme, dass die Ausköpffkraft durch Versuche zu bestimmen ist. Um Fressen der Blechschraube oder Gewindabstreifen zu vermeiden, sollte die Fähigkeit der Schraube zum Einschrauben und zur Gewindeausbildung in nichtrostendem Stahl durch Versuche nachgewiesen werden, sofern keine ausreichende Erfahrung vorliegt. Der in Gleichung 6.1 angegebene abgeminderte Wert für die Zugfestigkeit $f_{u,red}$ sollte anstelle von f_u angesetzt werden.

6.4 Geschweißte Verbindungen

6.4.1 Allgemeines

Es ist unerlässlich, dass Schweißnähte durch qualifizierte Schweißer mit dem geeigneten Verfahren hergestellt werden, einschließlich kompatibler Zusatzwerkstoffe (siehe Abschnitt 10.4). Es ist nicht nur wichtig, die Festigkeit der Schweißnaht zu gewährleisten, sondern auch ihre Korrosionsbeständigkeit und die des umgebenden Materials.

Die folgenden Empfehlungen gelten für vollständig und teilweise durchgeschweißte Nähte sowie für Kehlnähte, die durch Lichtbogenschweißen hergestellt werden, so wie:

Verfahrens- bezeichnung	Verfahrens- bezeichnung
111	Metalllichtbogenschweißen mit abgedeckter Elektrode (Metalllichtbogenhandschweißen)

121	Unterpulverschweißen mit Drahtelektrode
122	Unterpulverschweißen mit Streifenelektrode
131	Metallinertgasschweißen (MIG)
135	Metall-Lichtbogen-Aktivgasschweißen (MAG)
137	Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode unter inertem Schutzgas
141	Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)
15	Plasmaschweißen

(Die Ordnungsziffern der Schweißverfahren entsprechen denen in EN ISO 4063.)

Kompatible Schweißzusatzwerkstoffe sind so zu verwenden, dass Streckgrenze und Zugfestigkeit der Schweißnaht über der des Grundmaterials liegen. (Für Schweißzusätze, die diese Bedingung nicht erfüllen siehe Abschnitt 6.4.4.) Tabelle 6.2 gibt geeignete Schweißzusatzwerkstoffe für unterschiedliche Stahlsorten an, und Tabelle 6.3 enthält die mechanischen Eigenschaften dieser Schweißzusätze.

Tabelle 6.2 Kompatible Stahlsorten und Schweißzusätze

Grundmaterial Stahlsorte	Schweißzusatz		
	Umhüllte Elektroden EN 1600	Drähte und Stäbe EN 12072	Fülldrahtelektroden EN 12073
1.4301	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4306	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4307	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4318	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4541	E 19 9 Nb	G 19 9 Nb	T 19 9 Nb
1.4401	E 19 12 2	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
1.4404	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
1.4571	E 19 12 3 Nb	G 19 12 3 Nb	T 19 12 3 Nb
1.4362	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
1.4462	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L

Tabelle 6.3 Mechanische Eigenschaften des Schweißzusatzes gemäß EN 1600, EN 12072 und EN 12073

Schweißzusatz	Mindestdehngrenze N/mm ²	Mindestzugfestigkeit N/mm ²
E 19 9	350	550
E/G/T 19 9 L	320	510
E/G/T 19 9 Nb	350	550
E 19 12 2	350	550
E/G/T 19 12 3 L	320	510
E/G/T 19 12 3 Nb	350	550
E 25 7 2 N L	500	700
G 25 7 2 L	500	700
T 22 9 3 N L	450	550

Es ist zu bemerken, dass besondere Betrachtungen angestellt werden müssen, wenn die aus Versuchen abgeleitete 0,2%-Dehngrenze als Bemessungsgrundlage dienen soll (d.h. Bemessung gemäß 3.2.4(ii)). Hersteller von nichtrostenden Stählen und Schweißzusatzwerkstoffen können bei der Auswahl geeigneter Elektroden

behilflich sein. Der Schweißwerkstoff sollte mindestens genauso edel sein wie das Grundmaterial.

Um die Möglichkeit von Korrosionserscheinungen zu verringern, sind unterbrochene Kehlnähte und unterbrochene, teildurchgeschweißte Nähte nach Möglichkeit unter allen Umgebungsbedingungen zu vermeiden und allenfalls unter Optimalbedingungen akzeptabel. Weiterhin sind unterbrochene Schweißnähte in salzwasserhaltigen oder sehr stark verschmutzten Umgebungen möglichst zu vermeiden, besonders dann wenn strominduzierte Oberflächenzugspannungen auftreten.

6.4.2 Kehlnähte

Anwendung

Kehlnähte können zur Verbindung von Werkstücken unter Anstellwinkeln zwischen 60° und 120° eingesetzt werden. Bei Winkeln kleiner als 60° können zwar Kehlnähte eingesetzt werden, sind jedoch bei der Bemessung als teildurchgeschweißte Nähte anzusehen. Bei Winkeln größer als 120° sind Kehlnähte nicht dem Lastabtrag zuzurechnen.

Eine Kehlnaht ist in Fällen, in denen Biegung um die Längsachse der Naht übertragen werden soll, nicht einzusetzen, wenn Zug in der Nahtwurzel erzeugt wird.

Wirksame Länge und Kehlnahtgröße

Die wirksame Länge einer Kehlnaht kann als die gesamte Länge mit vollständiger Naht angesehen werden. Jedoch sind Nähte mit wirksamen Längen kürzer als 40 mm oder von 6-facher Nahtdicke nicht als kraftschlüssig anzusehen.

Die wirksame Nahtdicke a einer Kehlnaht sollte als die Höhe des größten von den Nahtflächen und der Schweißnahtoberfläche eingeschlossenen Dreiecks (gleichschenkelig oder ungleichschenkelig) angesehen werden, bei dem die Höhe rechtwinklig zur Außenfläche gemessen wird, siehe Abbildung 6.3. Der Vorteil einer zusätzlichen Nahtdicke infolge eines tiefen Einbrands, siehe Abbildung 6.4, kann ausgenutzt werden, vorausgesetzt, dass durch eine Verfahrensprüfung gezeigt wurde, dass der erforderliche Tiefenbrand durchgängig gewährleistet ist.

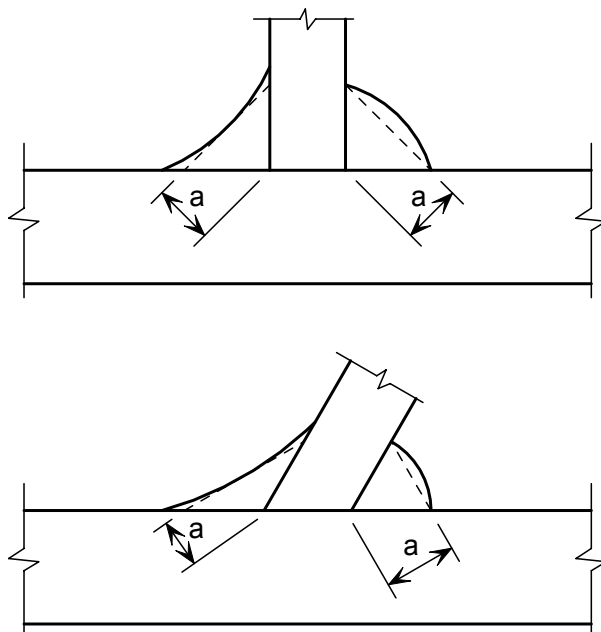


Abbildung 6.3 Kehlnahtdicke

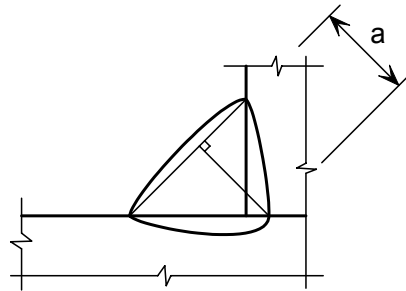


Abbildung 6.4 Kehlnaht mit tiefem Einbrand

Bemessungsspannung und Bemessungswert der Schubfestigkeit

Die Bemessungsspannung ergibt sich als vektorielle Summe der Spannungen infolge aller Kräfte und Momente, die in der Schweißnaht übertragen werden. Die Bemessungsspannung berechnet sich für die wirksame Länge und Nahtdicke (siehe oben).

Die Bemessungstragfähigkeit der Kehlnaht ist ausreichend, wenn die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (6.12a)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.12b)$$

wobei:

- σ_{\perp} die Normalspannung senkrecht zur Nahtdickenrichtung der Kehlnaht
- τ_{\perp} die Schubspannung (in der Nahtquerschnittsebene) senkrecht zur Schweißnahtlängsachse
- τ_{\parallel} die Schubspannung (in der Nahtquerschnittsebene) parallel zur Schweißnahtlängsachse
- f_u der Nennwert der Zugfestigkeit des schwächsten angeschlossenen Teils
- β_w 1,0 für alle Nennfestigkeitsstufen nichtrostender Stähle, es sei denn, durch Versuche ergibt sich ein geringerer Wert wird.

Zur Berechnung der Bemessungstragfähigkeit einer Kehlnaht kann alternativ das vereinfachte Verfahren in 4.5.3.3 von EN 1993-1-8 verwendet werden

6.4.3 Stumpfnähte

Stumpfnähte mit vollständiger Durchschweißung

Die Bemessungstragfähigkeit einer vollständig durchgeschweißten Stumpfnahnt entspricht der Bemessungstragfähigkeit des schwächeren angeschlossenen Teils, vorausgesetzt, dass die Naht den Empfehlungen in Abschnitt 6.3.1 genügt.

Teildurchgeschweißte Stumpfnah

Teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte können zur Übertragung von Schubkräften eingesetzt werden. Sie werden in Situationen, in denen sie auf Zug beansprucht werden würden, nicht empfohlen.

Die Tragfähigkeit einer teilweise durchgeschweißten Naht kann wie für eine Kehlnaht mit tiefem Einbrand bestimmt werden. Die Nahtdicke einer teilweise durchgeschweißten Stumpfnah entspricht der Tiefe des Einbrands, der durchgängig mit dem jeweiligen Schweißverfahren erzielt und nachgewiesen werden kann. Liegen keine Prüfwerte für das Verfahren vor, kann unterstellt werden, dass die Nahtdicke der Schweißnahtvorbereitung weniger 3 mm entspricht.

6.4.4 Schweißen kaltverfestigter nichtrostender Stähle

Beim Schweißen kaltverfestigter nichtrostender Stähle gelten die gleichen Grundsätze wie bei lösungsgeglühten nichtrostenden Stählen, vorausgesetzt dass:

- die Schweißverbindung durch Axiallasten beansprucht ist,
- die Festigkeitsstufe des kaltverfestigten nichtrostenden Stahls CP500 bzw. C850 nicht überschreitet,
- die Schweißzusatzwerkstoffe entsprechend Tabelle 6.2 gewählt werden,
- die Beanspruchbarkeit des Grundwerkstoffs in den Wärmeeinflusszonen auf die Zugfestigkeit des lösungsgeglühten Grundwerkstoffs bezogen wird.

Das Schweißgut darf eine geringere Festigkeit haben als der Grundwerkstoff. Für Schweißzusätze mit geringer Festigkeit sollte die Bemessungstragfähigkeit einer Kehl- oder Stumpfnah auf die Festigkeit des Schweißgutes (siehe Tabelle 6.3) mit $\beta_w = 1.0$ bezogen werden.

7 BRANDSCHUTZBEMESSUNG

7.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Bemessung von nichtrostenden Stählen, die aus Gründen des allgemeinen Brandschutzes bestimmte Funktionen zu erfüllen haben, wie die Vermeidung von frühzeitigem Einsturz (tragende Funktionen) im Brandfall. Die Empfehlungen zielen lediglich auf die passiven Methoden des Brandschutzes ab und gelten für nichtrostende Stähle und Konstruktionen, die im Allgemeinen mit den Regeln der Kapitel 1 bis 6 dieses Dokuments bemessen werden können.

Bei Temperaturen über 550°C behalten austenitische nichtrostende Stähle einen höheren Anteil ihrer Raumtemperaturfestigkeit als Baustähle bei, die Steifigkeit ist bei jeder Temperatur höher.

