

Sonderdruck 863

# Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen

Vierte Auflage



UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

INSTITUT FÜR METALL- UND LEICHTBAU

Ljungaviken Listerlandet Fußgängerbrücke

Sölvesborg, Schweden

Lean Duplex-Stahl 1.4162 (LDX 2101)

© Outokumpu

Deutsche Ausgabe: ISBN 978-1-85942-228-1

Stand: 13. November 2017

© 2017 SCI. All rights reserved.

Publication Number: SCI P413

ISBN 978185942 2281

Veröffentlicht von: SCI, Silwood Park, Ascot, Berks, SL5 7QN, UK

[www.steel-sci.com](http://www.steel-sci.com)

Englische Ausgabe:	ISBN 13: 978-1-85942-226-7
Finnische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-231-1
Französische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-227-4
Italienische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-229-8
Polnische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-230-4
Portugiesische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-232-8
Spanische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-233-5
Schwedische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-234-2
Tschechische Ausgabe:	ISBN 978-1-85942-235-9

# GELEITWORT

## Vierte Auflage

Diese vierte Auflage der Bemessungshilfen wurde im englischen Original als „*Design Manual for Structural Stainless Steel*“ durch Nancy Baddoo von „*The Steel Construction Institute*“ (SCI) im Rahmen des RFCS-Forschungsvorhabens „*Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels*“ (PUREST) (Vertragsnummer 709600) erstellt.

Es handelt sich dabei um eine vollständige Überarbeitung der dritten Auflage; die wichtigsten Änderungen sind nachfolgend vorgestellt:

- die Änderungen gemäß EN 1993-1-4:2006 + A1:2015 wurden eingearbeitet,
- ferritische nichtrostende Stähle wurden ebenfalls berücksichtigt basierend auf den Ergebnissen des RFCS-Forschungsvorhabens „*Structural applications of ferritic stainless steels*“ (SAFSS) (RFCS-CT-2010-00026),
- neue Daten bezüglich der thermischen und mechanischen Eigenschaften von nichtrostenden Stählen im Brandfall wurden hinzugefügt,
- die Bemessungsdaten, Bemessungsregeln sowie Verweise auf aktuelle europäische Normen einschließlich EN 10088, EN 1993 und EN 1090 wurden aktualisiert,
- ein Anhang zur Beschreibung des Materialverhaltens wurde hinzugefügt,
- ein Anhang zur Methode der Ermittlung der Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen wurde hinzugefügt,
- ein Anhang zur „*Continuous Strength Method*“ (CSM) wurde hinzugefügt, welche die Vorteile der Verfestigung nutzt und dadurch weniger konservative Bemessungsregeln liefert.

Folgende Organisationen nahmen am RFCS-Forschungsvorhaben PUREST teil:

**The Steel Construction Institute (SCI)**  
(Kordinator)  
Silwood Park, Ascot, SL5 7QN, United Kingdom,  
[www.steel-sci.com](http://www.steel-sci.com)

**Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)**  
Calle Jordi Girona 31, Barcelona 08034 Spain  
[www.upc.edu](http://www.upc.edu)

**Universität Duisburg-Essen (UDE)**  
Universitätsstraße 2, Essen 45141, Germany  
[www.uni-due.de](http://www.uni-due.de)

**Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven)**  
Oude Markt 13, Leuven 3000, Belgium  
[www.kuleuven.be](http://www.kuleuven.be)

**RINA Consulting - Centro Sviluppo Materiali S.p.A (CSM)**  
Via Di Castel Romano 100, Rome 00128, Italy  
[www.rinaconsulting.org/en/csm](http://www.rinaconsulting.org/en/csm)

**Stalbyggnadsinstitutet (SBI)**  
Kungsträdgårdsgatan 10, 111 47 Stockholm, Sweden  
[www.sbi.se](http://www.sbi.se)

**Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Lukasiewicza (PRz)**  
al. Powstancow Warszawy 12, Rzeszów, 35 959, Poland  
[www.prz.edu.pl](http://www.prz.edu.pl)

**Imperial College of Science Technology and Medicine**  
South Kensington Campus Exhibition Road, London, SW7 2AZ, United Kingdom  
[www.imperial.ac.uk](http://www.imperial.ac.uk)

**Teräsrakenneyhdistys ry**

Unioninkatu 14 3 krs, Helsinki 00130, Finland  
[www.terasrakenneyhdistys.fi](http://www.terasrakenneyhdistys.fi)

**Universidade de Coimbra**

Paço das Escolas, Coimbra, 3001 451,  
Portugal  
[www.uc.pt](http://www.uc.pt)

**České vysoké učení technické v Praze  
(CVUT)**

Zikova 4, Praha 16636, Czech Republic  
[www.cvut.cz](http://www.cvut.cz)

**OneSource Consultoria Informática**

Urbanização Ferreira Jorge - 1º dto Lote 14,  
Coimbra 3040 016 , Portugal  
[www.onesource.pt](http://www.onesource.pt)

Die nachfolgend benannten Personen haben einen wertvollen Beitrag zur Erstellung dieser vierten Ausgabe geleistet:

- Sheida Afshan (Brunel University London, UK)
- Itsaso Arrayago (Universitat Politècnica de Catalunya, Spain)
- Leroy Gardner (Imperial College London, UK)
- Graham Gedge (Arup, UK)
- Michal Jandera (Czech Technical University of Prague, Czech Republic)
- Esther Real (Universitat Politècnica de Catalunya, Spain)
- Barbara Rossi (KU Leuven, Belgium)
- Natalie Stranghöner (Universität Duisburg-Essen, Germany)
- Ou Zhao (Nanyang Technological University, Singapore)

Die deutsche Übersetzung wurde am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner erstellt. An der Übersetzung maßgeblich beteiligt war M.Sc. Sebastian Stehr.

## Geleitwort zur dritten Ausgabe

Die dritte Auflage der Bemessungshilfen entstand unter der 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 enthält eine vollständige Überarbeitung der zweiten Auflage und erweitert 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. Kapitel 8: Brandschutzbemessung wurde aktualisiert und neue Kapitel zur Dauerhaftigkeit von nichtrostenden Stählen im erdberührenden Bereich und zu Lebenszykluskosten wurden ergänzt.

Drei neue Bemessungsbeispiele wurden hinzugefügt, die eine geeignete Anwendung von kaltgeformtem nichtrostendem 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, Institute of Steel Construction
- VTT Technical Research Centre of Finland
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

## Geleitwort zur zweiten Auflage

Die zweite Auflage der Bemessungshilfen entstand unter der Leitung des „Steel Construction Institute“ als Teilergebnis des von der EGKS mitfinanzierten *Valorisierungsprojektes - Entwicklungen zum Gebrauch nichtrostender Stähle im Bauwesen* (Vertragsnr. 7215-PP-056). Sie enthält eine vollständige Überarbeitung des „*Design Manual for Structural Stainless Steel*“, welches zwischen 1989 und 1992 am „Steel Construction Institute“ entstand und 1994 von Euro Inox veröffentlicht wurde.

Die zweite Auflage berücksichtigt zusätzlich zur ersten Auflage 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 (SCI)

Massimo Barteri, Centro Sviluppo Materiali (CSM)

Bassam Burgan, The Steel Construction Institute (SCI)

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)

# DANKSAGUNGEN

Die nachfolgend aufgeführten Organisationen beteiligten sich mit finanzieller Förderung an dieser vierten Ausgabe der „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“ und ihrer Unterstützung sei hier ausdrücklich gedankt:

- The European Union’s Research Fund for Coal and Steel,
- Outokumpu,
- Aperam,
- Industeel,
- Acerinox,
- Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM),
- Nickel Institute,
- Stal tube.



# VORWORT

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

Diese Bemessungshilfen bestehen aus zwei Teilen:

- Teil I - Empfehlungen
- Teil II - Bemessungsbeispiele

Die Empfehlungen in Teil I verwenden die Bezeichnungen der Philosophie der Grenzzustände und stimmen mit den aktuellen Versionen der folgenden Teile des Eurocode 3 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten* überein:

- EN 1993-1-1 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*
- EN 1993-1-2 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*
- EN 1993-1-3 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*
- EN 1993-1-4 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen*
- EN 1993-1-5 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Plattenförmige Bauteile*
- EN 1993-1-8 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Bemessung von Anschlüssen*
- EN 1993-1-9 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Ermüdung*
- EN 1993-1-10 *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung*

Der Eurocode 3 wird derzeit (Stand 08-2017) überarbeitet und die Veröffentlichung neuer Versionen aller Teile einschließlich EN 1993-1-4 wird bis 2023 erwartet. In bestimmten Fällen werden in diesen Bemessungshilfen bereits die neuen Regelungen oder Bemessungsdaten angegeben, welche jedoch erst in die nächste Version von EN 1993-1-4 eingearbeitet werden sollen. Ein grau markierter Kasten erklärt die Unterschiede dieser neuen Regeln zu denen aus der aktuellen Version EN 1993-1-4:2006 + A1:2015.

Diese Bemessungshilfen enthalten u. a. Empfehlungen 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. Hier wird jeweils auf die entsprechenden Kapitel und konkreten Bemessungsempfehlungen verwiesen.

Die Bemessungsempfehlungen und Bemessungsbeispiele können im Internet unter [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual) und bei Steelbiz, einer technischen Informationsplattform des SCI ([www.steelbiz.org](http://www.steelbiz.org)), abgerufen werden. Ein Kommentar zu den Bemessungsempfehlungen einschließlich sämtlicher Verweisquellen steht dort ebenso zur Verfügung. Der Kommentar

dient dem anwendenden Ingenieur, die Grundlagen der Bemessungsempfehlungen richtig einzuschätzen und weitere Überarbeitungen im Zuge des wachsenden Kenntnisstandes nachvollziehen zu können. Ferner wird hier die Gelegenheit wahrgenommen, die Ergebnisse verschiedener Versuchsprogramme zu präsentieren, die als Hintergrundinformationen zu den Bemessungshilfen dienen.

Ebenfalls im Internet unter [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual) verfügbar ist eine online nutzbare Bemessungssoftware sowie Versionen für mobile Endgeräte. Mit dieser Bemessungssoftware können Querschnittswerte und Bauteilwiderstände sowohl für standardisierte als auch für benutzerspezifische Querschnitte gemäß den Empfehlungen in diesen Bemessungshilfen berechnet werden.

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, im Zusammenhang mit der Anwendung dieser Bemessungsempfehlungen stehen könnten, von den Projektpartnern oder von in Verbindung mit diesen Bemessungshilfen stehenden Personen übernommen.

# INHALTSVERZEICHNIS

	<b>Seitennummer</b>
GELEITWORT	i
DANKSAGUNGEN	v
VORWORT	vii
INHALTSVERZEICHNIS	ix
TEIL 1 - EMPFEHLUNGEN	1
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Was ist nichtrostender Stahl?	1
1.2 Geeignete nichtrostende Stähle für Anwendungen im Bauwesen	3
1.3 Anwendungsgebiete für nichtrostenden Stahl in der Bauindustrie	5
1.4 Gültigkeitsbereich dieser Bemessungshilfen	6
1.5 Bezeichnungen	7
1.6 Definitionen der Bauteilachsen	9
1.7 Einheiten	9
2 MATERIALEIGENSCHAFTEN NICHTROSTENDER STÄHLE	11
2.1 Allgemeines Spannungs-Dehnungs-Verhalten	11
2.2 Einflussfaktoren auf das Materialverhalten	13
2.3 Einschlägige Normen und Bemessungsfestigkeiten	14
2.4 Physikalische Eigenschaften	23
2.5 Temperatureffekte	25
2.6 Verzinken und der Kontakt mit geschmolzenem Zink	25
2.7 Verfügbarkeit der Produktformen	25
2.8 Lebenszykluskosten und Umweltbelastung	28
3 DAUERHAFTIGKEIT UND WERKSTOFFAUSWAHL	31
3.1 Einführung	31
3.2 Korrosionsarten und Verhalten der Stahlsorten	32
3.3 Korrosion unter ausgewählten Bedingungen	36
3.4 Korrosionssicheres Konstruieren	38
3.5 Werkstoffauswahl	40
4 GRUNDLAGEN DER BEMESSUNG	47
4.1 Allgemeine Voraussetzungen	47
4.2 Bemessung der Grenzzustände	47
4.3 Einwirkungen	48
5 BEMESSUNG VON QUERSCHNITTEN	49
5.1 Allgemeines	49
5.2 Maximale Breite-zu-Dicke-Verhältnisse	49
5.3 Klassifizierung von Querschnitten	49
5.4 Wirksame Breiten	53
5.5 Ausgesteifte ebene Querschnittsteile	58
5.6 Berechnung von Querschnittswerten	62
5.7 Beanspruchbarkeit von Querschnitten	64
6 BEMESSUNG VON BAUTEILEN	69
6.1 Einleitung	69
6.2 Bauteile unter Zugbeanspruchung	69
6.3 Bauteile unter Druckbeanspruchung	69