EN 1991-1-2 behandelt die thermischen und mechanischen Auswirkungen auf Tragwerke im Brandfall. Brand wird in den Eurocodes als außergewöhnliche Bemessungssituation bezeichnet. EN 1990 enthält Lastfallkombinationen für außergewöhnliche Bemessungssituationen und empfiehlt, dass der Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen zu 1,0 gesetzt werden soll. EN 1993-1-2 empfiehlt für den Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite $\gamma_{M,fi}$ im Brandfall einen Wert von 1,0.

Die Funktionsanforderungen an Tragwerke aus nichtrostenden Stählen unter der außergewöhnlichen Brandlast unterscheiden sich nicht von denen, die an Kohlenstoffstahl gestellt werden:

- Ist im Brandfall die Einhaltung bestimmter mechanischer Eigenschaften erforderlich, so ist das Tragwerk so zu bemessen und zu konstruieren, dass es seine tragende Funktion während der maßgebenden Branddauer beibehält.
- Verformungskriterien sollten gelten, wo die Mittel des Brandschutzes oder die Entwurfskriterien für einzelne Bauelemente die Kontrolle der Tragwerksverformungen fordern. Jedoch ist die Beachtung der Tragwerksverformungen nicht notwendig, wenn der Feuerwiderstand voneinander getrennter Elemente auf der Normbrandkurve basiert.

7.2 Mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen

Tabelle 7.1 enthält Abminderungsfaktoren für Sorten von nichtrostenden Stählen hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit bezogen auf den entsprechenden Basiswert bei 20°C, für die Spannungs-Dehnungsbeziehung und den Parameter $g_{2,\theta}$ bei hohen Temperaturen. Die Beiwerte sind wie folgt definiert:

$k_{0,2\text{proof},\theta}$ 0,2% Prüffestigkeit bei der Temperatur θ bezogen auf die Bemessungsfestigkeit bei 20°C, d.h. $f_{0,2\text{proof},\theta}/f_y$

$g_{2,\theta}$ ein Parameter zu Berechnung von $f_{2,\theta}$, der Spannung bei 2% Gesamtdéhnung zur Temperatur θ , unter Verwendung folgender Gleichung:

$$f_{2,\theta} = f_{0,2\text{proof},\theta} + g_{2,\theta}(f_{u,\theta} - f_{0,2\text{proof},\theta}) \quad (7.1)$$

$k_{u,\theta}$ Zugfestigkeit bei der Temperatur θ bezogen auf die Festigkeit bei 20 °C, d.h. $f_{u,\theta}/f_u$

$k_{E,\theta}$ Neigung des linear elastischen Bereichs bei Temperatur θ bezogen auf die Neigung bei 20°C, d.h. E_θ/E

wobei:

E der Elastizitätsmodul bei 20°C (= 200000 N/mm²) ist,

f_y die charakteristische Streckgrenze bei 20°C gemäß Definition in Abschnitt 3.2.4 ist,

f_u die charakteristische Zugfestigkeit bei 20°C gemäß Definition in Abschnitt 3.2.4 ist.

Zur Bestimmung des Feuerwiderstands von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl sollten die folgenden charakteristischen Festigkeiten verwendet werden.

Stützen	$f_{0,2\text{proof},\theta}$	(bei allen Querschnittsklassen)
Eingespannte Träger	$f_{2,\theta}$	(bei Querschnittsklassen 1-3)
	$f_{0,2\text{proof},\theta}$	(bei Querschnittsklasse 4)
Frei aufgelagerte Träger	$f_{0,2\text{proof},\theta}$	(bei allen Querschnittsklassen)
Zugglieder	$f_{2,\theta}$	(bei allen Querschnittsklassen).

Bei eingespannten Trägern der Querschnittsklassen 1-3 und bei Zuggliedern wird in Situationen, in denen Verformungskriterien beachtet werden sollten, die Festigkeit bei einer Gesamtdehnung von 1,0% $f_{1,\theta}$ als Grundlage zur Berechnung von $f_{2,\theta}$ empfohlen. Der Wert für $f_{1,\theta}$ ist mit folgender Beziehung zu bestimmen:

$$f_{1,\theta} = f_{0,2\text{proof},\theta} + 0,5g_{2,\theta}(f_{u,\theta} - f_{0,2\text{proof},\theta}) \quad (7.2)$$

Angaben für $f_{0,2\text{proof},\theta}$ werden, bezogen auf die charakteristische Streckgrenze bei 20 °C, über den Beiwert $k_{0,2\text{proof},\theta}$ in Tabelle 7.1 gemacht.

Tabelle 7.1 Abminderungsfaktoren für Festigkeit und Steifigkeit und Parameter $g_{2,\theta}$ bei hohen Temperaturen

Temperatur θ (°C)	Abminderungs- faktor $k_{0,2proof,2}$	Parameter $g_{2,\theta}$	Abminderungs- faktor $k_{u,\theta}$	Abminderungs- faktor $k_{E,\theta}$
Stahlsorte 1.4301				
20	1,00	0,26	1,00	1,00
100	0,82	0,24	0,87	0,96
200	0,68	0,19	0,77	0,92
300	0,64	0,19	0,73	0,88
400	0,60	0,19	0,72	0,84
500	0,54	0,19	0,67	0,80
600	0,49	0,22	0,58	0,76
700	0,40	0,26	0,43	0,71
800	0,27	0,35	0,27	0,63
900	0,14	0,38	0,15	0,45
1000	0,06	0,40	0,07	0,20
1100	0,03	0,40	0,03	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
Stahlsorte 1.4401				
20	1,00	0,24	1,00	1,00
100	0,88	0,24	0,93	0,96
200	0,76	0,24	0,87	0,92
300	0,71	0,24	0,84	0,88
400	0,66	0,21	0,83	0,84
500	0,63	0,20	0,79	0,80
600	0,61	0,19	0,72	0,76
700	0,51	0,24	0,55	0,71
800	0,40	0,35	0,34	0,63
900	0,19	0,38	0,18	0,45
1000	0,10	0,40	0,09	0,20
1100	0,05	0,40	0,04	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
Stahlsorte 1.4571				
20	1,00	0,25	1,00	1,00
100	0,89	0,25	0,88	0,96
200	0,83	0,25	0,81	0,92
300	0,77	0,24	0,80	0,88
400	0,72	0,22	0,80	0,84
500	0,69	0,21	0,77	0,80
600	0,66	0,21	0,71	0,76
700	0,59	0,25	0,57	0,71
800	0,50	0,35	0,38	0,63
900	0,28	0,38	0,22	0,45
1000	0,15	0,40	0,11	0,20
1100	0,075	0,40	0,055	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
Stahlsorte 1.4462				
20	1,00	0,35	1,00	1,00
100	0,91	0,35	0,93	0,96
200	0,80	0,32	0,85	0,92
300	0,75	0,30	0,83	0,88
400	0,72	0,28	0,82	0,84
500	0,65	0,30	0,71	0,80
600	0,56	0,33	0,57	0,76
700	0,37	0,40	0,38	0,71
800	0,26	0,41	0,29	0,63
900	0,10	0,45	0,12	0,45
1000	0,03	0,47	0,04	0,20
1100	0,015	0,47	0,02	0,10
1200	0,00	0,47	0,00	0,00

Tabelle 7.1 (fortgesetzt) Abminderungsfaktoren für Festigkeit und Steifigkeit und Parameter $g_{2,\theta}$ bei hohen Temperaturen

Temperatur θ (°C)	Abminderungs- faktor $K_{0,2\text{proof},2}$	Parameter $g_{2,\theta}$	Abminderungs- faktor $K_{u,\theta}$	Abminderungs- faktor $K_{E,\theta}$
Stahlsorte 1.4318				
20	1.00	0.25	1.00	1.00
100	0.78	0.25	0.74	0.96
200	0.65	0.25	0.73	0.92
300	0.57	0.25	0.64	0.88
400	0.51	0.25	0.60	0.84
500	0.48	0.25	0.55	0.80
600	0.46	0.27	0.52	0.76
700	0.40	0.27	0.40	0.71
800	0.27	0.26	0.26	0.63
Stahlsorte 1.4318 C850				
20	1.00	0.21	1.00	1.00
100	0.86	0.24	0.71	0.91
200	0.77	0.25	0.61	0.88
300	0.69	0.24	0.60	0.84
400	0.68	0.24	0.57	0.80
500	0.65	0.25	0.53	0.76
600	0.54	0.25	0.45	0.72
700	0.40	0.26	0.34	0.67
800	0.23	0.25	0.24	0.52
900	0.11	0.25	0.10	0.35
Stahlsorte 1.4571 C850				
20	1.00	0.36	1.00	1.00
100	0.96	0.36	0.94	0.96
200	0.95	0.36	0.88	0.92
300	0.92	0.36	0.84	0.88
400	0.89	0.36	0.82	0.84
500	0.83	0.36	0.79	0.80
600	0.81	0.36	0.72	0.76
700	0.60	0.37	0.53	0.71
800	0.35	0.39	0.38	0.63
900	0.10	0.40	0.20	0.45

7.3 Thermische Eigenschaften bei hohen Temperaturen

7.3.1 Thermische Dehnung

Die thermische Dehnung von austenitischen nichtrostenden Stählen $\Delta l/l$ kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$\Delta l/l = (16 + 4,79 \times 10^{-3} \theta_a - 1,243 \times 10^{-6} \theta_a^2) \times (\theta_a - 20) 10^{-6} \quad (7.3)$$

hierin ist:

- l die Länge bei 20°C,
- Δl die temperaturinduzierte Dehnung,
- θ_a die Stahltemperatur [°C]

7.3.2 Spezifische Wärme

Die spezifische Wärme von nichtrostenden Stählen c_a kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$c_a = 450 + 0,280 \times \theta_a - 2,91 \times 10^{-4} \theta_a^2 + 1,34 \times 10^{-7} \theta_a^3 \text{ J/kgK} \quad (7.4)$$

hierin ist:

θ_a gemäß Abschnitt 7.3.1.

7.3.3 Thermische Leitfähigkeit

Die thermische Leitfähigkeit nichtrostender Stähle λ_a kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$\lambda_a = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK} \quad (7.5)$$

hierin ist:

θ_a gemäß Abschnitt 7.3.1

7.4 Bestimmung des baulichen Feuerwiderstands

Der Feuerwiderstand kann mit einem oder mehreren der nachstehenden Näherungsverfahren bestimmt werden:

- einfache Berechnungsverfahren für die einzelnen Bauteile;
- erweiterte Berechnungsverfahren;
- Versuche.

Dem einfachen Berechnungsverfahren liegen konservative Abschätzungen zugrunde. Erweiterte Berechnungsverfahren sind Bemessungsverfahren in denen ingenieurmäßige Grundlagen auf realistische Art und Weise in speziellen Fällen zur Anwendung gelangen. Existiert hingegen kein einfaches Bemessungsverfahren, so muss entweder ein Verfahren der fortgeschrittenen Berechnungsmodelle oder eine versuchsgestützte Methode angewandt werden.

Erweiterte Berechnungsverfahren enthält der Kommentar zu den Empfehlungen (siehe Vorwort).

7.4.1 Klassifizierung von Querschnitten

Bei der Brandschutzbemessung ist die Methode der Querschnittsklassifizierung aus Abschnitt 4 dieses Dokuments anzuwenden, indem die Eigenschaften bei 20°C verwendet werden.

7.4.2 Zugglieder

Die Bemessungstragfähigkeit $N_{fi,\theta,Rd}$ eines Zugglieds bei gleichmäßig verteilter Temperatur θ_a bestimmt sich mit:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] \quad (7.6)$$

hierin ist:

$k_{2,\theta} = f_{2,\theta} / f_y$, d.h. der Abminderungsbeiwert der Festigkeit zur 2% Gesamtdehnung zur Temperatur θ_a

N_{Rd} die Bemessungstragfähigkeit des Querschnitts $N_{pl,Rd}$ bei Normaltemperatur entsprechend Abschnitt 4.7.2.

γ_{M0} und $\gamma_{M,fi}$ jeweils ein Teilsicherheitsbeiwert, siehe Tabelle 2.1

Ist die Temperatur in einem Bauteil nicht gleichmäßig, ergibt sich die Bemessungstragfähigkeit mit:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{2,\theta,i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (7.7)$$

wobei:

- A_i die Fläche eines Querschnittsteils ist,
- θ_i die Temperatur in einem Querschnittsteil A_i ist,
- $k_{2,\theta,i}$ der Abminderungsfaktor der Festigkeit zur 2% Gesamtdehnung bei der Temperatur θ_i ist (siehe Abschnitt 7.2)

Alternativ kann die Bemessungstragfähigkeit $N_{fi,t,Rd}$ zur Zeit t für ein Zugglied unter nicht gleichmäßiger Temperaturverteilung auf der sicheren Seite liegend gleich der Bemessungstragfähigkeit $N_{fi,\theta,Rd}$ eines Zugglieds unter gleicher Temperatur θ_a mit dem Maximalwert $\theta_{a,max}$ zur Zeit t gesetzt werden.