6.4	Bauteile unter Biegebeanspruchung	73
6.5	Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung	86
7	BEMESSUNG VON ANSCHLÜSSEN	89
7.1	Allgemeine Empfehlungen	89
7.2	Geschraubte Verbindungen	91
7.3	Mechanische Verbindungsmittel für dünnwandige Bauteile	97
7.4	Geschweißte Verbindungen	98
8	BEMESSUNG IM BRANDFALL	103
8.1	Allgemeines	103
8.2	Mechanische Werkstoffeigenschaften bei erhöhten Temperaturen	103
8.3	Tragwerksbemessung für den Brandfall	107
8.4	Thermische Werkstoffeigenschaften bei erhöhten Temperaturen	114
8.5	Materialverhalten bei erhöhten Temperaturen	116
9	ERMÜDUNG	119
10	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	121
10.1	Allgemeines	121
10.2	Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven	121
10.3	Bauteilversuche	122
11	ASPEKTE DER HERSTELLUNG	123
11.1	Einführung	123
11.2	EN 1090 <i>Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken</i>	123
11.3	Ausführungsstufe	124
11.4	Lagerung und Verarbeitung	125
11.5	Formgebung	126
11.6	Schweißen	128
11.7	Fressen und Kaltverschweißen	134
11.8	Oberflächenbearbeitung	135
ANHANG A	Zuordnung der Bezeichnungen von nichtrostenden Stählen	137
ANHANG B	Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen	139
ANHANG C	Beschreibung des Materialverhaltens	143
ANHANG D	„Continuous Strength Method“	147
D.1	Allgemeines	147
D.2	Definition des Materials	148
D.3	Grenzdehnung eines Querschnitts	149
D.4	Querschnittstragfähigkeit unter Druckbeanspruchung	150
D.5	Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung	151
D.6	Querschnittstragfähigkeit unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung	152
ANHANG E	Elastisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken	155
E.1	Allgemeines	155
E.2	Über die Biegeebene symmetrische Querschnitte	155
E.3	Beiwerte $C_1$ und $C_2$	156
TEIL 2 - BEMESSUNGSBEISPIELE		157

# TEIL 1 - EMPFEHLUNGEN

## 1 EINFÜHRUNG

### 1.1 Was ist nichtrostender Stahl?

Nichtrostender Stahl ist die Bezeichnung für korrosions- und hitzebeständigen Stahl, welcher mindestens 10,5 % Chromanteil besitzt. So wie es bei Bau- und Maschinenbaustählen für die unterschiedlichsten Anforderungen an Festigkeit, Schweißverarbeitung und Zähigkeit eine Auswahl an Stahlsorten gibt, so existiert auch eine große Bandbreite an nichtrostenden Stählen, welche unterschiedliche Korrosionswiderstände und/oder Festigkeiten bieten. Die große Auswahl an nichtrostenden Stählen wird durch den kontrollierten Einsatz von Legierungselementen erreicht, welche die mechanischen Eigenschaften und die Fähigkeit unterschiedlichsten, meist korrosiven Umgebungsbedingungen zu widerstehen beeinflussen. Bei der Wahl einer geeigneten nichtrostenden Stahlsorte ist jedoch entscheidend, dass für den jeweiligen Anwendungsfall eine nicht zu hoch legierte Sorte gewählt wird und somit die Materialkosten unnötig steigen.

Aufgrund des Chromanteils von mindestens 10,5 % entsteht an der blanken Oberfläche des nichtrostenden Stahls bei Kontakt mit Umgebungsluft oder mit einem anderen oxidierenden Medium eine transparente und fest anhaftende chromreiche Oxidschicht. Wird diese z. B. durch Kratzer oder durch Schleifen beschädigt, bildet sich unter Anwesenheit von Sauerstoff unmittelbar eine neue. Obwohl diese Oxidschicht mit ungefähr  $5 \times 10^{-6}$  mm sehr dünn ist, ist sie dennoch sehr widerstandsfähig und undurchlässig, weshalb bei einem ausreichenden Korrosionswiderstand gegen die vorherrschenden Umgebungsbedingungen der nichtrostende Stahl nicht weiter mit der Atmosphäre reagiert. Aus diesem Grund spricht man auch von einer Passivschicht. Die Widerstandsfähigkeit dieser Passivschicht hängt maßgeblich von der Zusammensetzung der gewählten nichtrostenden Stahlsorte, ihrer Oberflächenbehandlung und von der Korrosivität der Umgebung ab. Diese Widerstandsfähigkeit steigt mit zunehmendem Chromanteil und wird weiterhin durch die Zugabe der Legierungselemente Molybdän und Stickstoff begünstigt.

Nichtrostende Stähle können in die folgenden fünf Basissorten unterteilt werden, welche jeweils einzigartige Eigenschaften aufweisen und ein breites Spektrum an Korrosionswiderständen abdecken.

#### ***Austenitische nichtrostende Stähle***

Die am häufigsten verwendeten austenitischen nichtrostenden Stähle besitzen einen Chromanteil von 17 bis 18 % und Nickelzusätze von 8 bis 11 %. Im Vergleich mit unlegierten Baustählen, welche eine kubisch-raumzentrierte Atomstruktur (kristallin) aufweisen, besitzen austenitische nichtrostende Stähle eine kubisch-flächenzentrierte Atomstruktur. Infolgedessen weisen austenitische nichtrostende Stähle, zusätzlich zu ihrem Korrosionswiderstand, eine hohe Duktilität sowie gute Schweißbarkeit auf und sind leicht kaltumformbar. Im Vergleich zu unlegierten Baustählen besitzen sie außerdem eine deutlich höhere Zähigkeit über einen weiten Temperaturbereich. Sie lassen sich durch Kaltumformen verfestigen, jedoch nicht durch Wärmebehandlung. Ihr Korrosionswiderstand lässt sich durch einen größeren Chromanteil und durch die Zugabe der Legierungselemente Molybdän und

Stickstoff weiter verbessern. Sie sind die im Bauwesen mit Abstand am häufigsten eingesetzten nichtrostenden Stähle.

### ***Ferritische nichtrostende Stähle***

Die üblicherweise verwendeten ferritischen nichtrostenden Stähle haben einen Chromanteil zwischen 10,5 und 18 %. Sie besitzen entweder keine oder nur eine geringe Menge an Nickelzusätzen und eine kubisch-raumzentrierte Atomstruktur, ähnlich wie bei unlegierten Baustählen. Sie sind kostengünstiger als austenitische Sorten mit vergleichbaren Korrosionswiderständen und unterliegen geringeren Preisschwankungen. Jedoch weisen sie im Allgemeinen eine geringere Duktilität auf und sind weniger gut zum Schweißen geeignet als austenitische nichtrostende Stähle. Die Umformungs- und Bearbeitungseigenschaften von ferritischen nichtrostenden Stählen sind vergleichbar mit denen von unlegierten Baustählen der Sorte S355. Sie können durch Kaltumformen verfestigt werden, jedoch in geringerem Maße als austenitische nichtrostende Stähle. Genau wie die austenitischen Sorten lassen sie sich auch nicht durch eine Wärmebehandlung verfestigen. Typische Anwendungsgebiete sind Innenräume und vergleichsweise milde äußere atmosphärische Bedingungen. Sie besitzen eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion und ihre Korrosionswiderstandsfähigkeit kann durch die Zugabe von Molybdän weiter gesteigert werden. Sie sind eine korrosionsbeständige Alternative zum Feuerverzinken. Ferritische Sorten werden i. d. R. in Blechstärken von bis zu 4 mm verwendet.

### ***Nichtrostende Duplex- (austenitisch-ferritische) Stähle***

Die Mikrostruktur von nichtrostenden Duplex-Stählen besteht sowohl aus Austenit als auch aus Ferrit, weshalb man diese auch als austenitisch-ferritische nichtrostende Stähle bezeichnet. Sie besitzen typischerweise einen Chromanteil von 20 bis 26 %, 1 bis 8 % Nickel, 0,05 bis 5 % Molybdän und 0,05 bis 0,3 % Stickstoff als Legierungsbestandteile. Aufgrund des im Vergleich zu den austenitischen Sorten geringeren Nickelanteils unterliegen sie geringeren Preisschwankungen. Sie weisen etwa doppelt so hohe Festigkeiten wie austenitische Stähle im geglühten Zustand auf, wodurch geringere Querschnitte erreicht werden können – das kann bei Strukturen, bei denen es auf das Gesamtgewicht ankommt, wie z. B. Brücken oder Offshore Anlagen, von Vorteil sein. Grundsätzlich sind nichtrostende Duplex-Stähle in vielen korrosiven Umgebungen einsetzbar aber trotz ihrer guten Duktilität führen ihre höheren Festigkeiten zu einer verminderten Verformbarkeit im Vergleich zu den rein austenitischen Sorten. Nichtrostende Duplex-Stähle lassen sich auch durch Kaltumformen verfestigen, jedoch ebenfalls nicht durch Wärmebehandlung. Sie weisen eine gute Schweißbarkeit auf, sind widerstandsfähig gegenüber Spannungsrisskorrosion und können als Ergänzung der ferritischen nichtrostenden Stähle betrachtet werden, da sie meistens in größeren Blechdicken verwendet werden.

### ***Martensitische nichtrostende Stähle***

Martensitische nichtrostende Stähle besitzen eine ähnliche kubisch-raumzentrierte Atomstruktur wie ferritische nichtrostende Stähle oder unlegierte Baustähle, aber aufgrund ihres höheren Kohlenstoffanteils können sie durch Wärmebehandlung verfestigt werden. Martensitische nichtrostende Stähle werden i. d. R. im gehärteten und angelassenen Zustand eingesetzt, in welchem sie höhere Festigkeiten und durchschnittliche Korrosionswiderstände aufweisen. Sie finden häufig Anwendung in Bereichen, in denen ihr Verschleiß- und Abriebwiderstand sowie ihre Härte von Vorteil sind, z. B. bei Essbesteck, chirurgischen Instrumenten, Industriemessern, Verschleißblechen und Turbinenschaufeln. Sie sind weniger duktil und anfälliger gegenüber mechanischen Einwirkungen als die ferritischen, austenitischen und austenitisch-ferritischen Stähle. Obwohl die meisten martensitischen nichtrostenden

Stähle schweißbar sind, bedarf es meist einer Wärmevor- sowie einer Wärmenachbehandlung der Schweißnaht, wodurch ein Einsatz in geschweißten Komponenten eingeschränkt werden kann.

### **Ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle**

Bei ausscheidungshärtenden nichtrostenden Stählen kann durch Wärmebehandlung eine sehr hohe Festigkeit erzielt werden und diese können, je nach Stahlsorte und in Abhängigkeit ihrer Mikrostruktur in die folgenden drei Gruppen eingeteilt werden: martensitisch, halbaustenitisch und austenitisch. Ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle werden i. d. R. nicht in geschweißten Komponenten verwendet. Ihr Korrosionswiderstand ist grundsätzlich besser als bei martensitischen nichtrostenden Stählen und ähnlich wie bei austenitischen Sorten mit 18 % Chromanteil und 8 % Nickel. Obwohl ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle meistens in der Luft- und Raumfahrtindustrie eingesetzt werden, kommen sie auch zum Einsatz bei Zugstäben, Achsen, Schrauben und anderen Anwendungsmöglichkeiten, die hohe Festigkeiten und mittlere Korrosionswiderstände erfordern.

Empfehlungen für die Stahlsortenauswahl für spezifische Anwendungsfälle werden in Kapitel 3.5 gegeben.

## **1.2 Geeignete nichtrostende Stähle für Anwendungen im Bauwesen**

Diese Bemessungshilfen behandeln austenitische und ferritische Sorten sowie Duplex-Stähle, da diese beim Gebrauch von nichtrostenden Stählen im Bauwesen insgesamt am häufigsten zum Einsatz kommen. Die chemischen Zusammensetzungen sowie Festigkeitskennwerte üblicher nichtrostender Stahlsorten, die für den Einsatz im Bauwesen geeignet sind, werden in Tabelle 2.1 sowie in Tabelle 2.2 aufgeführt.

EN 1993-1-4 behandelt eine größere Auswahl an austenitischen jedoch weniger ferritische Sorten als in diesen Bemessungshilfen dargestellt. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass mit der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 die Auswahl an ferritischen Sorten erweitert wird, sodass auch alle in diesen Bemessungshilfen behandelten Sorten abgedeckt werden.

Die Regeln in diesen Bemessungshilfen können auch auf weitere austenitische und ferritische Sorten sowie Duplex-Stähle gemäß EN 10088 angewendet werden. Allerdings sollte bei der Haltbarkeit, Herstellung oder Schweißbarkeit weiterer Sorten der Rat eines Stahlherstellers und/oder eines fachkundigen Beraters einbezogen werden.

### **Austenitische nichtrostende Stähle**

Austenitische nichtrostende Stähle werden im Allgemeinen dort eingesetzt, wo eine Kombination aus guter Festigkeit, Korrosionswiderstand, Verformbarkeit (einschließlich der Möglichkeit enge Ausrundungsradien zu erzielen), ausgezeichneter Schweißbarkeit sowohl in der Werkstatt als auch auf der Baustelle und im Falle von seismischen Aktivitäten eine sehr gute Dehnung vor dem Bruch erforderlich wird.

Die austenitischen nichtrostenden Stahlsorten mit der Bezeichnung 1.4301 (bekannt als 304) und 1.4307 (304L) werden am häufigsten verwendet und besitzen einen Chromanteil von 17,5 bis 20 % sowie 8 bis 11 % Nickel. Sie sind für den Einsatz in ländlichen und städtischen Gebieten sowie für kleine Industrieanlagen geeignet.

Die austenitischen Sorten mit der Bezeichnung 1.4401 (316) und 1.4404 (316L) enthalten ungefähr 16 bis 18 % Chrom, 10 bis 14 % Nickel und 2 bis 3 % Molybdän, wodurch der Korrosionswiderstand erhöht wird. Sie eignen sich gut für maritime und industrielle Einsatzgebiete.

Hinweis: Der Zusatz „L“ in der Bezeichnung dieser Sorten weist auf eine kohlenstoffärmere Zusammensetzung hin, wodurch sie ein geringeres Risiko für Anfälligkeiten (gegen das Ausscheiden von Chrom-Kohlenstoffen) und für interkristalline Korrosion in wärmebehandelten Bereichen von Schweißnähten besitzen. Bei Komponenten, die geschweißt werden müssen, sollte daher entweder die „L“-Variante oder eine stabilisierte Stahlsorte wie z. B. 1.4541 oder 1.4571 verwendet werden. Der geringe Kohlenstoffanteil hat allerdings keinen Einfluss auf den Korrosionswiderstand von nicht geschweißten Bereichen. Wenden Stahlhersteller moderne Produktionsverfahren an, besitzen deren handelsübliche nichtrostende Stähle bereits einen geringen Kohlenstoffanteil und diese erfüllen somit die Voraussetzungen für beide Bezeichnungen (z. B. 1.4301/1.4307 mit der höheren Festigkeit eines 1.4301 und dem geringeren Kohlenstoffanteil eines 1.4307). Wenn jedoch weniger moderne Herstellungstechnologien angewendet werden, kann nicht zwangsläufig von geringen Kohlenstoffanteilen ausgegangen werden und eine kohlenstoffärmere Version sollte, für Bereiche in denen geschweißt werden soll, explizit in den Projektunterlagen angegeben werden.

Die austenitische Stahlsorte 1.4318 besitzt einen niedrigen Kohlenstoff- und einen hohen Stickstoffgehalt und verfestigt sich beim Kaltumformen sehr schnell. Sie wird schon seit langem erfolgreich in der Eisenbahnindustrie verwendet, eignet sich jedoch gleichermaßen für den Einsatz in der Automobil- und Luftfahrtindustrie sowie im Hochbau. Sie weist eine ähnliche Korrosionsbeständigkeit wie die austenitische Sorte 1.4301 auf, eignet sich aber besonders in Fällen bei denen höhere Festigkeiten, im Vergleich zu 1.4301, erforderlich sind und große Stahlmengen verbaut werden sollen. Der Stahl wird dabei direkt vom Walzwerk bezogen; bei entsprechender Nachfrage sollte die Verfügbarkeit der Sorte 1.4318 demnach direkt beim Stahlhersteller angefragt werden. Die Kosten sind im Allgemeinen, abhängig von der benötigten Liefermenge, nur geringfügig höher als bei der Sorte 1.4301.

Stahlsorten mit hohem Chromanteil von ca. 20 % sind aktuell bereits verfügbar und werden voraussichtlich in eine kommende Version der EN 10088 eingearbeitet. Die Sorte 1.4420 ist ein Beispiel für einen Stahl mit hohem Chromanteil (und hohem Stickstoffanteil), welcher einen Korrosionswiderstand aufweist, der vergleichbar ist mit dem der Sorte 1.4401. Die austenitische Stahlsorte 1.4420 besitzt mit 390 N/mm<sup>2</sup> jedoch eine höhere Festigkeit als die herkömmlichen austenitischen Sorten mit 240 N/mm<sup>2</sup>, wobei sie zusätzlich noch eine gute Duktilität aufweist.

### ***Nichtrostende Duplex-Stähle***

Nichtrostende Duplex-Stähle eignen sich für Einsätze bei denen hohe Festigkeiten, hohe Korrosionswiderstände und/oder große Widerstände gegen Spaltkorrosion und Spannungsrisskorrosion erforderlich werden.

Die austenitisch-ferritische Sorte 1.4462 ist eine sehr korrosionsbeständige Duplex-Stahlsorte, welche besonders für den Einsatz im maritimen Bereich oder in anderen aggressiven Umgebungsbedingungen geeignet ist. Der steigende Einsatz von nichtrostenden Stählen in tragenden Bauteilen führte zu einer wachsenden Nachfrage an Duplex-Stählen und zur Entwicklung von neuen „Lean“ Duplex-Sorten. Diese werden aufgrund der verminderten Nickel- und Molybdänanteile, wodurch sie deutlich kostengünstiger werden, als mager (engl.: lean) bezeichnet. „Lean“ Duplex-Stahlsorten besitzen mechanische Eigenschaften, ähnlich denen der Sorte 1.4462 und weisen einen Korrosionswiderstand auf, der mit dem von herkömmlichen

austenitischen Sorten vergleichbar ist. Dies macht sie für den Einsatz unter verschiedensten Umgebungsbedingungen an Land geeignet. In der aktuellen Version von EN 1993-1-4:2006 + A1:2015 wurden bereits vier „Lean“ Duplex-Stahlsorten ergänzt, da diese weitläufig verfügbar sind.

### **Ferritische nichtrostende Stähle**

Mit den Sorten 1.4003 (eine ferritische Basissorte mit ca. 11 % Chrom) und 1.4016 (mit ca. 16,5 % Chrom und einem höheren Korrosionswiderstand als die Sorte 1.4003) existieren aktuell zwei sogenannte ferritische „Standardsorten“, welche für tragende Bauteile geeignet und auch weitläufig verfügbar sind. Beim Schweißen der ferritischen Sorte 1.4016 wird jedoch ihr Korrosionswiderstand und ihre Zähigkeit erheblich beeinträchtigt.

Aktuell angebotene, stabilisierte ferritische Stahlsorten, wie z. B. 1.4509 und 1.4521, enthalten zusätzliche Legierungselemente wie Niob und Titan, wodurch sich die Schweiß- und Verformungseigenschaften deutlich verbessern. Die Sorte 1.4521 enthält 2 % Molybdän, wodurch die Loch- und Spaltkorrosionsbeständigkeit unter chloridhaltigen Umgebungsbedingungen verbessert wird (die Lochfraßkorrosionsbeständigkeit ist vergleichbar mit der austenitischen Sorte 1.4401). Die ferritische Sorte 1.4621 wurde erst vor kurzem entwickelt. Sie besitzt einen Chromanteil von ca. 20 % und ihre Oberfläche lässt sich besser polieren als die der Sorten 1.4509 und 1.4521.

## **1.3 Anwendungsgebiete für nichtrostenden Stahl in der Bauindustrie**

Nichtrostender Stahl kam seit seiner Entwicklung vor über hundert Jahren stets im Bauwesen zum Einsatz. Produkte aus nichtrostendem Stahl sind optisch ansprechend, korrosionsbeständig, weisen nur geringe Wartungsanforderungen auf und zeigen gute Festigkeits-, Zähigkeits- und Ermüdungseigenschaften. Nichtrostender Stahl lässt sich mit einer großen Anzahl an technischen Möglichkeiten verarbeiten und ist vollständig recyclebar. Er ist der bevorzugte Werkstoff für den Einsatz unter aggressiven Umweltbedingungen, beispielsweise bei Gebäuden und Tragwerken in Küstengebieten, bei Kontakt mit Enteisungssalzen und bei verschmutzten Einsatzbereichen.

Die hohe Duktilität von nichtrostenden Stählen bietet Vorteile, wenn seismische Beanspruchungen berücksichtigt werden müssen, weil dadurch eine größere Energieaufnahme möglich wird; allerdings sind seismische Beanspruchungen kein Aspekt in diesen Bemessungshilfen.

Typische Anwendungsmöglichkeiten für austenitische und Duplex-Stahlsorten sind:

- Träger, Stützen, Bühnen und Verstärkungsbauwerke in Anlagen zur Wasseraufbereitung, zur Zellstoff- sowie Papierverarbeitung, zur Verarbeitung von Biomasse, von pharmazeutischen Produkten oder Produkten aus der Nahrungs- bzw. Getränkeindustrie und in Kernenergie- sowie Chemieanlagen,
- Hauptträger und –stützen, Bolzen, Isolierungen, Geländer, Kabelschächte und Dehnfugen,
- Küstenschutzanlagen, Pierkonstruktionen und weitere Konstruktionen in Küstennähe,
- Verstärkungselemente in Betonbaukonstruktionen,
- Fassaden, Dächer, Vordächer und Tunnелеlemente,

- Unterstützungskonstruktionen für Fassaden, Mauerwerk, Tunnelelemente etc.
- Sicherheitsschranken, Handgeländer und öffentliche Stadtmöblierung,
- Befestigungselemente und Ankersysteme für Holz, Stein, Mauerwerk oder Fels,
- tragende Bauteile oder Befestigungselemente in Schwimmbädern (besondere Beachtung sollten tragende Bauteile in Bereichen erfahren, in denen Kondensatbildung auftreten kann, da hier die Gefahr von Spannungsrisskorrosion besteht (siehe auch Kapitel 3.5.3)),
- explosions- und einschlagsresistente Konstruktionen wie z. B. Sicherheitswände, Tore und Poller,
- feuer- und explosionsresistente Wände, Kabelschächte und Laufbühnen an Offshore-Plattformen.

Die ferritischen nichtrostenden Stahlsorten kommen häufig für Fassaden- und Dachkonstruktionen zum Einsatz. Im Transportbereich werden sie für tragende Bauteile, z. B. für gebogene Rahmenkonstruktionen in Bussen, verwendet. Außerdem werden sie schon seit langem erfolgreich in Eisenbahnwaggons für den Kohletransport eingesetzt, da hier die Widerstandsfähigkeit gegen nasses Abgleiten wichtig ist. Obwohl sie bisher noch nicht oft als tragende Elemente im Bauwesen zum Einsatz kommen, besitzen ferritische nichtrostende Stähle Potential für Anwendungsmöglichkeiten bei durchschnittlich bis hochbeständigen tragenden Bauteilen, die optisch ansprechende metallischen Oberflächen aufweisen sollen. Bei Verbundkonstruktionen, für die eine lange Lebensdauer erforderlich wird oder bei denen die Umgebungsbedingungen mäßig korrosiv sind, können ferritische Deckenplatten wirtschaftliche Vorteile gegenüber feuerverzinkten Deckenplatten bieten, welche nicht immer eine Haltbarkeit von über 25 Jahren erreichen. Neben Verbundkonstruktionen existieren weitere Einsatzmöglichkeiten, bei denen ferritische nichtrostende Stähle ein geeigneter Ersatz für feuerverzinkte Stähle sind, z. B. bei dauerhaften Schalungen, Dachpfetten sowie Hilfskonstruktionen wie beispielsweise Kabelschächten. Außerdem können sie auch in halbgeschlossenen, unbeheizten Umgebungen (z. B. Eisenbahnstationen, Tribünen und Fahrradunterständen) und in Fassadenunterkonstruktionen sowie bei Wind- und Mauerwerksstützkonstruktionen eingesetzt werden.

## 1.4 Gültigkeitsbereich dieser Bemessungshilfen

Diese Bemessungshilfen beziehen sich auf die Stahlsorten, die als typisch für bautechnische Anwendungen bezeichnet werden können. Alle Empfehlungen sollen im Wesentlichen der Bemessung von Bauteilen und Bauteilkomponenten von Gebäuden, Offshore-Anlagen und ähnlichen Tragwerken dienen. Für Tragwerke mit speziellen Anforderungen, wie z. B. Kernenergieanlagen oder Druckbehälter sollen diese Bemessungshilfen nicht herangezogen werden, da hierfür speziell ausgewiesene Normen und Regelwerke im Zusammenhang mit der Anwendung nichtrostender Stähle existieren.