7.4.3 Druckglieder

Folgende Empfehlungen gelten für Stützen mit Querschnitten der Klasse 1, 2, 3 oder 4, mit folgenden Eigenschaften:

- kaltgeformte, offene Querschnitte (nicht geschweißt), z.B. U- oder Winkelprofile, oder
- kaltgeformte Hohlprofile (geschweißt und nicht geschweißt), z.B. Rund- oder Rechteckhohlprofile.

Die Bemessungstragfähigkeit gegen Knicken $N_{b,fi,t,Rd}$ zur Zeit t eines Druckglieds unter gleichmäßiger Temperatur θ_a ergibt sich mit:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{für Querschnittsklassen 1, 2 oder 3} \quad (7.8)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A_{eff} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{für Querschnittsklasse 4} \quad (7.9)$$

wobei:

$k_{0,2proof,\theta}$ ist der Abminderungsfaktoren für die 0,2%-Dehngrenze bei der Temperatur θ_a sind (siehe Abschnitt 7.2)

χ_{fi} ist der Abminderungsfaktor gegen Biegedrillknicken im Brandfall und ergibt sich mit:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \chi_{fi} \leq 1 \quad \text{jedoch} \quad (7.10)$$

$$\text{mit } \varphi_{\theta} = 0,5 \left(1 + \alpha (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right) \quad (7.11)$$

hierin sind α und $\bar{\lambda}_0$ die Beulwerte bei Raumtemperatur gemäß Tabelle 5.1.

Die modifizierte dimensionslose Schlankheit $\bar{\lambda}_{\theta}$ bei der Temperatur θ folgt zu:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{0,2proof,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{für alle Querschnittsklassen} \quad (7.12)$$

wobei

$k_{E,\theta}$ der Abminderungsfaktor für die Neigung des linear elastischen Bereichs zur Temperatur θ_a ist (siehe Abschnitt 7.2)

Ist die Temperatur eines Bauteils nicht gleichförmig verteilt, so kann die Drucktragfähigkeit auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden, indem eine gleichförmig verteilte Temperatur mit der Maximaltemperatur des Bauteils unterstellt wird.

Die Knicklänge l_{fi} einer Stütze für die Brandschutzbemessung ist im Allgemeinen wie bei der Bemessung bei Normaltemperatur zu bestimmen. Jedoch kann bei einem ausgesteiften Rahmen die Knicklänge l_{fi} bestimmt werden, indem die Stütze zwischen tragfähigen oder teiltragfähigen Anschlüssen an die Stützen in den Brandabschnitten oberhalb und unterhalb als starr angesehen werden. Diese Unterstellung kann nur dann vorgenommen werden, wenn der Feuerwiderstand der die in Brandabschnitte teilenden Bauteile nicht geringer ist als der Feuerwiderstand der Stütze.

Im Fall eines ausgesteiften Rahmens, in dem jedes Stockwerk ein Brandabschnitt mit ausreichendem Brandschutz darstellt, ergibt sich die Knicklänge einer Stütze in einem Geschoß zu $l_{fi} = 0,5L$, und im Obergeschoß ergibt sich die Knicklänge zu $l_{fi} = 0,7L$, wobei L gleich der Systemlänge im entsprechenden Geschoß ist, siehe Abbildung 7.1.

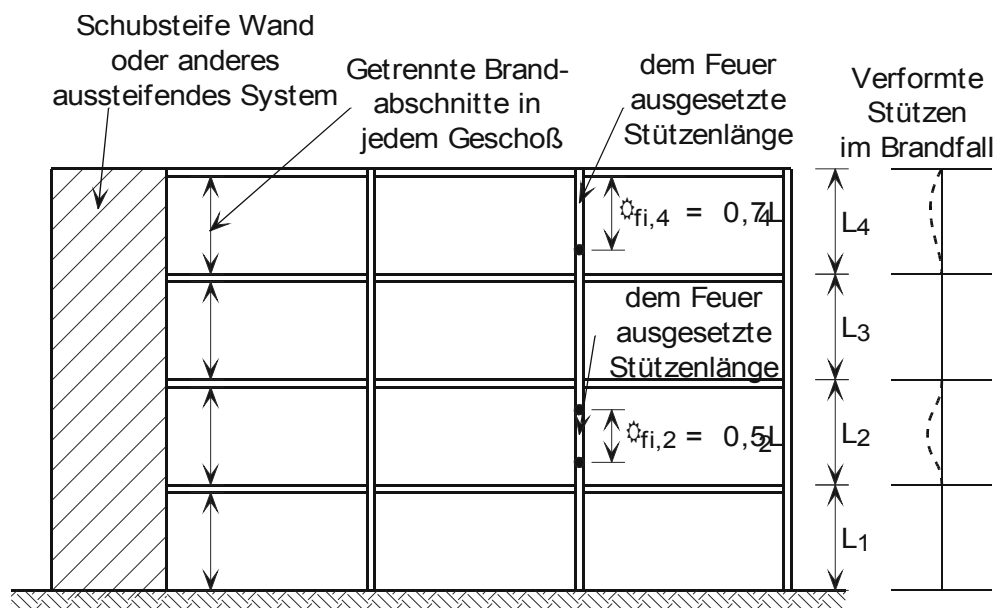


Abbildung 7.1 Knicklängen l_{fi} von Stützen in ausgesteiften Rahmen

7.4.4 Seitlich gehaltene Träger

Die Momententragfähigkeit $M_{fi,\theta,Rd}$ eines Querschnitts unter gleichförmiger Temperaturverteilung θ_a ist zu bestimmen mit:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad \text{für Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (7.13)$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{0,2\text{proof},\theta} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad \text{für Querschnitte der Klasse 4} \quad (7.14)$$

hierin ist:

M_{Rd} die plastische Momententragfähigkeit des Bruttoquerschnitts $M_{pl,Rd}$ (Querschnitte der Klasse 1 oder 2), der elastische Momentenwiderstand des Bruttoquerschnitts $M_{el,Rd}$ (Querschnitte der Klasse 3) oder der

effektive Momentenwiderstand des wirksamen Querschnitts $M_{\text{eff,Rd}}$
(Querschnitte der Klasse 4) für Normaltemperatur,

$k_{2,\theta}$ und $k_{0,2\text{proof},\theta}$ jeweils gemäß Definition in Abschnitt 7.4.3

Wird es notwendig den Schubwirkungen Rechnung zu tragen, so ist der abgeminderte Momentenwiderstand für Normaltemperatur entsprechend Abschnitt 4.7.6 zu verwenden.

Die Momenten Tragfähigkeit $M_{\text{fi,t,Rd}}$ zur Zeit t eines Querschnitts von einem Bauteil mit nicht konstanter Temperaturverteilung, kann auf der sicheren Seite liegend ermittelt werden mit:

$$M_{\text{fi,t,Rd}} = M_{\text{fi},\theta,\text{Rd}} / \kappa_1 \kappa_2 \quad (7.15)$$

hierin ist:

$M_{\text{fi},\theta,\text{Rd}}$ die Momenten Tragfähigkeit des Querschnitts (oder effektiven Querschnitts bei Klasse 4) unter gleichmäßiger Temperatur θ_a entsprechend des Temperaturmaximums im Querschnitt,

κ_1 ein Anpassungsbeiwert bei nicht konstanter Temperatur im Querschnitt, siehe Tabelle 7.2,

κ_2 ein Anpassungsbeiwert bei nicht konstanter Temperatur entlang des Trägers, siehe Tabelle 7.2.

Tabelle 7.2 Anpassungsbeiwerte

Rahmenbedingung	κ_1
Träger allseitig dem Feuer ausgesetzt	1,0
ungeschützter Träger, der auf drei Seiten einem Feuer ausgesetzt und dessen vierte Seite von einer Beton- oder Verbunddecke bedeckt ist	0,70 ¹⁾
geschützter Träger, der auf drei Seiten einem Feuer ausgesetzt und seine vierte Seite von einer Beton- oder Verbunddecke bedeckt ist	0,85 ¹⁾
	κ_2
an den Auflagern statisch unbestimmter Träger	0,85 ¹⁾
in allen anderen Fällen	1,0

Die Bemessungstragfähigkeit für Schub $V_{\text{fi,t,Rd}}$ zur Zeit t eines Querschnitts unter nicht konstanter Momentenverteilung bestimmt sich mit:

$$V_{\text{fi,t,Rd}} = k_{2,\theta,\text{web}} V_{\text{Rd}} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,\text{fi}}] \quad \text{bei Klasse 1, 2 oder 3} \quad (7.16)$$

$$V_{\text{fi,t,Rd}} = k_{0,2\text{proof},\theta,\text{web}} V_{\text{Rd}} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,\text{fi}}] \quad \text{bei Klasse 4} \quad (7.17)$$

hierin ist:

V_{Rd} die Schubtragfähigkeit des Bruttoquerschnitts bei Normaltemperatur entsprechend 4.7.5. (bei Temperaturen über 400°C sollte der Wert η zu 1,0 gesetzt werden)

θ_{web} die Temperatur im Steg des Querschnitts.

7.4.5 Seitlich verschiebliche Träger

Die Bemessungstragfähigkeit für Biegedrillknicken $M_{\text{b,fi,t,Rd}}$ zur Zeit t eines seitlich nicht gehaltenen Trägers bestimmt sich mit:

$$M_{\text{b,fi,t,Rd}} = \chi_{\text{LT,fi}} W_{\text{pl,y}} k_{0,2\text{proof},\theta} f_y / \gamma_{M,\text{fi}} \quad \text{für Klasse 1 und 2} \quad (7.18)$$

$$M_{\text{b,fi,t,Rd}} = \chi_{\text{LT,fi}} W_{\text{el,y}} k_{0,2\text{proof},\theta} f_y / \gamma_{M,\text{fi}} \quad \text{für Klasse 3} \quad (7.19)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{für Klasse 4} \quad (7.20)$$

hierin ist:

$\chi_{LT,fi}$ der Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken im Brandfall und ergibt sich aus:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT,\theta} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad \text{jedoch } \chi_{LT,fi} \leq 1 \quad (7.21)$$

$$\text{und } \varphi_{LT,\theta} = 0,5 \left(1 + 0,65 \bar{\lambda}_{LT,\theta} \sqrt{\frac{235}{f_y} + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2} \right) \quad (7.22)$$

und α_{LT} ist der Imperfektionsbeiwert bei Raumtemperatur gemäß Abschnitt 5.4.2.

$k_{0,2proof,\theta}$ ist der Abminderungsbeiwert gemäß Abschnitt 7.4.3 mit der Maximaltemperatur θ irgendwo im Querschnitt.

Die dimensionslose Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ bei der Temperatur θ ergibt sich mit:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[\frac{k_{0,2proof,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{für alle Querschnittsklassen} \quad (7.23)$$

wobei

$k_{E,\theta}$ der Abminderungsbeiwert gemäß Definition in Abschnitt 7.4.3 zur Temperatur θ ist.

7.4.6 Bauteile unter Axialdruck und Biegung

Kombinierte Wirkung aus Drucklasten und Biegemomenten sind in Übereinstimmung mit folgenden Ausdrücken zu überprüfen, um vorzeitiges Knicken sowohl um die starke als auch die schwache Achse sowie Biegedrillknicken zu verhindern:

a) Bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.24)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min1,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.25)$$

wobei:

$N_{fi,Ed}$, $M_{y,fi,Ed}$ und $M_{z,fi,Ed}$ die Bemessungswerte der Axiallasten und Biegemomente im Brandfall darstellen,

$M_{y,fi,\theta,Rd}$ und $M_{z,fi,\theta,Rd}$ gemäß Definition in Abschnitt 7.4.4 sind,

$k_{0,2proof,\theta}$ ist der Abminderungsbeiwert bei Temperatur θ gemäß Definition in Abschnitt 7.4.3 ist,

$\chi_{min,fi}$ den kleinsten Abminderungsbeiwert aus Biegeknicken, Torsionsknicken und Biegetorsionsknicken bei Temperatur θ gemäß Definition in Abschnitt 7.4.3 darstellt,

$\chi_{LT,fi}$ der Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken bei der Temperatur θ gemäß Definition in Abschnitt 7.4.5 ist,

$\chi_{min1,fi}$ der kleinste Abminderungsbeiwert aus Biegeknicken um die z-Achse, Torsions- und Biegetorsionsknicken bei der Temperatur θ entsprechend Abschnitt 7.4.3 ist.