In diesen Bemessungshilfen werden Aspekte des Materialverhaltens sowie der Bemessung von kaltverformten, geschweißten und warmgewalztem Bauteilen und deren Verbindungen betrachtet. Sie gelten für austenitische, ferritische sowie für Duplex-Stahlsorten. Es werden allerdings nur die gewalzten Ausführungen und keine Gussteile berücksichtigt. (Dabei gilt es zu beachten, dass sich die Eigenschaften von Gussteilen, im Vergleich zu den gewalzten Ausführungen, unterscheiden können, z. B. können Gussteile aus austenitischem nichtrostendem Stahl leicht magnetisch sein.)

Die nachfolgenden Empfehlungen basieren auf der Philosophie der Grenzzustände und stimmen, soweit nicht ausdrücklich anders angegeben, mit den Regelungen im Eurocode 3: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen* (EN 1993-1-4) überein.

## 1.5 Bezeichnungen

Grundsätzlich werden in diesen Bemessungshilfen dieselben Bezeichnungen verwendet, wie sie auch im Eurocode 3: *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau* (EN 1993-1-1) zu finden sind.

Bezeichnungs- und Achsdefinitionen von Querschnitten werden in Abbildung 1.1 veranschaulicht.

### **Lateinische Großbuchstaben**

<i>E</i>	Elastizitätsmodul; Einwirkungen aus Lasten
<i>F</i>	Last / Kraft
<i>G</i>	Ständige Last; Schubmodul
<i>I</i>	Flächenmoment zweiten Grades / Flächenträgheitsmoment
<i>L</i>	Länge; Spannweite; Systemlänge
<i>M</i>	Biegemoment
<i>N</i>	Normalkraft
<i>R</i>	Widerstand
<i>V</i>	Querkraft
<i>W</i>	Widerstandsmoment

### **Griechische Großbuchstaben**

$\Delta$	Differenz zwischen ... (steht vor dem Hauptsymbol)
----------	--

### **Lateinische Kleinbuchstaben**

<i>a</i>	Abstand zwischen zwei Steifen; Schweißnahtdicke
<i>b</i>	Dicke; Breite
<i>c</i>	Abstand; einseitig gestützte Querschnittsteile
<i>d</i>	Durchmesser; Höhe
<i>e</i>	Exzentrizität; Verschiebung der Schwerachse; Randabstand; Endabstand
<i>f</i>	Festigkeit (eines Werkstoffes)
<i>g</i>	Spaltgröße
<i>h</i>	Höhe
<i>i</i>	Trägheitsradius; Ganze Zahl in einer Aufzählung
<i>k</i>	Koeffizient; Beiwert
<i>l</i>	Knicklänge
<i>m</i>	Konstante
<i>n</i>	Anzahl der/von ...
<i>p</i>	Neigung; Abstand

$q$	Streckenlast
$r$	Radius; Ausrundungshalbmesser
$s$	gestaffelter Abstand
$t$	Dicke
$u-u$	Starke Achse / Hauptachse
$v-v$	Schwache Achse / Nebenachse
$w$	Verwölbung
$x-x, y-y, z-z$	Rechtwinklige Achsen

### **Griechische Kleinbuchstaben**

$\alpha$	(alpha)Verhältnis; Beiwert
$\beta$	(beta) Verhältnis; Beiwert
$\gamma$	(gamma)Teilsicherheitsbeiwert
$\varepsilon$	(epsilon) Dehnung; Koeffizient $\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$
$\lambda$	(lambda) Schlankheit (mit Balken: bezogene Schlankheit)
$\rho$	(rho) Reduktionsbeiwert
$\sigma$	(sigma) Normalspannung
$\tau$	(tau) Schubspannung
$\varphi$	(phi) Verhältnis
$\chi$	(chi) Reduktionsbeiwert (bei Stabilitätsfällen)
$\psi$	(psi) Spannungsverhältnis; Reduktionsbeiwert

### **Tiefgestellte Indizes**

a	Durchschnittswert (average)
b	Lochleibung (bearing); Knicken, Beulen (buckling); Schraube (bolt)
c	Querschnitt (cross section)
cr	kritisch; ideal
d	Bemessungswert (design)
E	Euler; Einwirkungsschnittgröße
eff	effektiv
e	effektiv (bei nachfolgenden Indizes)
el	elastisch
f	Flansch
g	Brutto
i, j, k	Indizes (als Platzhalter für ganze 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	Widerstandsgröße (resistance)
r	abgeminderter Wert (reduced value)
S	Schnittgröße; Sekante
s	Zugspannung (Fläche); Steife
t	Zug (tension; tensile); Torsion
u	starke Querschnittsachse; Grenzwert (ultimate)
V	(unter Berücksichtigung von) Querkräften
v	Schub; schwache Querschnittsachse
w	Steg (web); Schweißnaht (weld); Verwölbung (warping)
x	Bauteillängsachse
y	Fließgrenzwert (yield); Querschnittsachse (starke Achse, außer bei unsymmetrischen Querschnitten)
z	Querschnittsachse (schwache Achse, außer bei unsymmetrischen Querschnitten)
$\sigma$	Normalspannung
$\tau$	Schubspannung.

## 1.6 Definitionen der Bauteilachsen

Im Allgemeinen gilt für alle Bauteilachsen folgende Definition:

$xx$	in Längsrichtung des Bauteils.
$y-y$	Querschnittsachse senkrecht zum Steg bzw. zum längeren Schenkel bei Winkelprofilen.
$z-z$	Querschnittsachse parallel zum Steg bzw. zum längeren Schenkel bei Winkelprofilen.

Die  $y$ -Achse stellt üblicherweise die starke, die  $z$ -Achse die schwache Querschnittsachse dar. Bei Winkelprofilen ist die starke  $u$ -Achse sowie die schwache  $v$ -Achse gegenüber der  $y$ - bzw.  $z$ -Achse gedreht, siehe Abbildung 1.1.

Für die Momentenachsen gilt folgende Indexschreibweise:

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

Beispielsweise wird bei einem I-Profil das Biegemoment in Stegebene mit  $M_y$  bezeichnet, da es um die Querschnittsachse senkrecht zum Steg ( $y$ -Achse) wirkt.

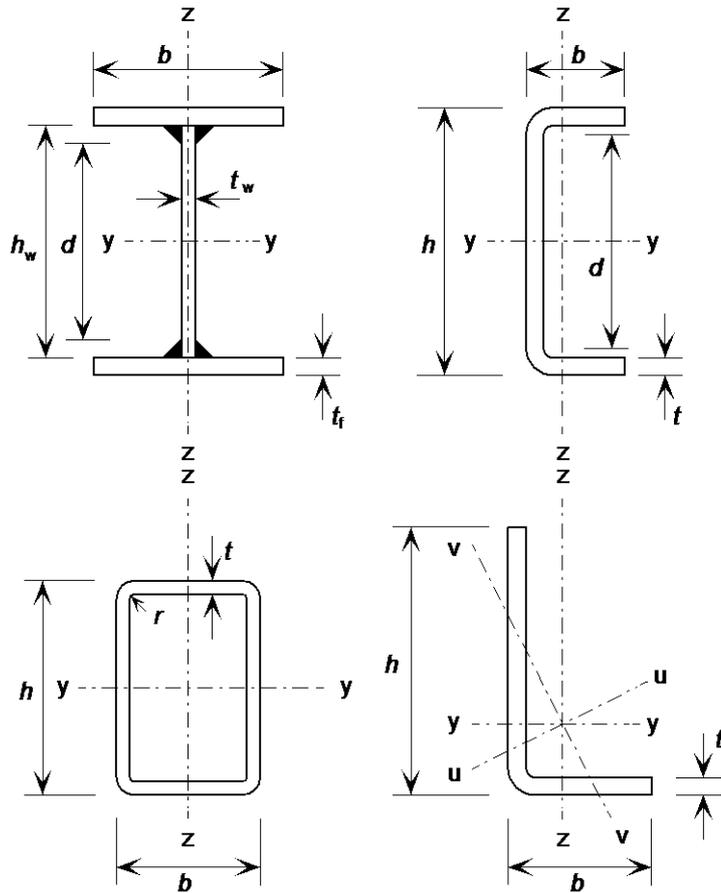
## 1.7 Einheiten

Es werden die folgenden Berechnungseinheiten empfohlen:

- Kräfte und Lasten in kN, kN/m, kN/m<sup>2</sup>
- Dichte in kg/m<sup>3</sup>
- Wichte in kN/m<sup>3</sup>

- Spannungen und Festigkeiten in  $\text{N/mm}^2$  (=  $\text{MN/m}^2$  oder  $\text{MPa}$ )
- Biegemomente in  $\text{kNm}$ .

Es sei darauf hingewiesen, dass in Übereinstimmung mit der europäischen Praxis ein Komma „ $,$ “ als Dezimaltrennzeichen verwendet wird.



**Abbildung 1.1** *Bezeichnungen und Achsendefinitionen von Querschnitten*

## **2 MATERIALEIGENSCHAFTEN NICHTTROTENDER STÄHLE**

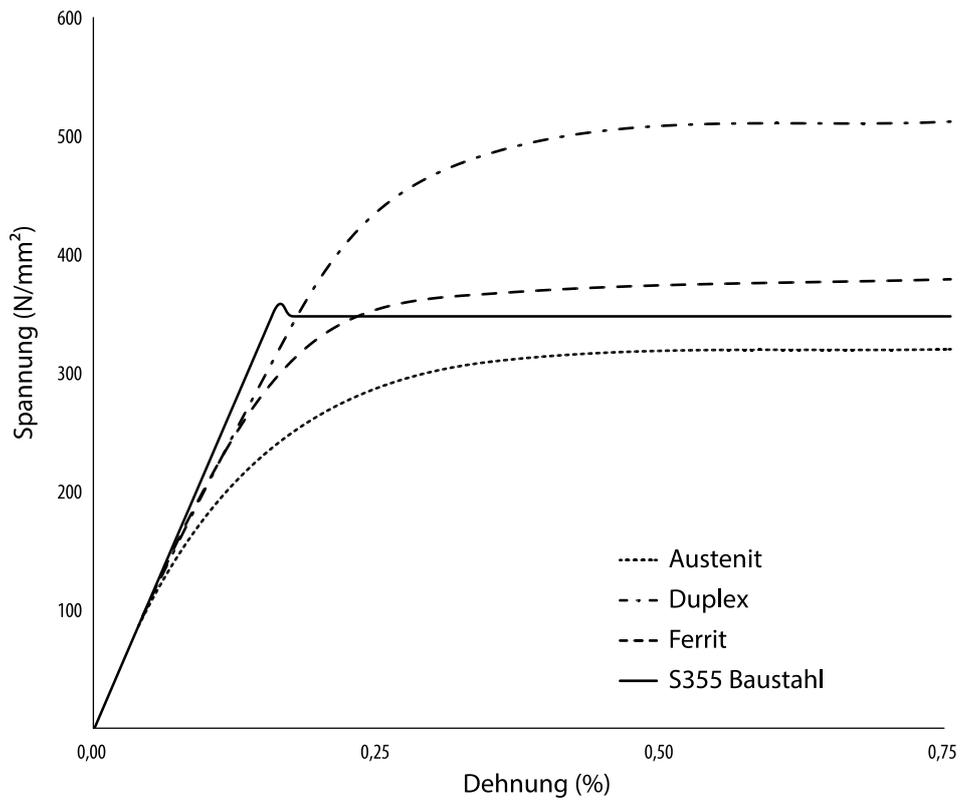
### **2.1 Allgemeines Spannungs-Dehnungs-Verhalten**

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von nichtrostenden Stählen unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht von dem der Baustähle. Der wichtigste Unterschied liegt aber in der grundsätzlichen Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Wo Baustähle typischerweise linear-elastisches Verhalten bis hin zur Streckgrenze und ein ausgeprägtes Plateau vor dem Verfestigungsbeginn aufweisen, zeigen nichtrostende Stähle einen eher abgerundeten Kurvenverlauf ohne eine klar definierbare Streckgrenze. Abbildung 2.1 zeigt einen Vergleich der Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften von verschiedenen nichtrostenden Stählen und einem Baustahl bis zu einer Dehnung von 0,75 % und Abbildung 2.2 stellt ähnliche, typische Spannungs-Dehnungs-Kurven bis zum Bruch dar. Beide Abbildungen zeigen Spannungs-Dehnungs-Kurven der theoretisch lieferbaren Materialbandbreite, allerdings sollten diese nicht als Grundlage für eine Bemessung herangezogen werden.