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (7.26)$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (7.27)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (7.28)$$

$$\mu_y = (1,2 \beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8 \quad (7.29)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (7.30)$$

$$\mu_z = (2 \beta_{M,z} - 5) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44 \beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \quad \text{and} \quad \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1 \quad (7.31)$$

β_M ist ein zur konstanten Momentenverteilung äquivalenter Momentenfaktor aus Tabelle 7.3.

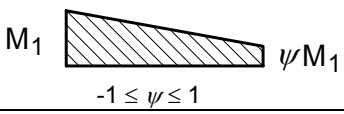
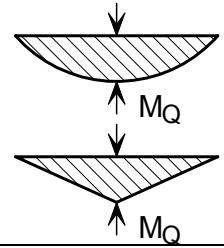
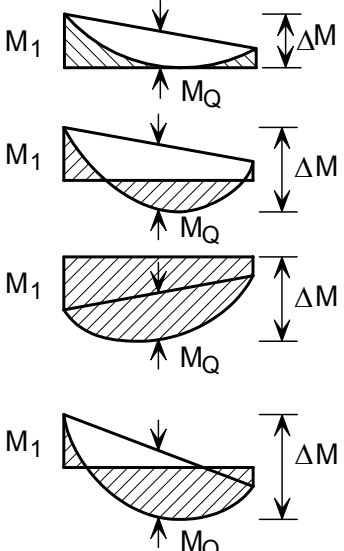
b) Bei Querschnitten der Klasse 4 gilt:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A_{eff} k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.32)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min1,fi} A_{eff} k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.33)$$

wobei die Terme mit Ausnahme derjenigen zur Berechnung von k_y , k_z und k_{LT} wie oben in (a) definiert werden, und A ist durch A_{eff} zu ersetzen.

Tabelle 7.3 Äquivalente Momentenbeiwerte β_M

Momentenverläufe	Äquivalenter Momentenbeiwert β_M
Stabendmomente 	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
Momente aus Querbelastung 	$\beta_{M,Q} = 1,3$ $\beta_{M,Q} = 1,4$
Momente aus Querbelastung mit Stabendmomenten 	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ $M_Q = \max M \text{ nur infolge Querlast}$ <p>Bei Momentenverläufen ohne Vorzeichenwechsel: $\Delta M = \max M$</p> <p>Bei Momentenverläufen mit Vorzeichenwechsel: $\Delta M = \max M + \min M$</p>

7.4.7 Berechnung des Temperaturanstiegs bei nichtrostenden Stählen

Das Verfahren zur Berechnung des Temperaturanstiegs für Baustähle kann auch bei nichtrostenden Stählen angewandt werden.

Der schrittweise Anstieg der Temperatur eines sich gleichmäßig aufheizenden, reinem Querschnitt aus nichtrostendem Stahl im Zeitintervall t ergibt sich mit:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{\text{net,d}} \Delta t \quad (7.34)$$

hierin ist:

- c_a die Wärmekapazität für nichtrostenden Stahl [J/kgK] gemäß Abschnitt 7.3.2,
- ρ_a die Dichte von nichtrostendem Stahl [kg/m³] aus Tabelle 3.6 (normalerweise als temperaturunabhängig angesehen),
- A_m/V der Querschnittsbeiwert des ungeschützten Stahlbauteils,
- A_m die Oberfläche pro Längeneinheit,
- V das Bauteilvolumen pro Längeneinheit,

$$\begin{aligned} \dot{h}_{\text{net,d}} & \text{ der Bemessungswert des Nettowärmefflusses pro Flächeneinheit} \\ & = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \end{aligned} \quad (7.35)$$

mit:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (7.36)$$

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \phi \varepsilon_{\text{res}} 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (7.37)$$

α_c als Wärmeübergangskoeffizient durch Konvektion (normalerweise 25W/m²K)

θ_g als die Umgebungsgastemperatur des Bauteils im Brandfall [°C] entsprechend des Nenntemperaturzeitverlaufs

θ_a als die Temperatur des Stahlquerschnitts unter der Annahme der Gleichverteilung zur Zeit t (°C)

ϕ als dem Konfigurationsbeiwert

ε_{res} als das resultierende Emissionsvermögen

Der Parameter ε_{res} steht für die Wärmestrahlung zwischen Feuer und der Stahloberfläche, sein Maximalwert hängt vom Grad der direkten Bestrahlung des Elements durch das Feuer ab. Elemente, die teilweise vor Strahlungseffekten der Brandhitze verdeckt sind, weisen einen geringeren Wert für ε_{res} auf. Für nicht-rostenden Stahl kann ε_{res} zu 0,2 gesetzt werden.

Obige Gleichung zur Berechnung des Temperaturanstiegs kann zur Bestimmung der Stahltemperaturen durch schrittweise Integration herangezogen werden, wenn die Veränderlichkeit der Feuertemperatur über die Zeit bekannt ist. Den nominellen Temperatur-Zeit-Verlauf eines abschnittsweisen Brands enthält EN 1991-1-2:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (7.38)$$

mit:

t als der Ablaufzeit (Minuten)

8 ERMÜDUNG

Ermüdung von metallischen Materialien ist bei Tragwerken oder Tragwerksteilen zu beachten, die Lastspielen auf signifikantem Spannungsniveau ausgesetzt sind. Bei Tragwerken des Hochbaus ist normalerweise kein Ermüdungsnachweis zu führen, es sei denn, es handelt sich um Bauteile mit Hebevorrichtungen, fahrenden Lasten oder schwingungserzeugenden Maschinen oder um Bauteile unter windinduzierter Oszillation.

Wie bei Tragwerken aus Baustahl sind insbesondere solche Stellen ungleich anfälliger gegenüber Ermüdung als andere Tragwerksteile, an denen sowohl Spannungskonzentration als auch Schweißnahtfehler vorliegen. Hinweise zur Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit von Baustahltragwerken gelten ebenfalls für nichtrostenden Stahl (siehe EN 1993-1-9).

Durch sachgerechtes Entwerfen kann der Ermüdungsanfälligkeit einer Konstruktion wirksam entgegengewirkt werden. Dies umfasst die Entscheidung für eine zweckmäßige Tragwerkszusammensetzung sowie die sorgfältige Wahl der Konstruktionsdetails unter dem Gesichtspunkt geringer Ermüdungsanfälligkeit. Der Schlüssel zum ermüdungsgerechten Entwerfen liegt in der realistischen Einschätzung der Ermüdungsrisiken im frühen Entwurfsstadium. Erfolgt die Beurteilung der Ermüdung erst, nachdem alle anderen Nachweise erbracht wurden, kann dies zu einem aufwendigen oder kostenintensiven Tragwerk führen. Ebenso ist es wichtig, die Anforderungen des Herstellers oder Stahlbauers zu beachten. Deshalb wird empfohlen, frühzeitig Überlegungen anzustellen, welche Tragwerksteile voraussichtlich am anfälligsten auf Ermüdung reagieren werden, Vorsichtsmaßnahmen zu diskutieren und die möglichen Konsequenzen für Fertigung und Montage zu identifizieren. Besonders die Einbringung von Löchern oder der Einsatz von Hebevorrichtungen, die Herstellung und Bau erleichtern sollen, sind bei der Ermüdungsbewertung zu beachten.

Potentielle Ermüdungsprobleme lassen sich vermeiden, indem bei den Konstruktionsdetails insbesondere folgende Schwachpunkte vermieden werden:

- scharfe Querschnittsprünge und Spannungskonzentrationen im allgemeinen,
- Dezentrierungen und Exzentrizitäten,
- kleine Unstetigkeiten wie Kratzer und Schleifspuren,
- unnötiges Anschweißen von nebensächlichen Befestigungen, z.B. Haken,
- teilweise durchgeschweißte Nähte, Kehlnähte, unterbrochene Schweißnähte und Schweißbadsicherungen,
- Zündstellen

Obwohl Nachbehandlungstechniken wie Schweißnahtkontrollen, Schleifen der Schweißnahtwurzel oder Strahlen die Ermüdungsfestigkeit einer Verbindung im Allgemeinen verbessern, lassen sich die möglichen Vorteile bei nichtrostenden Stählen nicht genau quantifizieren. Ebenso ist zu beachten, dass die genannten Techniken sehr arbeitsintensiv sind und handwerkliches Geschick und Erfahrung erfordern. Sie sollten nur in besonderen Fällen als Entwurfsoption angesehen werden.

9 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

9.1 Allgemeines

Prüfungen von nichtrostenden Stählen und deren Bauteilen können aus einer Vielzahl von Gründen erforderlich sein:

- wenn die Bemessung auf der Basis tatsächlicher Materialdaten erfolgen muss (siehe Abschnitt 3.2.4),
- wenn die Festigkeitserhöhung in den Ecken kaltgeformter Bauteile genutzt werden soll (siehe Abschnitte 3.2.2 und 4.7.1),
- wenn die Geometrie eines Bauteils jenseits der Anwendungsgrenzen liegt (wie jene in Abschnitt 4.2),
- wenn eine Anzahl von Konstruktionen oder Konstruktionsteilen auf der Grundlage von Vorversuchen ausgelegt werden sollen,
- wenn die Gleichmäßigkeit der Produktion demonstriert werden soll.

Für nichtrostenden Stahl gelten ebenso die üblichen Vorkehrungen und Anforderungen an Versuchsabläufe und Ergebnisauswertung wie bei Prüfungen von Baustahl. Es wird daher im Allgemeinen empfohlen, derartige Anforderungen mit hinzuzuziehen, z.B. siehe Abschnitt 5.2 und Anhang D von EN 1990 und Abschnitt 9 und Anhang A von EN 1993-1-3. Jedoch gibt es besondere Aspekte hinsichtlich des Verhaltens von nichtrostenden Stählen, denen bei der Versuchsauslegung mehr Beachtung geschenkt werden sollte, als dies bei Baustählen der Fall wäre. Folgende, kurz dargestellte Hinweise werden hierzu vorgestellt.

9.2 Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Kurve

Die maßgebende europäische Norm für Materialprüfungen ist die EN 10002-1 *Zugversuche von metallischen Werkstoffen. Testverfahren bei Raumtemperatur*. Diese Norm enthält keinerlei Details hinsichtlich der Enden der Prüfkörperabschnitte, obwohl die Schemata andeuten, dass die Enden einzuklemmen sind. Jedoch wird empfohlen, die Belastung mit schubtragfähigen Bolzen in den Enden zu realisieren. Damit soll gewährleistet werden, dass die Lasteinleitung in das Prüfstück zentrisch erfolgt und es somit möglich ist, die wirkliche Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve aufzunehmen, ohne verfälschende Effekte infolge vorzeitigem Fließen aus Exzentrizität mit einzubeziehen. Die gerade Art der Belastung kann durch elastische Prüfungen mit Dehnungsmessern an verschiedenen Stellen des Prüfstücks bestätigt werden.

Die Auswirkungen der Belastungsgeschwindigkeiten sollte unbedingt beachtet werden, siehe Abschnitt 3.2.2.

9.3 Bauteilversuche

Es wird empfohlen, Bauteiltests nach Möglichkeit voll maßstäblich, durchzuführen, und die Versuchskörper mit denselben Verfahren wie die Konstruktion herzustellen. Werden die Bauteile geschweißt, so ist der Prototyp auf die gleiche Art zu schweißen.

Da nichtrostende Stähle Anisotropien aufweisen, wird empfohlen die Probekörper aus Blech oder Band mit derselben Ausrichtung (d.h. in Walzrichtung oder quer dazu), wie letztendlich für das Tragwerk vorgesehen, herzustellen. Ist die Ausrichtung innerhalb der Konstruktion unklar oder nicht festzustellen, kann es notwendig sein, Versuche für beide Ausrichtungen durchzuführen und die ungünstigsten Ergebnisse zu verwenden.

Nichtrostende Stähle weisen im Vergleich zu Baustählen höhere Duktilität und Kaltverfestigung auf, weswegen Versuchseinrichtungen anders ausgelegt sein müssen als bei Versuchen mit vergleichbaren Baustählen. Dies gilt nicht nur für die höheren Kräfte, die der Prüfkolben zu leisten hat, sondern auch für die größeren Verformungswege.

Es ist anzumerken, dass mit höheren Prüflasten die Kriecheffekte bedeutender werden, was heißen kann, dass sich Dehnungs- oder Verformungsmessungen nicht innerhalb sinnvoller Haltezeiten stabilisieren können.

Bei verfestigtem Material sollten Zug- und Druckfestigkeiten für jede Richtung ermittelt werden. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist mit der jeweiligen Festigkeit als Bezugsgröße durchzuführen.

10 ASPEKTE BEI DER VERARBEITUNG

10.1 Einleitung

Dieses Kapitel dient dem Zweck, die für den Tragwerksplaner maßgebenden Aspekte der Verarbeitung von nichtrostenden Stählen sowie Empfehlungen für die Fertigungspraxis herauszustellen. Es gestattet ebenso eine übersichtliche Beurteilung der Eignung eines Verarbeitungsbetriebs.

Nichtrostender Stahl ist kein schwierig zu verarbeitender Werkstoff. Jedoch unterscheidet er sich in mancherlei Weise von Kohlenstoffstahl, wobei die Beachtung dieser Unterschiede von entscheidender Bedeutung für die Ergebnisqualität ist. Viele Verarbeitungs- und Fügeprozesse sind denen von Baustahl ähnlich, jedoch erfordern die spezifischen Eigenschaften von nichtrostenden Stählen häufig besondere Beachtung. Es ist wichtig, bereits zu Anfang eines Projektes zielgerichtete Gespräche zwischen Tragwerksplaner und Verarbeitungsbetrieb zu führen, um sicherzustellen, dass geeignete Verarbeitungspraktiken angewandt werden können und auch tatsächlich eingesetzt werden.

Das vorrangige Ziel ist der Erhalt der Korrosionsbeständigkeit des Stahls. In allen Stadien der Lagerung sowie der spanenden und umformenden Verarbeitung müssen Vorkehrungen getroffen werden, um Einflüsse zu minimieren, welche die Bildung der sich selbst regenerierenden Passivschicht gefährden. Besondere Sorgfalt ist bei Wiederherstellung der vollständigen Korrosionsbeständigkeit von geschweißten Bereichen notwendig. Die erforderlichen Maßnahmen sind einfach und gehören im Allgemeinen ohnehin zur gängigen Fertigungspraxis.

Das gute Erscheinungsbild der Oberfläche muss während des gesamten Fertigungsprozesses erhalten bleiben. Oberflächenfehler sind nicht nur unansehnlich, sie sind auch unter technischen Gesichtspunkten inakzeptabel und in der Regel nur mit viel Zeitaufwand und hohen Kosten zu beheben. Während bei Baustahl solche Oberflächenfehler normalerweise unter Anstrichen verdeckt werden, ist dies bei nichtrostenden Stählen nur selten möglich.

Die konstruktive Gestaltung kann durch die verfügbaren Werkstoffe beeinflusst werden. Es ist zu beachten, dass bei nichtrostenden Stählen die zur Verfügung stehende Produktpalette begrenzter ist als bei Kohlenstoffstahl. Dieser Umstand führt zu einem erhöhten Einsatz von kaltgeformten und geschweißten Bauteilen als im allgemeinen Stahlbau üblich. Auch werden aufgrund der begrenzten Kantbanklängen nur relativ kurze Längen hergestellt, was zu vermehrten Stoßstellen führt. Bei der Detaillierung von Anschlüssen ist auf Schraubenlochspiele nahe Biegeradien und potentielle Passprobleme aufgrund von Schweißverzug zu achten.

Hinweise zur Fertigung und Montage sind in ENV 1090-6 *Ausführung von Tragwerken aus Stahl, Ergänzende Regeln für nichtrostende Stähle* enthalten. Diese Norm wird derzeit überführt in EN 1090 *Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken*. EN 1090-1 wird Regeln enthalten für die CE-Kennzeichnung von Stahltragwerken. EN 1090-2 wird Ausführungsklassen in Abhängigkeit von der Tragwerksart enthalten; bestimmte Fertigungs- und Montageanforderungen werden im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Ausführungsklassen stehen. Es ist zu erwarten, dass EN 1090-2 Anfang 2007 zur formalen Abstimmung eingereicht wird.

Die maßgebende Norm zum Schweißen von nichtrostenden Stählen ist EN 1011-3 Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe, Lichtbogenschweißen von nichtrostenden Stählen

10.2 Lagerung und Bearbeitung

Allgemein gilt bei der Lagerung und Bearbeitung von nichtrostenden Stählen im Vergleich zu Baustählen eine erhöhte Sorgfaltspflicht, um Beschädigungen der Oberfläche (besonders bei blankgeglühten oder polierten Oberflächen) und Verunreinigungen durch Baustahl und andere eisenhaltige Partikel zu vermeiden. Lagerung und Bearbeitungsverfahren sind zwischen den jeweiligen Vertragspartnern im Vorfeld eines jeden Verarbeitungsschritts so abzustimmen, dass auch besondere Erfordernisse erfüllt werden können. Die Verfahren sollten zum Beispiel folgende Punkte berücksichtigen:

- Das Material sollte unmittelbar nach Erhalt auf Oberflächenbeschädigungen inspiziert werden.
- Das Material weist häufig eine Schutzfolie z.B. aus Plastik auf. Diese sollte solange wie möglich dort belassen und erst kurz vor dem letzten Arbeitsgang entfernt werden. Die Schutzfolie sollte erforderlichenfalls bereits bei der Ausschreibung vorgesehen werden (z.B. bei blankgeglühten Oberflächen).
- Lagerung unter salzhaltigen, feuchten Luftbedingungen ist zu vermeiden. Lagergerüste dürfen keine Kontaktflächen aus Baustahl aufweisen und sollten deswegen mit Lattungen oder Ummantelungen aus Holz, Gummi oder Plastik abgedeckt werden. Bleche sind vorzugsweise vertikal zu lagern; horizontal gestapelte Bleche werden häufig begangen, was zu Verschmutzungen und Oberflächenbeschädigung führen kann.
- Hebewerkzeuge aus Baustahl, z.B. Ketten, Haken und Klemmen sind nicht zu verwenden. Durch den Einsatz von Trennlagen oder Saughebevorrichtungen wird Fremdeisenverunreinigung verhindert. Die Hubvorrichtungen bei Gabelstaplern sind ebenfalls abzudecken.
- Kontakt mit Chemikalien einschließlich größerer Öl- und Fettmengen (die auch zu Verfärbungen führen können) ist zu vermeiden.
- Idealerweise sollten Baustahl und nichtrostender Stahl in getrennten Arbeitsbereichen verarbeitet werden. Für nichtrostende Stähle sollten separate Werkzeugsätze zum Einsatz kommen (dies gilt insbesondere für Schleifmittel und Drahtbürsten). Es ist hier anzumerken, dass Drahtbürsten und Drahtwolle aus nichtrostendem Stahl bestehen und generell eine mindestens ebenso hohe Korrosionsbeständigkeit aufweisen sollten wie das Werkstück (z.B. kein Einsatz von Bürsten aus ferritischem nichtrostendem Stahl auf Austeniten)
- Als Vorsichtsmaßnahme während Verarbeitung und Montage ist es ratsam, nach Schneidvorgängen scharfkantige Grate zu entfernen.
- Die Anforderungen an den Oberflächenschutz während des Transports sind zu beachten.

10.3 Formgebung

Austenitische nichtrostende Stähle weisen eine erhebliche Verfestigung beim Kaltumformen auf. Diese Eigenschaft kann sowohl nützlich sein, wenn beim Formrecken große Verformungen ohne Gefahr vorzeitiger Rissbildung ermöglicht werden, als auch nachteilig, besonders während der maschinellen Bearbeitung,

wenn besondere Schnittvorschubgeschwindigkeiten gefordert sind. Das Maß der Verfestigung variiert bei unterschiedlichen Stahlsorten, zum Beispiel liegt das Maß der Verfestigung bei der Sorte 1.4318 höher als bei anderen im Bauwesen verwendeten Stahlsorten.

10.3.1 Schneiden

Verglichen mit anderen Werkstoffen ist nichtrostender Stahl ein relativ teurer Werkstoff. Es gilt daher, unnötigen Verschnitt zu vermeiden und die Bleche optimal auszunutzen. Erhöhter Verschnitt kann anfallen, wenn das Material gerichtete Schlitze (oder richtungsgebundene Muster) aufweist, die während der Verarbeitung beibehalten werden müssen. Aufgebrachte Markierungen sind erfahrungsgemäß schwer zu entfernen oder hinterlassen Verfärbungen, wenn sie statt auf die Schutzfolie direkt auf der Oberfläche vorgenommen werden; es sollte daher überprüft werden, ob die Marker auch leicht und ohne Rückstände zu entfernen sind.

Nichtrostender Stahl kann mit den meisten üblichen Verfahren getrennt werden, z.B. durch Schneiden und Sägen, allerdings sind die erforderlichen Kräfte aufgrund des Verfestigungsverhaltens größer als bei Baustahl. Nach Möglichkeit sollte der Zuschnitt (wie die Bearbeitung im Allgemeinen) in weichgeglühtem Zustand erfolgen, um Verfestigungseffekte zu begrenzen und die Werkzeugabnutzung zu verringern.

Für gerade Schnitte ist der Einsatz von Schneidmaschinen üblich. Bei Schneidmaschinen mit offenen Rändern kann ein Schnitt erzeugt werden, der länger ist als die Schneidblätter, obgleich hierbei das Risiko kleiner Versprünge in den Schnittkanten besteht.

Plasma-Lichtbogen-Techniken kommen ebenfalls zum Einsatz. Sie sind beim Schneiden von dicken Blechen und Profilen sinnvoll, bei denen die Schnittkanten ohnehin nachbehandelt werden müssen, z.B. im Rahmen der Schweißnahtvorbereitung. Brennschneiden ist beim Zuschneiden von nichtrostenden Stählen ungünstig, es sei denn, es wird Pulverbrennschneiden verwendet.

10.3.2 Kaltumformen

Nichtrostender Stahl wird durch die gängigen Kaltumformtechniken wie Biegen, Walzprofilieren, Kanten und Tiefziehen vorgeformt. Im Bauwesen ist das Abkanten die am häufigsten angewandte Technik. Bei dünnwandigen Serienerzeugnissen ist das Rollprofilieren oft wirtschaftlicher.

Wie bereits erwähnt, sind die erforderlichen Kräfte bei nichtrostenden Stählen aufgrund der Verfestigungseigenschaften größer als bei Baustählen (um etwa 50% bei Austeniten und noch mehr bei Duplex-Stählen). Auch müssen nichtrostende Stähle stärker überbogen werden als Baustähle, um Rückfederungseffekte zu berücksichtigen. Bei komplexen Profilgeometrien ist es oft ratsam, den Verarbeitungsbetrieb so früh wie möglich in den Entwurf mit einzubeziehen.

Die hohe Duktilität von nichtrostenden Stählen lässt kleine Biegeradien zu, die etwa der halben Dicke des geblühten Materials entsprechen können. Jedoch wird im Allgemeinen empfohlen, mindestens folgende Innenradien anzusetzen:

2t bei Austeniten
2,5t bei Duplex-Stählen

wobei t die Materialdicke ist.

Zum Biegen von Rohren können folgende Hinweise gemacht werden:

- das Verhältnis zwischen Außendurchmesser des Rohres und der Wanddicke sollte kleiner sein als 15 (um kostspielige Werkzeuge zu vermeiden).
- der Biegeradius (zur Schwerachse des Rohres) sollte nicht kleiner sein als $2,5d$ mit d als dem Außendurchmesser
- die Schweißnaht sollte nahe der neutralen Faser liegen, um Biegespannungen in der Schweißnaht so klein wie möglich zu halten.

10.3.3 Löcher

Löcher können gebohrt oder gestanzt werden. Beim Bohren muss formschlüssig geschnitten werden, um Verfestigungen zu vermeiden, was scharfe Bohraufsätze, korrekte Anstellwinkel und korrekte Schneidgeschwindigkeiten erfordert. Von der Verwendung eines Körners wird abgeraten, da dies die Oberfläche verfestigt. Vielmehr sollte ein Zentrierbohrer verwendet werden oder aber, falls ein Körner zum Einsatz kommen soll, eine Ausführung mit dreiseitiger Zuspitzung. Gestanzte Löcher eignen sich bei Austeniten bis zu einer Dicke von 20 mm; die höhere Festigkeit von Duplex-Stählen führt zu kleineren Grenzdicken. Der minimale stanzbare Lochdurchmesser liegt bei 2 mm über der Blechdicke. Gestanzte Löcher sind unter korrosionfördernden Umweltbedingungen aufgrund der verfestigten Lochkante zu vermeiden.