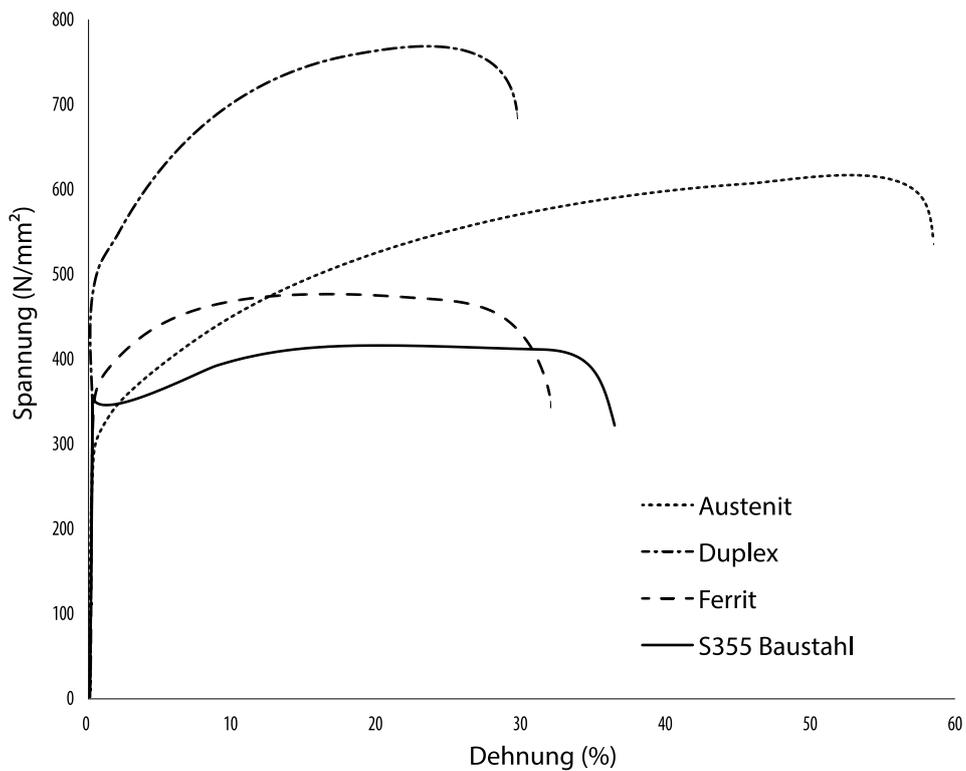
Die „Streckgrenzen“ von nichtrostenden Stählen werden in der Regel in Form von Dehngrenzen bei einem konstanten plastischen Dehnungswert (üblicherweise die 0,2 %-Dehngrenze) definiert. Abbildung 2.3 zeigt die 0,2 %-Dehngrenze, welche auch als 0,2 %-Streckgrenze bezeichnet wird. Die Proportionalitätsgrenze bei nichtrostenden Stählen reicht von 40 bis 70 % der 0,2 %-Dehngrenze.

Zu beachten ist, dass das Materialverhalten von ferritischen nichtrostenden Stählen aufgrund der weniger stark ausgeprägten Abrundungen sowie Nichtlinearitäten verglichen mit den austenitischen Sorten, jedoch gleichzeitig größerer Festigkeiten im Vergleich zu den Baustählen zwischen dem Materialverhalten von Baustählen und dem von austenitischen nichtrostenden Stählen einzuordnen ist.

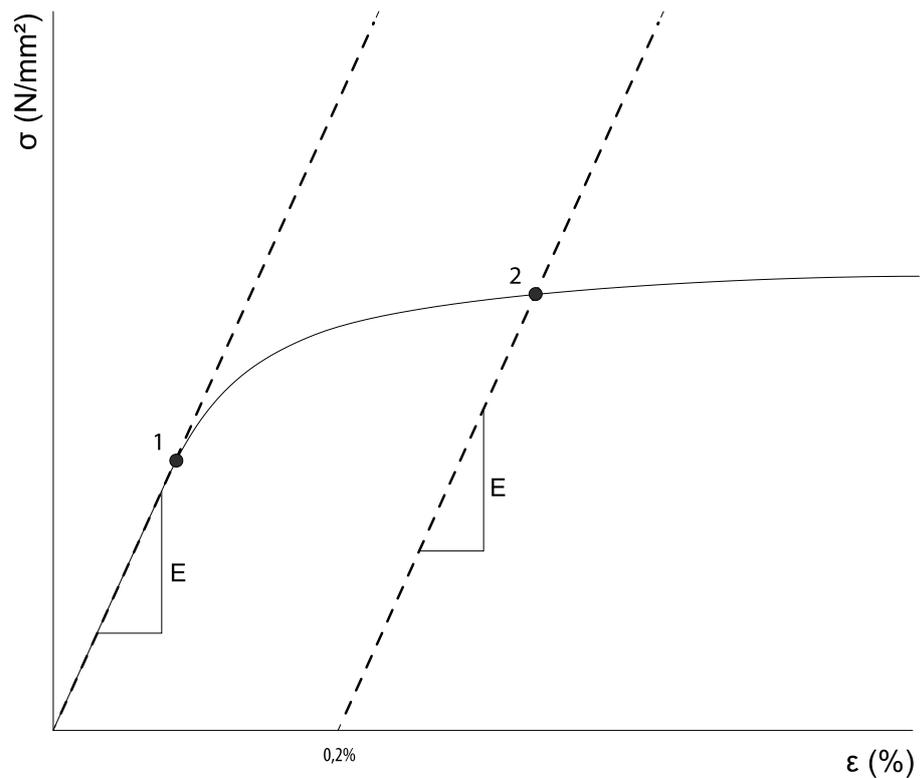
Nichtrostende Stähle haben ein beträchtliches Energieaufnahmevermögen, ohne dass sie dabei brechen, was auf ihre herausragende Duktilität (besonders bei austenitischen Sorten) und ihr Verfestigungsverhalten zurückzuführen ist.



**Abbildung 2.1** Spannungs-Dehnungs-Kurven nichtrostender Stähle sowie eines Baustahls von 0 bis 0,75 % Dehnung



**Abbildung 2.2** Spannungs-Dehnungs-Kurven nichtrostender Stähle sowie eines Baustahls bis zum Bruch



1. Elastische (Proportionalitäts-) Grenze
2. 0,2 %-Dehngrenze

**Abbildung 2.3** Definition der 0,2 %-Dehngrenze

## 2.2 Einflussfaktoren auf das Materialverhalten

Verglichen mit Baustählen ist die Metallurgie von nichtrostenden Stählen wesentlich komplexer und der Herstellungsprozess hat einen größeren Einfluss auf die endgültigen Materialeigenschaften.

Bestimmte Einflussfaktoren, die bis zu einem gewissen Grad voneinander abhängig sind, können die grundsätzliche Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve jeder nichtrostenden Stahlsorte verändern.

### 2.2.1 Kaltverfestigung

Nichtrostender Stahl ist in der Regel im „geglühten Zustand“ verfügbar, was bedeutet, dass er wärmebehandelt wurde, indem er zunächst erhitzt, dann für eine bestimmte Zeit auf einer Temperatur gehalten und anschließend schnell abgekühlt wurde. Durch das Glühen wird das Material in einen duktilen und somit formbaren Zustand zurückgeführt.

Die Festigkeiten von nichtrostenden Stählen, besonders von austenitischen Sorten, werden durch die Kaltverfestigung erhöht (etwa beim Kaltumformen, wie dem Richten und/oder Nachwalzen sowie bei der Fertigung der Bauteile). Gleichzeitig verringert sich dabei jedoch die Duktilität, wobei dies aufgrund der vergleichsweise hohen Ausgangsduktilität, besonders bei den austenitischen nichtrostenden Stählen, i. d. R. nur geringe praktische Konsequenzen hat. Grundsätzlich ist es aber möglich, Material im kaltverfestigten Zustand zu erwerben (siehe Tabelle 2.3). Der Preis für kaltverfestigte nichtrostende Stähle ist, abhängig von der Materialsorte, der Produktform und dem Grad der Kaltverfestigung, geringfügig höher als der für entsprechende geglähte Ausführungen.

Kaltverfestigter nichtrostender Stahl neigt zu einer erhöhten Asymmetrie beim Verhalten unter Zug- und Druckbeanspruchungen sowie zu einer erhöhten Anisotropie (unterschiedliche Spannungs-Dehnungs-Eigenschaften parallel und quer zur Walzrichtung). Der Grad der Asymmetrie sowie der Anisotropie hängt von der Stahlsorte, dem Grad der Kaltverfestigung und dem Herstellungsprozess ab. Tragende Bauteile mit Dicken größer als 3 mm werden i. d. R. nicht aus stark kaltverfestigtem Material hergestellt, weswegen bei diesen Querschnitten die Unterschiede im Spannungs-Dehnungs-Verhalten durch die Asymmetrie und die Anisotropie nicht sehr groß sind; die Nichtlinearität hat jedoch einen größeren Einfluss. Anisotropie und Asymmetrie wirken sich jedoch stärker bei der Bemessung von dünnwandigen und schwer bearbeitbaren Bauteilen aus.

Bei kaltverfestigtem Material ist die Druckfestigkeit in Längsrichtung geringer als die Zugfestigkeit in Quer- und Längsrichtung (bezogen auf Werte die üblicherweise aus den Werkstoffnormen wie z. B. EN 10088 stammen oder von den Herstellern angegeben werden). Bei der Ermittlung der Bemessungsfestigkeit eines kaltverfestigten Materials ist dies zu beachten (siehe Tabelle 2.3).

Bei der Fertigung eines Bauteils durch Kaltumformen treten plastische Verformungen auf, welche zu einem deutlichen Anstieg der 0,2 %-Dehngrenze führen. Ein Zuwachs der Festigkeiten um ca. 50 % ist typisch für die Kantenbereiche von kaltumgeformten Querschnitten; die Festigkeiten des Materials an den flachgewalzten Oberflächen steigt allerdings ebenfalls. In 0 wird dargestellt, wie Vorteile aus dieser fertigungsbedingten Festigkeitssteigerung gewonnen werden können. Alternativ kann diese Erhöhung der Festigkeiten auch in Experimenten ausgenutzt werden (siehe Kapitel 10).

Eine anschließende Wärmebehandlung bzw. ein Schweißen des Bauteils bringt stellenweise einen (Weich-) Glüheffekt mit sich, demzufolge sich die durch die Kaltverfestigung verbesserten Festigkeitseigenschaften wieder verringern (und ebenso die Anisotropie). Kapitel 7.4.4 gibt Hilfestellungen für die Bemessung von geschweißten Verbindungen zwischen Bauteilen aus kaltverfestigtem Material.

## **2.2.2 Verformungsgeschwindigkeit**

Der Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist bei nichtrostenden Stählen größer als bei Baustählen. Das bedeutet, dass bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten für nichtrostende Stähle vergleichsweise größere Festigkeiten erreicht werden können als für Baustähle.

## **2.3 Einschlägige Normen und Bemessungsfestigkeiten**

### **2.3.1 Flach- und Langprodukte**

Die einschlägige Norm für Flach- sowie Langprodukte aus nichtrostendem Stahl ist EN 10088, *Nichtrostende Stähle*. Sie besteht aus fünf Teilen, von denen drei das Bauwesen direkt betreffen:

- Teil 1, *Verzeichnis der nichtrostenden Stähle*, gibt Auskunft über die chemischen Zusammensetzungen und nennt Bezugswerte für bestimmte physikalische Eigenschaften, wie z. B. den Elastizitätsmodul E.
- Teil 4, *Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für das Bauwesen*, nennt die technischen Eigenschaften und chemischen Zusammensetzungen für Materialien zur Herstellung von tragenden Bauteilen.

- Teil 5, *Technische Lieferbedingungen für Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für das Bauwesen*, nennt die technischen Eigenschaften und chemischen Zusammensetzungen für Materialien die für Langprodukte verwendet werden.

Da EN 10088-4 und -5 harmonisierte Produktnormen sind, muss nichtrostender Stahl, der auf Grundlage dieser Normen definiert wird, eine CE-Kennzeichnung besitzen. Durch die CE-Kennzeichnung des Produktes versichert der Hersteller, dass das Produkt für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignet ist. Die CE-Kennzeichnung weist darauf hin, dass das Produkt der entsprechenden Norm entspricht, wobei alle von der Norm erforderlichen Grenzwerte erfüllt sind (z. B. Minstdicke und Festigkeit) und dass die Konformitätsprüfungsverfahren eingehalten wurden.

### **Bezeichnung und Zusammensetzung**

Das Bezeichnungssystem, welches in EN 10088 Anwendung findet, besteht aus einer europäischen Werkstoffnummer und einer Stahlbezeichnung.