10.4 Schweißen

10.4.1 Einleitung

Das Schweißen von Austeniten und Duplex-Stählen wird überwiegend erfolgreich unter Anwendung der bekannten Verfahren durchgeführt, vorausgesetzt dass geeignete Zusätze verwendet werden. Allgemein ist Sauberkeit wichtig für eine gute Schweißnahtqualität. Öle oder andere Kohlenwasserstoffe und Wachsmarkierungen sind wegen ihrer möglichen Aufspaltung und somit dem Risiko der Bildung von Kohlenstoffverbindungen zu entfernen. Die Naht sollte frei sein von Zink, einschließlich solchem aus galvanisierten Produkten, sowie Kupfer und seinen Legierungen. (Mit Schweißbadsicherungen aus Kupfer ist sorgfältig umzugehen; eine Kerbe sollte in der Schiene unmittelbar an das Schweißbad angrenzend vorgesehen sein.)

Im Vergleich zu Baustählen ist es bei nichtrostenden Stählen wichtiger, Spalte zu vermeiden, in denen Spaltkorrosion auftreten könnte (siehe Abschnitt 3.7.2). Schweißnahtfehler wie Einbrandkerben, mangelhafte Durchschweißung, Schweißspritzer, Schlacke und Verzunderung sind hier potentielle Ursachenherde und somit zu minimieren.

Ist das Erscheinungsbild der Schweißnaht entscheidend, so sollte der Tragwerksplaner den Zustand des fertig geschweißten Profils und die erforderliche Oberflächenausführung entsprechend spezifizieren. Dies kann das gewählte Schweißverfahren sowie die Nachbehandlung der Schweißnaht beeinflussen. Schweißnähte sind so zu legen, dass sie auch für die erforderliche Nachbehandlung zugänglich sind.

Wärmeeinbringung und Temperatur müssen kontrolliert werden, um Verzug (siehe Abschnitt 10.4.4) und eventuell unerwünschte Gefügeveränderungen zu vermeiden (siehe Abschnitt 10.4.5).

Schweißen ist entsprechend eines qualifizierten Schweißprozesses gemäß einer Norm wie EN ISO 15609-1 *Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe, Schweißanweisung, Lichtbogenschweißen* durchzuführen. Die Schweißer müssen gemäß EN 287-1 *Prüfung von Schweißern – Schmelzschweißen, Stähle* qualifiziert sein. Die Schweißverfahren enthalten folgende Elemente:

- Den Eignungsnachweis der Schweißmethode durch detaillierte Beschreibung der Herkunft und der Prüfungsanforderungen der Schweißverfahren,
- die Qualifikation der Schweißer,
- die Kontrolle des Schweißablaufs während der Nahtvorbereitung, des Schweißens selbst und der Nahtnachbehandlung,
- den Grad der Inspektion und die durchzuführenden, zerstörungsfreien Prüfungen,
- die Abnahmekriterien hinsichtlich der zulässigen Höhe von Nahtfehlern.

Bei Einhaltung der vorgesehenen Verfahren ist eine problemlose Verarbeitung zu erwarten. Jedoch sollte sich der Ingenieur stets bewusst sein, dass Schweißverzug bei nichtrostenden Stählen im Allgemeinen größer ist als bei Baustählen, siehe 10.4.4.

Sicherungsschweißung zwischen Mutter und Schrauben sind unzulässig, da die Werkstoffe für ihre Festigkeit, nicht aber für ihre Schweißeignung ausgelegt wurden.

10.4.2 Verfahren

Wie bereits oben erwähnt, können die bekannten Fügemethoden bei nichtrostenden Stählen angewendet werden. Tabelle 10.1 zeigt die Eignung unterschiedlicher Verfahren in Abhängigkeit der Materialdicke etc. Bei MIG oder WIG- Schweißen sollte das Schutzgas wegen möglicher Aufspaltung, die zur Anreicherung mit Kohlenstoff führt, kein Kohlendioxid enthalten und bei Duplex-Stählen ist Stickstoff zu vermeiden.

Tabelle 10.1 Schweißverfahren und ihre Eignung

Schweißverfahren (EN ISO 4063)	Geeig- nete Produkt- form	Verbin- dungs- arten	Material- dicken	Schweiß- lagen	Geeignete Werkstatt- /Baustellen- Bedingungen
111 Metalllichtbogen- schweißen mit umhüllter Elektrode (Lichtbogenhand- schweißen)	Jede außer Blech	Jede	3 mm ⁽¹⁾ oder größer	Jede	Jede
131 Metall-Inertgas (MIG)	Jede	Jede	2 mm ⁽¹⁾ oder größer	Jede	Jede
141 Wolfram-Inertgas (WIG)	Jede	Jede	Up to 10 mm maximum	Jede	Jede ⁽²⁾
121/122 Unterpulverschweißen	Jede außer Blech	Jede	3 mm ⁽¹⁾ oder größer	nur Normal- lagen	Jede
2 Widerstandsschweißen	nur Blech	Jede	ungefähr 3 mm maximal	Jede	Jede

Anmerkung:

1) Hängt von der Art der Schweißnaht ab.

2) Ist anfälliger gegen Witterungseinflüsse als andere Verfahren, so dass entsprechend Schutzmaßnahmen getroffen werden müssen.

10.4.3 Zusatzwerkstoffe

Handelsübliche Zusatzwerkstoffe sind so beschaffen, dass sie Schweißungen mit äquivalenter Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit wie das Grundmaterial ergeben und das Risiko der Erstarrungsrissebildung minimieren. Bei speziellen Anwendungsfällen, z.B. unter ungewöhnlich aggressiven Umgebungsbedingungen oder bei Forderung unmagnetischer Eigenschaften, sollten der Stahlhersteller und der Produzent des Zusatzwerkstoffs konsultiert werden. Alle Zusatzwerkstoffe sind vor Verunreinigungen zu schützen und entsprechend der Instruktionen des Herstellers zu lagern.

Alle Schweißzusatzwerkstoffe müssen den Anforderungen von EN 1090-2 entsprechen.

10.4.4 Schweißverzug

Nichtrostender Stahl erleidet wie andere Metalle infolge des Schweißvorgangs Verzug. Die Verwerfungsarten (Verkrümmungen, Schrumpfen etc.) sind in ihrer Art denen von Konstruktionsteilen aus Baustahl sehr ähnlich. Jedoch ist der Verzug bei nichtrostenden Stählen, besonders bei Austeniten, aufgrund des höheren Ausdehnungskoeffizienten und der geringeren Wärmeleitfähigkeit (was zu steileren Temperaturgradienten führt) größer als bei Baustahl, siehe Abschnitt 3.3.

Schweißverzug kann nur begrenzt, aber nicht vollständig vermieden werden. Nachfolgende Vorkehrungen können durch den Tragwerksplaner und den Verarbeitungsbetrieb getroffen werden:

Vorkehrungen durch den Tragwerksplaner

- Schweißverbindungen konstruktiv vermeiden,
- Häufigkeit von Schweißungen minimieren,
- Verkleinerung der Nahtflächen, z.B. durch Doppel-V-, U- oder Doppel-U-Nahtvorbereitungen bei dicken Querschnitten anstelle von einfachen V-Nahtvorbereitungen,
- Vorsehen symmetrischer Verbindungen,
- Einplanung großzügigerer Toleranzen bei der Dimensionierung.

Vorkehrungen des Verarbeitungsbetriebs

- Einsatz wirksamer Einspannvorrichtungen. Nach Möglichkeit sollten diese unter anderem aus Kupfer- oder Aluminiumleisten bestehen, die dazu beitragen, die Hitze aus dem Schweißnahtbereich abzuleiten.
- Ist wirkungsvolles Einspannen nicht möglich, können unterbrochene Heftschweißungen in regelmäßiger Folge zum Einsatz kommen.
- Es ist sicherzustellen, dass vor der Schweißung gute Passgenauigkeit und Ausrichtung erzielt werden.
- Die Wärmeeinbringung ist, soweit bei dem jeweiligen Schweißverfahren möglich, zu begrenzen.
- Optimale Schweißfolge beachten (z.B. Blockschweißungsfolgen).

10.4.5 Metallurgische Betrachtungen

Außer für einige entscheidenden Faktoren ist es an dieser Stelle nicht möglich, die Metallurgie von nichtrostenden Stählen vollständig abzuhandeln.

Bildung von Ausscheidungen bei austenitischen nichtrostenden Stählen

Bei austenitischen Stählen ist die Wärmeeinflusszone relativ resistent gegenüber Kornvergrößerung und dem Ausfällen spröder intermetallischer Phasen. Der Schweißvorgang ist üblicherweise so organisiert, dass der Verbleib im kritischen Temperaturbereich (450 - 900°C) begrenzt wird. Übermäßig viele Schweißreparaturen erhöhen natürlich die Zeitdauer, daher sollten drei Reparaturschweißungen nicht überschritten werden.

Die Bildung von Chromkarbid-Ausscheidungen und damit auch ein gewisser Verlust an Korrosionsbeständigkeit wird in 3.7.2 *Interkristalline Korrosion* diskutiert, wo dargestellt wird, dass bei Austeniten mit geringem Kohlenstoffgehalt normalerweise keine Probleme auftreten (z.B. 1.4307 und 1.4404). Allerdings können Schweißversprödungseffekte bei Standardkohlenstoffstahlgüten in Verbindung mit geschweißten Konstruktionen mit Blechdicken größer als 10 mm beobachtet werden.

Erstarrungsrissbildung bei austenitischen Stahlsorten

Erstarrungsrisse bei Schweißnähten können vermieden werden, wenn der Schweißnahtaufbau einen Ferritanteil von annähernd 5% aufweist. Die Stahlhersteller stimmen Zusammensetzung und Wärmebehandlung der gebräuchlichen Stahlsorten so aufeinander ab, dass sie im Lieferzustand nahezu kein Ferrit enthalten, aber beim Autogenschweißen (d.h. beim Schweißen ohne Zusatzwerkstoffe) genügend Ferrit bilden. Dennoch ist es auch beim Autogenschweißen ratsam, Wärmeeinbringung, Zwischenlagentemperatur und sonstige potentiell qualitätsmindernde Faktoren zu minimieren, um die Rissbildungswahrscheinlichkeit zu verringern. Bei größeren Wandstärken werden Schweißzusatzwerkstoffe hinzugefügt, wobei qualitativ hochwertige Zusätze zusätzlich dazu beitragen, dass sich der entsprechende Ferritgehalt einstellt. Normalerweise ist es nicht notwendig, den genauen Ferritgehalt messtechnisch zu erfassen; entsprechende Schweißverfahren und Zusatzwerkstoffe stellen in der Regel sicher, dass Erstarrungsrisse nicht auftreten.

Versprödung von Duplex-Stahlsorten

Duplex-Stähle sind gegenüber der 475°C und der σ -Phasen-Versprödung empfindlich. Ersteres stellt sich ein, wenn die Stahltemperatur im Bereich zwischen 550°C und 400°C gehalten oder innerhalb dieser Grenzen langsam heruntergefahren wird, was zu höherer Zugfestigkeit und Härte aber auch zur Abnahme von Duktilität und Kerbschlagzähigkeit führt. Letzteres kann sich nach langem Halten, aber auch schon (abhängig von der Zusammensetzung und dem thermomechanischen Zustand des Stahls) nach etwa einer halber Stunde im Temperaturbereich zwischen 565°C und 900°C einstellen. Die Effekte infolge der σ -Phasen-Versprödung sind bei Raumtemperatur am größten. Beide Arten der Versprödung haben nachteilige Auswirkungen auf Korrosionsbeständigkeit und Zähigkeit.

Sowohl die 475°C- als auch die σ -Phasen-Versprödung können durch genaue Einhaltung der Verfahrensschritte begrenzt werden; als maximale Zwischenlagentemperatur wird 200°C vorgeschlagen. Beim Schweißen von schweren, kompakten Querschnitten ist besondere Sorgfalt angebracht.

Um Versprödungen zu vermeiden, wird von langem Halten bei Temperaturen über 300°C abgeraten.