Als Beispiel besitzt die Sorte 304L die Werkstoffnummer 1.4307, wobei:

<b>1.</b>	<b>43</b>	<b>07</b>
angibt, dass es sich um einen Stahl handelt	eine Gruppe der nichtrostenden Stähle bezeichnet	die individuelle Sortennummer angibt

Die Gruppen der nichtrostenden Stähle sind in EN 10027-2 wie folgt angegeben:

1.40XX	Nichtrostender Stahl mit Ni < 2,5 % aber ohne Mo, Nb und Ti
1.41XX	Nichtrostender Stahl mit Ni < 2,5 % und Mo aber ohne Nb und Ti
1.43XX	Nichtrostender Stahl mit Ni ≥ 2,5 % aber ohne Mo, Nb und Ti
1.44XX	Nichtrostender Stahl mit Ni ≥ 2,5 % und Mo aber ohne Nb und Ti
1.45XX	Nichtrostender Stahl mit speziellen Zusatzstoffen
1.46XX	Chemisch beständige, für hohe Temperaturen geeignete Ni-Sorten

Die Stahlbezeichnung gibt Informationen über die chemische Zusammensetzung.

Die Bezeichnung des Stahls mit der Werkstoffnummer 1.4307 lautet X2CrNi18-9, wobei gilt:

<b>X</b>	<b>2</b>	<b>CrNi</b>	<b>18-9</b>
Bezeichnet einen hoch legierten Stahl	Kohlenstoffanteil in [100 x %]	Chemische Symbole der Hauptlegierungselemente	Anteil der Hauptlegierungselemente in [%]

Zu jeder Bezeichnung eines nichtrostenden Stahls gehört eine individuelle Werkstoffnummer. ANHANG A enthält eine Tabelle mit den Bezeichnungen für nichtrostende Stahlsorten nach europäischen und amerikanischen Normen.

Die chemischen Zusammensetzungen der üblicherweise verwendeten nichtrostenden Stähle sind in Tabelle 2.1 angegeben.

## **Festigkeit**

Entsprechend EN 10088-4 und -5 werden für die Bemessung die charakteristische Streckgrenze  $f_y$  und die charakteristische Zugfestigkeit  $f_u$  jeweils als Mindestwert der 0,2 %-Dehngrenze ( $R_{p0,2}$ ) bzw. der Zugfestigkeit ( $R_m$ ) angegeben (siehe Tabelle 2.2). Diese Werte gelten jedoch nur für Material im geglühten Zustand und sind daher konservativ für Materialien oder Bauteile, welche bei der Fertigung kaltverfestigt wurden. Tragende Bauteile werden grundsätzlich selten im geglühten Zustand geliefert.

Es sollte beachtet werden, dass die gemessenen Streckgrenzen bei Blechen aus austenitischem nichtrostendem Stahl mit einer Dicke von bis zu 25 mm die definierten Mindestwerte um einen Wert von ca. 25 bis 40 % übertreffen können. Die Abweichung von der gemessenen Streckgrenze bei nichtrostenden Duplex-Stählen ist mit ca. 5 bis 20 % deutlich geringer. Zwischen Bauteildicke bzw. Durchmesser und Streckgrenze besteht ein umgekehrt proportionales Verhältnis; bei dünnen Bauteilen liegt der Wert der gemessenen Streckgrenze in der Regel deutlich über dem angegebenen Mindestwert, wohingegen bei Bauteilen mit einer Dicke von 25 mm und darüber die gemessene Streckgrenze gewöhnlich sehr nah an dem definierten Mindestwert liegt.

Bei außenliegenden, exponierten Tragwerken unter sehr heißen klimatischen Bedingungen sollte die maximale Temperatur, welche der nichtrostende Stahl erreichen kann, berücksichtigt werden. Während kleine und geschützte Bauteile die Umgebungstemperatur beibehalten können, können große, blanke Oberflächen aus nichtrostendem Stahl, welche direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, Temperaturen von bis zu 50 % über der Umgebungstemperatur erreichen. Quellen wie [www.weatherbase.com](http://www.weatherbase.com) können als Grundlage dienen, um vergangene Klimamuster auszuwerten. Wenn nichtrostender Stahl eine maximale Temperatur von ca. 60°C erreicht, sollte die für Raumtemperatur definierte Streckgrenze um 5 % abgemindert werden; bei höheren Temperaturen sind größere Abminderungen nötig.

**Tabelle 2.1** Chemische Zusammensetzungen üblicher nichtrostender Stähle gemäß EN 10088

	Werkstoffnummer	Massenanteil der Legierungselemente in % (Maximalwert bzw. zulässiger Bereich)				
		C	Cr	Ni	Mo	Sonstige
Austenitische Stähle	1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
	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 <sup>1</sup>
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 <sup>1</sup>
Duplex Stähle	1.4062	0,03	21,5 – 24,0	1,0 – 2,9	0,45	N: 0,16 – 0,28
	1.4162	0,04	21,0 – 22,0	1,35 – 1,7	0,1 – 0,8	N: 0,2 – 0,25 Cu: 0,1 – 0,8
	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 0,1 – 0,6
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22
	1.4482	0,03	19,5 – 21,5	1,5 – 3,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2 Cu: 1,0
	1.4662	0,03	23,0 – 25,0	3,0 – 4,5	1,0 – 2,0	N: 0,2 – 0,3 Cu: 0,1 – 0,8
Ferritische Stähle	1.4003	0,03	10,5 – 12,5	0,3 – 1,0	-	
	1.4016	0,08	16,0 – 18,0	-	-	
	1.4509	0,03	17,5 – 18,5	-	-	Ti: 0,1 – 0,6 Nb: [3xC+0,3] – 1,0
	1.4521	0,025	17,0 – 20,0	-	1,8 – 2,5	Ti: [4x(C+N)+0,15] – 0,8 <sup>2</sup>
	1.4621	0,03	20,0 – 21,5	-	-	N: 0,03 Nb: 0,2 – 1,0 Cu: 0,1 – 1,0

Anmerkung:  
<sup>1</sup> Titan wird hinzulegiert, um den Kohlenstoff zu stabilisieren und um die Korrosionsbeständigkeit in den Wärmeeinflusszonen von Schweißnähten zu verbessern. Jedoch sind die mit Titan stabilisierten, austenitischen nichtrostenden Stähle, außer bei Konstruktionen aus sehr schweren Bauteilen, weitgehend durch Sorten mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, wie z. B. 1.4307 oder 1.4404, auch aufgrund deren guter Verfügbarkeit, ersetzt worden.  
<sup>2</sup> Eine Stabilisierung kann durch Titan, Niob oder Zirkonium erreicht werden. Entsprechend der Atommasse dieser Elemente und dem Kohlenstoff- sowie Stickstoffanteil entspricht die Bezeichnung folgender Gleichung:  
Nb (Massenanteil in %) = Zr (Massenanteil in %) = 7/4 Ti (Massenanteil in %)

**Tabelle 2.2** Nominelle Werte der Streckgrenze  $f_y$  und der Zugfestigkeit  $f_u$  üblicher nichtrostender Stähle gemäß EN 10088 (in N/mm<sup>2</sup>)

Stahlsorte		Erzeugnisform							
		kaltgewalztes Band		warmgewalztes Band		warmgewalztes Blech		Stäbe, Walzdraht & Profile	
		Dicke $t$							
		$t \leq 8$ mm		$t \leq 13,5$ mm		$t \leq 75$ mm		$t$ oder $\phi \leq 250$ mm	
		$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
Austenitische Stähle	1.4301	230	540	210	520	210	520	190	500
	1.4307	220	520	200	520	200	500	175	500
	1.4318	350	650	330	650	330	630	-	-
	1.4401	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4404	240	530	220	530	220	520	200	500
	1.4541	220	520	200	520	200	500	190	500
	1.4571	240	540	220	540	220	520	200	500
Duplex-Stähle	1.4062	530 <sup>1</sup>	700 <sup>1</sup>	480 <sup>2</sup>	680 <sup>2</sup>	450	650	380 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>
	1.4162	530 <sup>1</sup>	700 <sup>1</sup>	480 <sup>2</sup>	680 <sup>2</sup>	450	650	450 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>
	1.4362	450	650	400	650	400	630	400 <sup>3</sup>	600 <sup>3</sup>
	1.4462	500	700	460	700	460	640	450 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>
	1.4482	500 <sup>1</sup>	700 <sup>1</sup>	480 <sup>2</sup>	660 <sup>2</sup>	450	650	400 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>
	1.4662	550 <sup>1</sup>	750 <sup>1</sup>	550 <sup>4</sup>	750 <sup>4</sup>	480	680	450 <sup>3</sup>	650 <sup>3</sup>
Ferritische Stähle	1.4003	280	450	280	450	250 <sup>5</sup>	450 <sup>5</sup>	260 <sup>6</sup>	450 <sup>6</sup>
	1.4016	260	450	240	450	240 <sup>5</sup>	430 <sup>5</sup>	240 <sup>6</sup>	400 <sup>6</sup>
	1.4509	230	430	-	-	-	-	200 <sup>7</sup>	420 <sup>3</sup>
	1.4521	300	420	280	400	280 <sup>8</sup>	420 <sup>8</sup>	-	-
	1.4621	230 <sup>5</sup>	400 <sup>9</sup>	230 <sup>8</sup>	400 <sup>8</sup>	-	-	240 <sup>7</sup>	420 <sup>7</sup>

Die nominellen Werte von  $f_y$  und  $f_u$  in dieser Tabelle können ohne besondere Berücksichtigung der Anisotropie oder der Verfestigungseffekte für die Bemessung verwendet werden. Für ferritische nichtrostende Stähle gibt EN 10088-4 Werte für  $f_y$  in Längs- und in Querrichtung an. In dieser Tabelle sind nur die Werte für die Längsrichtung angegeben, welche in der Regel ca. 20 N/mm<sup>2</sup> geringer sind als die Werte für die Querrichtung.

1.4621, 1.4482, 1.4062 und 1.4662 werden nur in EN 10088-2 und -3 berücksichtigt.  
Stäbe aus 1.4509 werden nur in EN 10088-3 berücksichtigt.

<sup>1</sup> $t \leq 6,4$ mm	<sup>4</sup> $t \leq 13$ mm	<sup>7</sup> $t$ oder $\phi \leq 50$ mm
<sup>2</sup> $t \leq 10$ mm	<sup>5</sup> $t \leq 25$ mm	<sup>8</sup> $t \leq 12$ mm
<sup>3</sup> $t$ oder $\phi \leq 160$ mm	<sup>6</sup> $t$ oder $\phi \leq 100$ mm	<sup>9</sup> $t \leq 6$ mm

Kaltverfestigte nichtrostende Stähle können entsprechend EN 10088 entweder durch Mindestwerte der 0,2 %-Dehngrenze (z. B. die kaltverfestigten Sorten CP350, CP500 usw.) oder durch Mindestwerte der Zugfestigkeit (z. B. die kaltverfestigten Sorten C700, C850 usw.) definiert werden, jedoch darf immer nur einer dieser Werte definiert werden. Da bei der Bemessung von Tragwerken i. d. R. immer ein Mindestwert für die Streckgrenze  $f_y$  benötigt wird, erlaubt EN 1993-1-4 eine Bemessung von kaltverfestigten, nichtrostenden Stählen nur für die Sorten CP350 und CP500 (Tabelle 2.3). Als charakteristische Streckgrenze  $f_y$  wird entsprechend ein Mindestwert von 350 N/mm<sup>2</sup> für die kaltverfestigte Sorte CP350 definiert. Um die Asymmetrie des kaltverfestigten Materials in den Fällen zu berücksichtigen, in denen Druckspannungen in der Längsrichtung maßgebend sind (z. B. bei Stützen

oder Biegeträgern), wird die charakteristische Festigkeit der Sorte CP500 von 500 auf 460 N/mm<sup>2</sup> reduziert (siehe Kapitel 2.2). Ein höherer Wert kann nur angesetzt werden, wenn geeignete experimentelle Daten zu Grunde gelegt werden können.

Für die kaltverfestigten Sorten über CP500 sollte die Bemessung auf Versuchen entsprechend Kapitel 10 basieren.

Rechteckhohlprofile aus nichtrostenden Stählen sind im kaltverfestigtem Zustand mit mittleren Festigkeitswerten zwischen denen der Sorten CP350 und CP500 mit jeweils einer vom Stahlhersteller gewährleisteten Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit verfügbar (die Streckgrenze gilt dann unter Zug- und unter Druckbeanspruchung).