10.4.6 Nachbehandlung

Bei Konstruktionen ist Schweißen die sowohl technisch wie wirtschaftlich beste Verbindungsart. Wie in den folgenden Abschnitten diskutiert wird, ist eine Nachbehandlung im Allgemeinen notwendig, besonders dann, wenn Lichtbogenschweißverfahren zum Einsatz gekommen sind. Um das geeignetste Verfahren auszuwählen und die entstehenden Kosten zu minimieren, ist es wichtig, die geforderten Nachbehandlungsmethoden bereits im Vorfeld festzulegen. Abschnitt 10.6 enthält Oberflächenausführungen zu allen geläufigen Verarbeitungsarten.

Die am häufigsten angewandten Verfahren sind Bürsten und Schleifen. Der nachzubearbeitende Bereich ist durch den Verarbeitungsbetrieb zu minimieren und nach Möglichkeit auf Bürsten zu beschränken, damit die durchs Schleifen erzeugte Hitze die Korrosionsbeständigkeit nicht beeinträchtigt. Es ist zu bemerken, dass die Bürsten aus nichtrostendem Stahl hergestellt sein sollten (siehe Abschnitt 10.2).

Jegliche Spuren von Anlauffarben sollten nach Möglichkeit entfernt werden. Allerdings können gelbliche Verfärbungen hinnehmbar sein, wenn die verwendete Stahlsorte hinsichtlich ihrer Korrosionsbeständigkeit, gemessen an den vorliegenden Einsatzbedingungen, deutlich auf der sicheren Seite liegt. Ist dies nicht der Fall oder sind Verfärbungen aus ästhetischen Gründen nicht akzeptabel, können sie durch Beizen oder Glasperlenstrahlen entfernt werden. Beizen kann durch Tauchen oder durch den Einsatz von Pasten entsprechend der Herstelleranweisung durchgeführt werden.

Das Strahlen der Schweißnahtoberfläche (mit Strahlgut ohne Eisenanteil) ist eine günstige Nachbehandlungsart. Hierdurch werden Druckspannungen in die Oberfläche eingetragen, was die Ermüdungsfestigkeit, die Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion und das ästhetische Erscheinen verbessert. Jedoch können diese verbesserten Eigenschaften nicht auch dazu herangezogen werden, die Ermüdungsbeständigkeit höher einzustufen.

Das Entfernen von Metall durch spanende Bearbeitung erhöht in der Regel Eigenspannungen und somit auch den Verzug bei geschweißten Konstruktionen. Falls der Verzug die geometrischen Toleranzen überschreitet, wird ein Warmrichten der Bauteile erforderlich. Allgemein ist Warmrichten aber nur bei kleineren Bauteilen praktikabel und auch dort nur für Stahlsorten mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, die weniger anfällig für Sensibilisierung sind (siehe Abschnitt 3.7.2) wie z.B. die Stähle 1.4307 und 1.4404 oder stabilisierte Sorten wie 1.4541 und 1.4571.

10.4.7 Schweißnahtprüfung

Tabelle 10.2 enthält die gebräuchlichsten Prüfungsverfahren bei Schweißungen aus nichtrostendem Stahl und Baustahl.

Die Methoden kommen in Abhängigkeit vom geforderten Grad der Lastbeanspruchung und Korrosionsbeständigkeit zur Anwendung. Jedoch sollten während des Schweißprozesses visuelle Prüfungen durchgeführt werden, da hierdurch viele Probleme bei der weiteren Verarbeitung vermieden werden können. Untersuchungen der Oberflächen sind bei nichtrostenden Stählen wichtiger als bei Baustählen, da nichtrostender Stahl überwiegend bei korrosiven Einflüssen eingesetzt wird und schon ein kleiner Oberflächenfehler die Anfälligkeit gegenüber korrosivem Angriff erhöhen kann.

Tabelle 10.2 Prüfverfahren für Schweißnähte

Art der zerstörungsfreien Prüfung	Austenitische nichtrostende Stähle	Duplex-Stähle	Baustähle
Oberflächig	Optisch DPI	Optisch DPI MPI	Optisch DPI MPI
Volumetrisch	Röntgenstrahlen Gammastrahlen	Röntgenstrahlen Gammastrahlen	Röntgenstrahlen Gammastrahlen Ultraschall

Farbeindringprüfung (DPI – Dye penetrant inspection)
Magnetpulveruntersuchung (MPI – Magnetic particle inspection)

Die Magnetpulveruntersuchung ist bei Austeniten nicht anwendbar, da diese nicht magnetisch sind. Ultraschallverfahren sind für die Prüfung von Schweißnähten nur eingeschränkt geeignet, da ihre Ergebnisse schwierig zu interpretieren sind können, jedoch lassen sie sich durchaus auf das Ausgangsmaterial anwenden. Radiographie eignet sich nicht zum Finden von Rissen oder Bindefehlern bei nichtrostenden Stählen mit Materialdicken kleiner als 10 mm.

10.5 Verschleiß und Anfressungen

Werden Oberflächen unter gegenseitiger Reibbewegung zueinander aufeinander gedrückt, können infolge örtlichen Festhaftens und Oberflächenbruch Verschweißungen auftreten. In einigen Fällen hat dies schweißähnliche Verklebungen und ein Anfressen zur Folge. Folgende Vorkehrungen können das Risiko des Fressens vermindern.

- Verwendung unähnlicher nichtrostender Standardstahlarten (d.h. von Stählen, die sich in ihrer Zusammensetzung, Verfestigungsgeschwindigkeit und Härte unterscheiden). Zum Beispiel können Stähle der Klassen A2 und C2, A4 und C4 oder A2 und A4 sowie Schrauben-Mutter-Kombination gemäß EN ISO 3506 verwendet werden,
- erforderlichenfalls Einsatz einer speziellen, hochfesten Legierung für eine Komponente oder Oberflächenhärte,
- Verwendung von Gleitmitteln, die dem Fressen entgegenwirken.

Es ist darauf zu achten, dass im Fall von Mischverbindungen oder Beschichtungen sichergestellt sein muss, die geforderte Korrosionsbeständigkeit der Gesamtkonstruktion zu erhalten. Das Einfetten von Schrauben kann hilfreich sein, es kann aber auch Verunreinigungen begünstigen und Probleme bei der Lagerung darstellen.

Es wird empfohlen, kaltverfestigtes Schraubenmaterial mindestens in Festigkeitsklasse 70 zu wählen (siehe Tabelle 3.3). Das Schraubenmaterial sollte aufgrund der Gefahr des Fressens nicht in weichgeglühtem Zustand eingesetzt werden. Die Wahrscheinlichkeit des Fressens wird gesenkt, wenn gewalzte anstelle von geschnittenen Gewinden eingesetzt und enge Gewindegänge und passgenaue Gewinde vermieden werden.

10.6 Nachbearbeitung

Die Oberflächengüte von nichtrostenden Stählen ist ein wichtiges Entwurfskriterium und ist entsprechend der architektonischen oder funktionellen Eigenschaften eindeutig festzuschreiben. Je hochwertiger der Oberflächenzustand sein soll, desto höher sind die Kosten. Dabei zahlt es sich aus, bereits in

vorgelagerten Schritten, z.B. bei der Lagerung und beim Schweißen, die Oberflächen zu schützen. Arbeitsökonomische Konstruktion ist der Schlüssel zur Kostenreduzierung. Wird zum Beispiel bei einem Geländer, das aus zwei Rohren besteht, die Schweißverbindung zwischen den Rohrenden verdeckt innerhalb einer Stütze positioniert, vermindern sich die Bearbeitungskosten bei gleichzeitiger Verbesserung des Erscheinungsbildes.

Die Stahloberfläche sollte wieder in ihren ursprünglichen korrosionsbeständigen Zustand gebracht werden, indem Anlauffarben und Fremdeisen entfernt werden. Säurebeizen entfernt Zunder oder lockert ihn soweit, dass er abgeschliffen werden kann, und löst auch eingeschlossene Eisen- oder Kohlenstoffstahlpartikel.

Abrasive Behandlungen wie Schleifen oder Polieren führen zu gerichteten Schliffbildern, so dass sich der optisch nahtlose Übergang zwischen nachbehandelter Schweißnaht einerseits und Blech oder Rohr mit werksseitiger Oberfläche andererseits schwierig gestalten kann. Die geeignete Oberflächenbehandlungstechnik muss ggf. durch Versuche ermittelt werden.

Durch elektrolytisches Polieren wird eine dünne Oberflächenschicht entfernt. Es kann eine ganze Bandbreite von matten bis hochglänzenden Oberflächenbeschaffenheiten erzielt werden, was zum Großteil von der ursprünglichen Materialoberfläche abhängt.

Es existieren weitere Verfahren der Oberflächenbehandlung (elektrolytischer Auftrag, metallische Überzüge, Polieren, Ätzen, Färben und Schwärzen), die jedoch im Bauwesen nur selten zum Einsatz kommen, und auf die deswegen hier nicht weiter eingegangen werden soll.

Besonders wird an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die Oberfläche im montierten Zustand frei von jeglichen Fremdeisen-Verunreinigungen sein muss. Besondere Beachtung muss der möglichen Verunreinigung aufgrund von Stahlbauarbeiten in unmittelbarer Nachbarschaft geschenkt werden, insbesondere, wenn dabei Schleifstaub anfällt. Entweder ist der nichtrostende Stahl durch eine geeignete abziehbare Plastikfolie zu schützen oder es sollte in den Vertragsunterlagen eine Schlussreinigung nach Fertigstellung vereinbart werden.

APPENDIX A ZUORDNUNG DER BEZEICHNUNGEN VON NICHTROSTENDEN STÄHLEN

Tabelle A.1 enthält die Zuordnungen zwischen den Bezeichnungen der EN 10088 und den deutschen, britischen, französischen, italienischen, schwedischen und US-Bezeichnungen.

Tabelle A.1 Zuordnung der unterschiedlichen Bezeichnungen für nichtrostende Stähle (nach europäischen und früheren nationalen Normen)

Stahlsorte gemäß EN 10088		Deutschland (DIN)		UK	Frankreich	Italien	Schweden	Spanien	USA	
Name	Nr	Name	Nr.	BSI	AFNOR	UNI	SIS	UNE	AISI	UNS
X5CrNi18-10	1.4301	X5 CrNi 18 10	1.4301	304 S 15 304 S 16 304 S 31	Z 6 CN 18-09	X5 CrNi 18 10	2332 2333	3504	304	S 30400
X2CrNi19-11	1.4306	X2 CrNi 19 11	1.4306	304 S 11	Z 2 CN 18-10	X2 CrNi 18 11	2352	3503	304 L	S 30403
X2CrNi18-9	1.4307	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X6CrNiTi18-10	1.4541	X6 CrNiTi 18 10	1.4541	321 S 31	Z 6 CNT 18-10	X6 CrNiTi 18 11	2337	3523	321	S 32100
X5CrNi Mo17-12-2	1.4401	X5CrNiMo 17 12 2	1.4401	316 S 31	Z 6 CND 17-11	X5 CrNiMo 17 12	2347	3534	316	S 31600
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	X2CrNiMo 17 13 2	1.4404	316 S 11	Z 2 CND 17-12	X2 CrNiMo 17 12	2348	3533	316L	S 31603
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	X2 CrNiMo 18 14 3	1.4435	316 S 13	Z 2 CND 17-13	X2 CrNiMo 17 13	2353	3533	316 L	S 31603
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	X1 NiCrMoCuN 25 20 5	1.4539	-	Z 1 CNDU 25-20	-	2562	-	904 L	N 08904
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	X6 CrNiMoTi 17 12 2	1.4571	320 S 31	Z 6 CNDT 17-12	X6 CrNiMoTi 17 12	2350	3535	316 Ti	S 31635
X2CrNi18-10	1.4311	X2 CrNiN 18 10	1.4311	304 S 61	Z 2 CN 18-10 Az	-	2371	-	304 LN	S 30453
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	X2 CrNiMoN 17 12 2	1.4406	316 S 62	Z 2 CND 17-12 Az	-	-	-	316 LN	S 31653
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	X2 CrNiMoN 17 13 5	1.4439	-	-	-	-	-	317 LMN	S 31726
X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	X1 NiCrMoCuN 25 20 6	1.4529	-	-	-	-	-	-	-
X2CrNi18-7	1.4318	X2 CrNiN 18 7	1.4318	-	-	-	-	-	301 LN (302 LN)	-
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	X2 CrNiMoN 22 5 3	1.4462	Duplex 2205	Z 2 CND 22-5 Az	-	2377	-	-	S 31803

APPENDIX B BIEGEDRILLKNICKEN

B.1 Allgemeiner Fall

Das ideal-elastische Biegedrillknickmoment M_{cr} , ist bei einem Träger mit gleichbleibendem Querschnitt:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right)$$

hierin ist:

C_1 , C_2 und C_3 jeweils ein Beiwert, der Belastung und Lagerungsbedingungen berücksichtigt, siehe Tabelle B.1 und B.2.,

I_t das Torsionsflächenmoment 2. Grades,

I_w das Wölbflächenmoment 2. Grades,

I_z das Flächenmoment 2. Grades bezüglich der schwachen Achse,

k_z und k_w jeweils der effektive Längenbeiwert,

L die Trägerlänge zwischen seitlichen Festhaltungen,

$z_g = z_a$ & z_s ,

z_a der Abstand des Angriffspunkts der Querbelastung,

z_s der Abstand zum Schubmittelpunkt,

$$z_j = z_s - \frac{\int z (y^2 + z^2) dA}{2 I_y}.$$

Bei der Berechnung von z_j wird das Maß z für den Druckflansch negativ; z_j wird positiv, wenn der Flansch mit dem größeren Wert für I_z an der Stelle des größten Biegemoments im Druckbereich liegt. Es wird angemerkt, dass für Querschnitte mit gleichen Flanschen einschließlich aller gleichflanschigen U- und Z-Profile $z_j = 0$ gilt.