**Tabelle 2.3** Nominelle Werte der Streckgrenze  $f_y$  und der Zugfestigkeit  $f_u$  kaltverfestigter nichtrostender Stähle gemäß EN 10088

Stahlsorte	Kaltverfestigter Zustand			
	CP350		CP500	
	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	$f_u^1$ N/mm <sup>2</sup>	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	$f_u^1$ N/mm <sup>2</sup>
1.4301	350	600	460	650
1.4318	<sup>2</sup>	<sup>2</sup>	460	650
1.4541	350	600	460	650
1.4401	350	600	460	650
1.4571	350	600	460	650

<sup>1</sup> Gemäß EN 10088 definiert die CP Einteilung nur die erforderliche 0,2 %-Dehngrenze für  $f_y$ . Die verwendeten Stähle sollten außerdem jedoch definierte Eigenschaften aufweisen, welche mit den konservativen Tabellenwerten für die Zugfestigkeit  $f_u$  übereinstimmen, solange keine Bauteilversuche durchgeführt wurden, welche den Ansatz von geringeren Werten rechtfertigen.

<sup>2</sup> Die Stahlsorte 1.4318 erreicht eine 0,2 %-Dehngrenze von 350 N/mm<sup>2</sup> im geglühten Zustand; siehe Tabelle 2.2.

### Elastizitätsmodul

Für die Bemessung im Bauwesen wird ein Wert von  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> für den Elastizitätsmodul aller nichtrostenden Stahlsorten empfohlen.

EN 1993-1-4 und EN 10088-1 empfehlen einen Wert von  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> für den Elastizitätsmodul aller Standardaustenite und Duplex-Sorten, welche üblicherweise im Bauwesen eingesetzt werden. Für ferritische Sorten wird ein Wert von  $220 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> empfohlen. Jedoch haben Versuche mit ferritischen nichtrostenden Stählen einheitlich gezeigt, dass ein Wert von  $200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> angemessener scheint und es ist zu erwarten, dass in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 dieser Wert für eine Bemessung im Bauwesen für alle nichtrostenden Stähle empfohlen wird.

Zur Abschätzung von Verformungen ist jedoch der Sekantenmodul besser geeignet, siehe Kapitel 6.4.6. Für die Querdehnzahl kann ein Wert von 0,3 und für den Schubmodul  $G$  ein Wert von  $76,9 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup> angesetzt werden.

### 2.3.2 Hohlprofile

Es existieren zwei Normen für kreisförmige Hohlprofile aus nichtrostendem Stahl, welche beide sowohl technische Eigenschaften als auch chemische Zusammensetzungen definieren:

EN 10296-2 *Geschweißte kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen – Technische Lieferbedingungen – Teil 2: Nichtrostende Stähle*

EN 10297-2 *Nahtlose kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen – Technische Lieferbedingungen – Teil 2: Rohre aus nichtrostenden Stählen*

Es gibt keine entsprechende Norm für rechteckige Hohlprofile aus nichtrostendem Stahl.

Eine europäische Norm, welche tragende Bauteile aus Hohlprofilen (rechteckige und kreisförmige) aus nichtrostendem Stahl im Bauwesen umfasst, wird zurzeit erarbeitet. Solange diese noch nicht verfügbar ist, ist es für tragende Bauteile aus Hohlprofilen im Bauwesen üblich, die Zusammensetzung und Festigkeiten nach EN 10088 sowie die Toleranzen aus der entsprechenden Norm für rechteckige Hohlprofile aus Baustahl zu beziehen.

### **2.3.3 Schrauben**

Für nichtrostende Schrauben gilt EN ISO 3506, *Mechanische Eigenschaften von Verbindungselementen aus nichtrostenden Stählen*. Die nachfolgenden Informationen beziehen sich auf die überarbeitete Version von EN ISO 3506, welche voraussichtlich im Jahr 2017 veröffentlicht wird. Diese Norm enthält die chemischen Zusammensetzungen sowie die mechanischen Eigenschaften für Verbindungselemente aus austenitischem, martensitischem, ferritischem und aus Duplex-Stahl. Alternative Materialien, welche nicht explizit von dieser Norm berücksichtigt werden, sind jedoch ebenfalls zulässig, solange sie den physikalischen und mechanischen Eigenschaften entsprechen und ähnliche Korrosionsbeständigkeiten aufweisen.

Entsprechend EN ISO 3506 werden die Werkstoffe für Schrauben und Muttern mit Buchstaben gekennzeichnet: "A" für austenitisch, "F" für ferritisch, "C" für martensitisch und "D" für Duplex. Für Anwendungen im Bauwesen wird der Einsatz von austenitischen oder Duplex-Schrauben empfohlen.

Dem Buchstaben folgt eine Nummer (1, 2, 3, 4, 5, 6 oder 8) welche die Korrosionsbeständigkeit angibt; 1 entspricht dabei der geringsten Korrosionsbeständigkeit und 8 der größten. Tabelle 2.4 zeigt die Bandbreite der chemischen Zusammensetzungen für die austenitischen und Duplex-Schraubenklassen und Tabelle 2.5 enthält die Bezeichnungen gemäß EN ISO 3506 für die nichtrostenden Stähle, die für Verbindungselemente verwendet werden.

**Tabelle 2.4** Chemische Zusammensetzungen von Schrauben aus nichtrostenden Stählen gemäß EN ISO 3506

Stahl-sorte	Chemische Zusammensetzung <sup>a</sup>										Weitere Elemente und Anmerkungen	
	Masse in %											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N		
Austenitische Stähle	A1	0,12	1,0	6,5	0,020	0,15-0,35	16-19	0,7	5-10	1,75-2,25	—	b, c, d
	A2	0,10	1,0	2,0	0,050	0,03	15-20	— <sup>e</sup>	8-19	4	—	f, g
	A3	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	17-19	— <sup>e</sup>	9-12	1	—	5C ≤ Ti ≤ 0,8 und/oder 10C ≤ Nb ≤ 1,0
	A4	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18,5	2,0-3,0	10-15	4	—	g, h
	A5	0,08	1,0	2,0	0,045	0,03	16-18,5	2,0-3,0	10,5-14	1	—	5C ≤ Ti ≤ 0,8 und/oder 10C ≤ Nb ≤ 1,0 <sup>h</sup>
	A8	0,03	1,0	2,0	0,040	0,03	19-22	6,0-7,0	17,5-26	1,5	—	—
Duplex-Stähle	D2	0,04	1,0	6,0	0,040	0,030	19-24	0,10-1,0	1,5-5,5	3	0,05-0,20	Cr+3,3Mo+16N ≤ 24 <sup>i</sup>
	D4	0,04	1,0	6,0	0,040	0,030	21-25	0,10-2,0	1,0-5,5	3	0,05-0,30	24 < Cr+3,3Mo+16N <sup>i</sup>
	D6	0,03	1,0	2,0	0,040	0,015	21-26	2,5-3,5	4,5-7,5	—	0,08-0,35	—
	D8	0,03	1,0	2,0	0,035	0,015	24-26	3,0-4,5	6,0-8,0	2,5	0,20-0,35	W ≤ 1,0

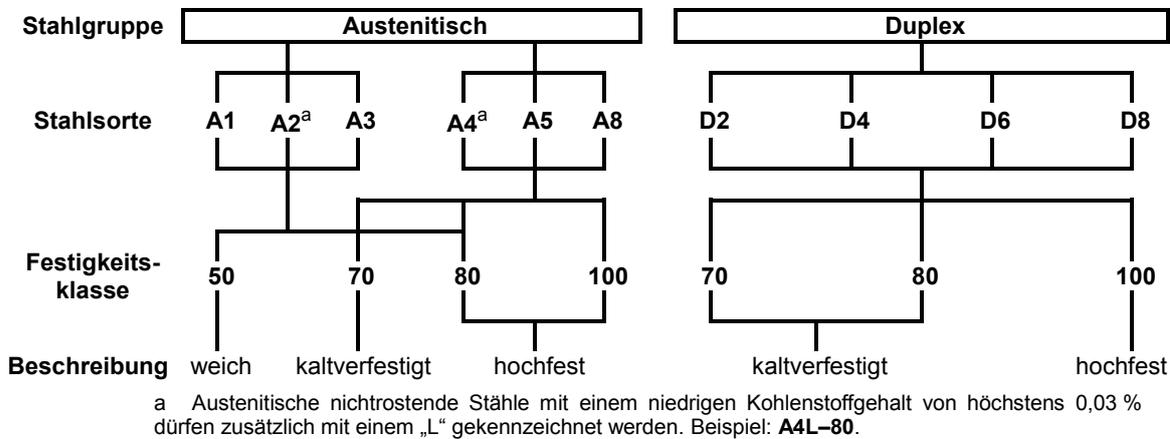
<sup>a</sup> Höchstwerte, soweit keine anderen Angaben gemacht werden.  
<sup>b</sup> Schwefel darf durch Selen ersetzt werden, jedoch sollten nationale Regelungen der betroffenen Länder und Regionen berücksichtigt werden.  
<sup>c</sup> Falls der Massenanteil an Nickel unter 8 % liegt, muss der Massenanteil an Mangan mindestens 5 % betragen.  
<sup>d</sup> Für den Massenanteil an Kupfer gibt es keine Mindestgrenze, sofern der Massenanteil an Nickel über 8 % liegt.  
<sup>e</sup> Molybdän ist nach Wahl des Stahlherstellers zulässig. Falls jedoch für bestimmte Anwendungen eine Einschränkung des Molybdängehaltes notwendig ist, muss dies vom Kunden bei der Bestellung festgelegt werden.  
<sup>f</sup> Falls der Massenanteil an Chrom unter 17 % liegt, sollte der Massenanteil an Nickel mindestens 12 % betragen.  
<sup>g</sup> Bei austenitischen nichtrostenden Stählen mit einem Massenanteil an Kohlenstoff von maximal 0,03 % darf Stickstoff bis zu einem Massenanteil von maximal 0,22 % enthalten sein.  
<sup>h</sup> Der Kohlenstoffgehalt darf nach Wahl des Stahlherstellers, wenn nötig, höher liegen, soweit dies bei größeren Durchmessern zum Erreichen der festgelegten mechanischen Eigenschaften erforderlich ist, jedoch darf dieser bei austenitischen nichtrostenden Stählen einen Massenanteil von 0,12 % nicht überschreiten.  
<sup>i</sup> Diese Formel wird zur Einteilung der Duplex-Stähle in diesen Bemessungshilfen verwendet; sie ist jedoch nicht als Auswahlkriterium für die Korrosionsbeständigkeit gedacht.

**Tabelle 2.5** Bezeichnungen gemäß EN ISO 3506 der nichtrostenden Stähle für Verbindungsmittel

Stahlgruppe	Bezeichnung gemäß ISO 3506	Bezeichnungen der nichtrostender Stähle	Anmerkungen
Austenitisch	A1	1.4570, 1.4305	Entwickelt zur Bearbeitung <sup>1</sup>
	A2	1.4301, 1.4307	Standardaustenite
	A3	1.4541, 1.4550	stabilisierte Standardaustenite
	A4	1.4401, 1.4404	Molybdän-Austenite
	A5	1.4571	stabilisierte Molybdän-Austenite
	A8	1.4529, 1.4547	Superaustenite
Duplex	D2	1.4482, 1.4362	„Lean“ Duplex-Stähle
	D4	1.4162, 1.4062	„Lean“ Duplex-Stähle
	D6	1.4462	„Standard“ Duplex-Stähle
	D8	1.4410, 1.4501, 1.4507	„Super“ Duplex-Stähle

<sup>1</sup> Der hohe Schwefelgehalt verringert die Korrosionsbeständigkeit gegenüber Stählen mit normalem Schwefelgehalt. Mit Sorgfalt auswählen.

Abbildung 2.4 zeigt das Bezeichnungssystem sowie die Festigkeitsklassen für Verbindungsmittel aus austenitischem und Duplex-Stahl. Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften werden üblicherweise durch Kaltverfestigung erreicht und sind dementsprechend abhängig vom Grad der Verfestigung. Tabelle 2.6 zeigt die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Festigkeitsklassen. Austenitische Schrauben der Festigkeitsklasse 50 sind nicht magnetisch, können jedoch in höheren Festigkeitsklassen magnetische Eigenschaften aufweisen.



**Abbildung 2.4** Bezeichnungssystem sowie Festigkeitsklassen für Verbindungsmittel aus austenitischem und Duplex-Stahl

Der Legierungszustand von Verbindungsmitteln der Festigkeitsklasse 50 wird als weich bezeichnet. Verbindungsmittel der Festigkeitsklasse 70 werden aus kaltgezogenen Stäben und solche der Festigkeitsklasse 80 aus hochfest kaltgezogenen Stäben gefertigt. Die Kaltverfestigung der Stäbe kann mitunter geringe Auswirkungen auf die Korrosionsbeständigkeit haben. Verbindungsmittel der Festigkeitsklasse 50 mit geschnittenem Gewinde sind i. d. R. anfälliger gegenüber Fressen der gepaarten Gewinde, siehe Kapitel 11.7.