Bei Lasten in Richtung der positiven z -Achse ist z_g negativ, wenn der Lastangriff oberhalb des Schubmittelpunkts liegt. Allgemein kann gesagt werden, dass z_g bei Lasten, die durch den Schubmittelpunkt weisen, negativ ist. Es soll hier angemerkt sein, dass bei seitlicher Halterung der Last $z_g = 0$ gilt.

Die Längenbeiwerte k_z und k_w liegen zwischen 0,5, für beidseitig volle Einspannung, und 1,0, für beidseitig gelenkige Lagerung, mit 0,7, für gelenkige Lagerung auf der einen und eingespannt auf der anderen Seite. Die normalen Randbedingungen lauten:

$$k_z = k_w = 1,0$$

- seitlich gehalten, in der Belastungsebene frei verdrehbar
- Verdrehungen um die Längsachse behindert, nicht wölbbehindert

Der Beiwert k_z bezieht sich auf die Endverdrehungen in der Belastungsebene und ist analog zum Verhältnis l/L bei Druckgliedern. Der Beiwert k_w erfasst die

Endverwölbungen. Werden keine besonderen Maßnahmen der Wölbbehinderung getroffen, so ist k_w mit 1,0 anzusetzen.

Tabelle B.1 Werte für C_1 und C_3 bezogen auf die Beiwerte für die effektive Länge k_z : Belastung durch Randmomente

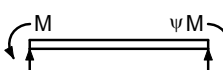
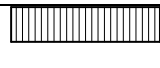
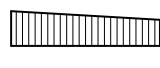
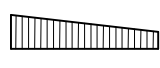
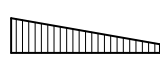





Randmomente und Lagerungsbedingungen	Momentenverlauf	Wert k_z	Beiwerte		
			C_1	C_3	
				$\psi_f \leq 0$	$\psi_f > 0$
	 $\psi = +1$	1,0	1,00	1,000	
		0,5	1,05	1,019	
	 $\psi = +3/4$	1,0	1,14	1,000	
		0,5	1,19	1,017	
	 $\psi = +1/2$	1,0	1,31	1,000	
		0,5	1,37	1,000	
	 $\psi = +1/4$	1,0	1,52	1,000	
		0,5	1,60	1,000	
	 $\psi = 0$	1,0	1,77	1,000	
		0,5	1,86	1,000	
	 $\psi = -1/4$	1,0	2,06	1,000	0,850
		0,5	2,15	1,000	0,650
	 $\psi = -1/2$	1,0	2,35	1,000	$1,3 - 1,2\psi_f$
		0,5	2,42	0,950	$0,77 - \psi_f$
	 $\psi = -3/4$	1,0	2,60	1,000	$0,55 - \psi_f$
		0,5	2,57	0,850	$0,35 - \psi_f$
 $\psi = -1$	1,0	2,60	$-\psi_f$	$-\psi_f$	
	0,5	2,45	$0,125 - 0,7\psi_f$	$-0,125 - 0,7\psi_f$	

Tabelle B.2 Werte für C_1 , C_2 und C_3 bezogen auf die Beiwerte für die effektive Länge k_z ; Arten der Querbelastung

Belastungs- und Lagerungsbedingungen	Momentenverlauf	Wert k_z	Beiwerte		
			C_1	C_2	C_3
		1,0	1,12	0,45	0,525
		0,5	0,97	0,36	0,478
		1,0	1,35	0,59	0,411
		0,5	1,05	0,48	0,338
		1,0	1,04	0,42	0,562
		0,5	0,95	0,31	0,539

Es soll hier angemerkt werden, dass die Tabellen B.1 und B.2 nur im Fall einfachsymmetrischer Profile gelten mit $-0,9 \leq \psi_f \leq 0,9$,

wobei $\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}}$ ist.

hierin ist:

I_{fc} das Flächenmoment 2. Grades des Druckflanschs bezogen auf die schwache Querschnittsachse,

I_{ft} das Flächenmoment 2. Grades des Zugflanschs bezogen auf die schwache Querschnittsachse,

$\psi_f = 0$ bei doppelt symmetrischen Querschnitten,

$\psi_f > 0$ bei einfach symmetrischen Querschnitten, wenn der größere Flansch gleich dem Druckflansch ist,

$\psi_f < 0$ bei einfach symmetrischen Querschnitten, wenn der kleinere Flansch der Druckflansch ist.

Folgende Näherungen für z_j können verwendet werden:

$$z_j = 0,8\psi_f \frac{h_s}{2} \quad \text{für } \psi_f \geq 0,$$

$$z_j = \psi_f \frac{h_s}{2} \quad \text{für } \psi_f < 0.$$

wobei

h_s der Abstand zwischen den Schubmittelpunkten der Flansche ist.

B.2 Sonderfälle

B.2.1 Doppelsymmetrische Querschnitte

Das elastische kritische Moment für Biegedrillknicken eines Trägers mit gleichbleibendem, symmetrischem Querschnitt mit gleichen Flanschen ergibt sich mit $z_j=0$ zu:

$$M_{\text{cr}} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left(\left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - C_2 z_g \right)$$

Bei Belastung durch Randmomente und Querlasten mit Lastangriff im Schubmittelpunkt ist $C_2 z_g = 0$. In diesen Fällen gilt:

$$M_{\text{cr}} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left[\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{1/2}$$

Unter normalen Lagerungsbedingungen an beiden Enden ist $k_z = k_w = 1,0$:

$$M_{\text{cr}} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \left[\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{1/2}$$

APPENDIX C MATERIALWERTE ZUR BERECHNUNG VON VERFORMUNGEN

Der Sekantenmodul E_S zur Berechnung der Verformungen (siehe Abschnitt 5.4.6) ist für das Bauteil in Hinblick auf die Ausrichtung der Walzrichtung festzustellen. Ist die Ausrichtung unbekannt, so ist der Wert für die Längsrichtung einzusetzen.

Der Sekantenmodul kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$E_S = (E_{S1} + E_{S2})/2$$

hierin ist:

E_{S1} der Sekantenmodul bezogen auf den Zugflansch,

E_{S2} der Sekantenmodul bezogen auf den Druckflansch.

Die Sekantenmoduli E_{S1} und E_{S2} zur jeweiligen Ausrichtung und Spannung infolge Gebrauchslasten können mit folgender Gleichung abgeschätzt werden, indem die Konstanten der Tabelle C.1 eingesetzt werden. Alternativ können für die Stahlsorten 1.4301, 1.4401 und 1.4462 die Werte der Tabelle C.2 entnommen werden und wenn nötig linear interpoliert werden.

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left(\frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{mit } i = 1,2$$

hierin ist:

$\sigma_{i,Ed,ser}$ die Spannung im Zug- oder Druckflansch infolge Gebrauchslasten

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Als Vereinfachung kann die Variation von E_S entlang dem Bauteil vernachlässigt und der sich ergebende Minimalwert für E_S (bezogen auf die Maximalwerte für σ_1 und σ_2 im Bauteil) für das gesamte Bauteil angesetzt werden.

Tabelle C.1 Konstanten zur Bestimmung des Sekantenmoduls

Stahlsorte	f_y N/mm ²	n	
		Längsrichtung	Querrichtung
1.4301	210		
1.4307	200		
1.4541	200	6,0	8,0
1.4318	330		
1.4401	220		
1.4404	220	7,0	9,0
1.4571	220		
1.4362	400	5,0	5,0
1.4462	460		

Tabelle C.2 Sekantenmodul zur Berechnung der Verformungen für die Stahlsorten 1.4301, 1.4401 und 1.4462

Sekantenmodul (kN/mm ²)					
Spannungs- verhältnis (σ/f_y)	Grade 1.4301		Grade 1.4401		Grade 1.4462
	Längsrichtung	Querrichtung	Längsrichtung	Querrichtung	Beide Richtungen
0,00	200	200	200	200	200
0,20	200	200	200	200	200
0,25	200	200	200	200	199
0,30	199	200	200	200	199
0,35	199	200	199	200	197
0,40	198	200	199	200	196
0,42	197	199	198	200	195
0,44	196	199	197	199	194
0,46	195	199	197	199	193
0,48	194	198	196	199	191
0,50	192	198	194	199	190
0,52	190	197	193	198	188
0,54	188	196	191	197	186
0,56	185	195	189	197	184
0,58	183	194	187	195	182
0,60	179	192	184	194	180
0,62	176	190	181	192	177
0,64	172	187	178	190	175
0,66	168	184	174	188	172
0,68	163	181	170	185	169
0,70	158	177	165	181	165
0,72	152	172	160	177	162
0,74	147	167	154	172	159
0,76	141	161	148	166	155

TEIL II – BEMESSUNGSBEISPIELE

Dieser Abschnitt enthält dreizehn Bemessungsbeispiele, die die Anwendung der Bemessungsregeln veranschaulichen sollen. Die Beispiele sind:

Bemessungsbeispiel 1

Rundrohrprofil unter zentrischem Druck.

Bemessungsbeispiel 2

Geschweißtes I-Profil der Querschnittsklasse 4, druck- und biegebeansprucht.

Bemessungsbeispiel 3

Bemessung eines Stahltrapezprofils für Dächer der Querschnittsklasse 4, biegebeansprucht.

Bemessungsbeispiel 4

Ermüdungsfestigkeit einer geschweißten Verbindung eines Hohlprofils.

Bemessungsbeispiel 5

Geschweißter Anschluss.

Bemessungsbeispiel 6

Geschraubter Anschluss.

Bemessungsbeispiel 7

Blechträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegung mit Schubbeulen als maßgebendes Versagen.

Bemessungsbeispiel 8

Stahlträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegung, Querkraft als maßgebende Bemessungsgröße.

Bemessungsbeispiel 9

Kaltgeformtes U-Profil unter Biegung mit abgestuften, seitlichen Halterungen des Druckflanschs. Biegedrillknicken zwischen den Halterungen wird maßgebend.

Bemessungsbeispiel 10

Rechteckhohlprofil unter kombinierter Beanspruchung aus zentrischem Druck und Biegung mit 30-minütigem Feuerwiderstand.

Bemessungsbeispiel 11

Stahltrapezprofil für Dächer der Querschnittsklasse 4 unter Biegung – Vergleich der Bemessung kaltverfestigten Materials mit warmverformtem Material.

Bemessungsbeispiel 12

Gekantetes U-Profil aus kalt verfestigtem Edelstahl in einem offenen Geschoss unter Biegung.

Bemessungsbeispiel 13

Ein Fachwerkträger aus kalt verfestigtem Edelstahl, der durch zentrischen Druck und Biegung beansprucht wird, mit 30-minütigem Feuerwiderstand.

Die Blechträger der Beispiele 7 und 8 bestehen aus 1.4462, Die Bauteile der übrigen Beispiele hingegen aus Austeniten 1.4301 oder 1.4401.

Die Verweise in den Beispielen beziehen sich, sofern nicht anderweitig vermerkt, auf die Abschnitte und Gleichungen/Formeln in diesen Bemessungshilfen.