Die Korrosionsbeständigkeit eines Verbindungsmittels aus nichtrostendem Stahl sollte mindestens so hoch sein wie die des Materials, aus dem die zu verbindenden Bauteile bestehen, d. h. eine Schraube der Sorte A2 (oder besser) sollte verwendet werden, um Bauteile mit der Stahlsorte 1.4301 zu verbinden bzw. eine Schraube der Sorte A4 (oder besser) sollte verwendet werden, um Bauteile der Sorte 1.4401 zu verbinden.

Um die Beanspruchbarkeit einer Schraube auf Zug, Abscheren oder auf eine kombinierte Beanspruchung aus Zug und Abscheren zu bestimmen, sollte für die Zugfestigkeit  $f_{ub}$  die Mindestzugfestigkeit  $R_m$  für die entsprechende Festigkeitsklasse nach Tabelle 2.6 angesetzt werden.

Eine Wasserstoffversprödung tritt weder bei austenitischen noch bei Duplex-Stählen auf, wenn diese nach den üblichen Qualitätskontrollverfahren hergestellt und eingesetzt werden. In den wenigen Fällen, in denen dieses Phänomen bei Duplex-Stählen auftrat, wurde entweder eine schlechte Produktionskontrolle durchgeführt oder es herrschten unübliche Betriebsbedingungen. Das Risiko der Wasserstoffversprödung sollte für hochfeste Bauteile, wie z. B. Schrauben mit Festigkeitsklassen über 80, berücksichtigt werden.

**Tabelle 2.6** *Mindestwerte der mechanischen Eigenschaften von Schrauben aus austenitischen und Duplex-Stählen*

Stahlgruppe	Bezeichnung gemäß ISO 3506	Festigkeitsklasse	Zugfestigkeit, $R_m$ MPa	0,2 %-Dehngrenze, $R_{pf}$ MPa	Bruchdehnung mm
Austenitisch	A1, A2, A3, A5	50	500	210	0,6 $d$
		70	700	450	0,4 $d$
		80	800	600	0,3 $d$
	A4	50	500	210	0,6 $d$
		70	700	450	0,4 $d$
		80	800	600	0,3 $d$
		100	1000	800	0,2 $d$
	A8	70	700	450	0,4 $d$
		80	800	600	0,3 $d$
		100	1000	800	0,2 $d$
Duplex	D2, D4, D6, D8	70	700	450	0,4 $d$
		80	800	600	0,3 $d$
		100	1000	800	0,2 $d$

### 2.3.4 Bruchfestigkeit

Austenitische nichtrostende Stähle weisen keinen ausgeprägten Temperaturübergangsbereich zwischen duktilem und sprödem Verhalten auf; ihre Zähigkeit nimmt mit fallender Temperatur allmählich ab. Sie kommen daher üblicherweise bei Tieftemperaturanwendungen zum Einsatz, da sie eine ausreichende Zähigkeit für Betriebstemperaturen bis zu  $-40^{\circ}\text{C}$  aufweisen.

Ferritische und Duplex-Stähle weisen dagegen einen ausgeprägten Temperaturübergangsbereich zwischen duktilem und sprödem Verhalten auf. „Lean“ Duplex-Stähle besitzen ausreichende Zähigkeiten für Betriebstemperaturen bis zu  $-40^{\circ}\text{C}$ . Die höherlegierten Duplex-Sorten wie z. B. 1.4462 weisen sogar noch höhere Zähigkeiten auf.

Versuchsergebnisse zeigen, dass ferritische Stähle bei den niedrigsten Betriebstemperaturen, die bei internen Anwendungen auftreten können, ihre Duktilität beibehalten. Die Sorte 1.4003 weist eine veränderte Atomstruktur auf, was zu deutlich höheren Zähigkeiten führt, als es bei anderen ferritischen Sorten der Fall ist; diese Sorte ist daher für tragende Bauteile mit dicken Querschnitten i. d. R. am besten geeignet. Es wird empfohlen, die Sorte 1.4016 nicht für Bauteile mit Dicken größer als 3 mm zu verwenden, wenn Betriebstemperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  erwartet werden. Für die Stähle 1.4509, 1.4521 und 1.4621 wird eine maximale Dicke von 2 mm bei Anwendungen unter  $0^{\circ}\text{C}$  empfohlen.

Bisher gibt es noch keine Hinweise darauf, dass Terrassenbruch in Dickenrichtung bei nichtrostenden Stählen auftritt.

## 2.4 Physikalische Eigenschaften

Tabelle 2.7 enthält physikalische Eigenschaften bei Raumtemperatur derjenigen nichtrostenden Stähle im geglihten Zustand gemäß EN 10088, welche auch in diesen Bemessungshilfen berücksichtigt werden. Die physikalischen Eigenschaften können, abhängig von der Produktform und -größe, leicht variieren, was jedoch für die allgemeine Anwendung unkritisch ist.

**Tabelle 2.7** *Physikalische Eigenschaften bei Raumtemperatur von nichtrostenden Stählen im geglühten Zustand*

Stahlgruppe	Stahl-sorte	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	Wärmeausdehnungskoeffizient 20 – 100°C (10 <sup>-6</sup> /K)	Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	Spezifische Wärmekapazität (J/kgK)
Austenitisch	1.4301	7900	16	15	500
	1.4307	7900	16	15	500
	1.4401	8000	16	15	500
	1.4318	7900	16	15	500
	1.4404	8000	16	15	500
	1.4541	7900	16	15	500
	1.4571	8000	16,5	15	500
Duplex	1.4062	7800	13	15	480
	1.4162	7700	13	15	500
	1.4362	7800	13	15	500
	1.4482	7800	13	13	500
	1.4462	7800	13	15	500
	1.4662	7700	13	15	500
Ferritisch	1.4003	7700	10,4	25	430
	1.4016	7700	10	25	460
	1.4509	7700	10	25	460
	1.4521	7700	10,4	23	430
	1.4621	7700	10	21	460
Baustahl	S355	7850	12	53	440

Es gilt zu beachten, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient für austenitische nichtrostende Stähle ca. 30 % größer ist als der für Baustahl. Für den Fall, dass Baustahl und austenitischer nichtrostender Stahl zusammen verwendet werden, sollten die Auswirkungen der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten bei der Bemessung berücksichtigt werden. Die Wärmeleitfähigkeit von austenitischem und Duplex-Stahl beträgt ca. 30 % des Wertes von Baustahl. Ferritische Sorten haben eine etwas höhere Wärmeleitfähigkeit, welche ca. 50 % des Wertes von Baustahl beträgt. Die Wärmeausdehnung der ferritischen Stähle ist deutlich geringer als die der austenitischen Stähle aber annähernd so groß wie der Wert von Baustahl.

Ferritische und Duplex-Stähle sind magnetisch, während geglühte austenitische nichtrostende Stähle im Wesentlichen nicht magnetisch sind. Für den Fall, dass eine sehr geringe magnetische Leitfähigkeit benötigt wird, gibt es spezielle austenitische Sorten und die Auswahl an Schweißzusätzen muss mit großer Sorgfalt geschehen, um Ferrit im Schweißbereich möglichst vollständig zu beseitigen. Diese

Schweißzusätze bewirken vollständige (zu 100 %) austenitische Verfestigung im Schweißmaterial. Eine starke Kaltverfestigung besonders bei niedrig legierten austenitischen Stählen kann ebenfalls die magnetische Leitfähigkeit erhöhen; ein nachträgliches Glühen würde die nichtmagnetischen Eigenschaften jedoch wiederherstellen.

## **2.5 Temperatureffekte**

Austenitische nichtrostende Stahlsorten eignen sich für Anwendungen bei tiefen Temperaturen. Bei hohen Temperaturen über ca. 550°C behalten austenitische Stähle einen größeren Anteil ihrer Festigkeit als Baustähle. Die vorliegenden Bemessungshilfen behandeln allerdings nicht die Bemessung von Tragwerken, die längere Zeit extrem tiefen oder extrem hohen Temperaturen ausgesetzt sind. Es sei angemerkt, dass in solchen Fällen andere Materialeigenschaften sowie andere Korrosionsarten als die in Abschnitt 3 erläuterten eine größere Bedeutung haben können. Bei hohen Temperaturen eignen sich in den meisten Fällen andere als die hier vorgestellten nichtrostenden Stähle besser, so dass nähere Informationen hierzu eingeholt werden sollten.

Aufgrund einer möglichen Versprödung sollten nichtrostende Duplex-Stähle nicht bei langzeitigen Anwendungen unter Temperaturen von über ca. 250 bis 300°C eingesetzt werden.

Abschnitt 8 enthält die Vorgehensweise beim Brandschutznachweis und weitere mechanische und physikalische Eigenschaften bei hohen Temperaturen.

## **2.6 Verzinken und der Kontakt mit geschmolzenem Zink**

Das Feuerverzinken von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl ist nicht zulässig, da der Kontakt mit geschmolzenem Zink bei nichtrostendem Stahl eine Versprödung verursachen kann. Für den Brandfall sollten entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um sicherzustellen, dass geschmolzenes Zink von feuerverzinktem Baustahl nicht auf Bauteile aus nichtrostendem Stahl tropft oder über diese fließt und dadurch eine Versprödung verursacht. Außerdem besteht die Gefahr der Versprödung für den Fall, dass ein Bauteil aus nichtrostendem Stahl mit einem Bauteil aus Baustahl, welches anschließend feuerverzinkt wird, verbunden wird.

## **2.7 Verfügbarkeit der Produktformen**

### **2.7.1 Allgemeine Produktformen**

Blech- und Stabprodukte sind i. d. R. in den nichtrostenden Stahlsorten verfügbar, die in diesen Bemessungshilfen berücksichtigt werden. Die ferritischen Sorten sind im Allgemeinen nur bis zu einer Dicke von ca. 4 mm erhältlich.

Hohlprofile werden aus austenitischen Stahlsorten, aus einigen Duplex-Sorten wie z. B. 1.4462 oder 1.4162 sowie weit verbreitet aus den Standardferriten 1.4003 oder 1.4016 gefertigt. Für tragende Komponenten werden üblicherweise kaltgeformte (gerollte) Hohlprofile verwendet, warmgewalzte Hohlprofile sind hierfür aber ebenfalls möglich. Rechteckhohlprofile können u. a. auch durch das Verschweißen von zwei, mittels einer Biegepresse gekanteten, U-Profilen gefertigt werden.

Offene Profile werden i. d. R. durch Kaltumformen, (Lichtbogen- oder Laser-) Schweißen oder Extrusion (Strangpressen) gefertigt. Eine Auswahl an Winkel-, U-, I- und T-Profilen ist in den Abmessungen der standardmäßigen Baustahlprofile erhältlich (z. B. IPE- oder IPN-Reihe); dabei sind die kleineren Profile warmgewalzt und die größeren geschweißt. Für offene Profile sind die Standardaustenite 1.4301

und 1.4401 generell verfügbar; für Duplex-Stähle müssen i. d. R. Sonderbestellungen erfolgen. Warmgewalzte Profile sind nur in den austenitischen Sorten 1.4301 und 1.4401 erhältlich.

Die Abmessungen für die standardmäßigen Hohl- und offenen Profile sind in der online nutzbaren Bemessungssoftware sowie in den Versionen für mobile Endgeräte hinterlegt (erhältlich unter [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual)).

Material im kaltverfestigten Zustand ist bei den Standardausteniten in verschiedenen Erzeugnisformen lieferbar, einschließlich Bleche, Band, Stäbe und Hohlprofile:

- Bleche, Band (üblicherweise mit Erzeugnisdicken  $\leq 6,0$  mm),
- Rundstäbe (mit Durchmessern von 5 mm bis 60 mm),
- Rechteckhohlprofile (Querschnittsabmessungen bis zu 400 mm, Erzeugnisdicken von 1,2 mm bis 12 mm).

### **2.7.2 Kaltumformen**

Es ist wichtig, dass frühzeitig mit den in Frage kommenden Verarbeitungsbetrieben Kontakt aufgenommen wird, um die Grenzen der Kaltverformung für dickere warmgewalzte Bleche aus nichtrostendem Stahl festzulegen. Nichtrostende Stähle erfordern höhere Umformungskräfte als Baustähle und weisen andere elastische Rückverformungseigenschaften auf. Die Länge gekanteter kaltgeformter Profile wird zwangsläufig entweder durch die Größe der Biegepresse oder bei höherfesten bzw. dickeren Bauteilen durch die Maschinenleistung begrenzt. Bei Duplex-Stählen werden im Vergleich zu austenitischen Werkstoffen fast doppelt so große Umformungskräfte erforderlich, weswegen das Sortiment an Querschnitten aus Duplex-Stahl weniger umfangreich ist, obwohl die größeren Festigkeiten den Einsatz von dünnen Querschnitten ermöglichen. Aufgrund der geringeren Duktilität der Duplex-Stähle müssen allerdings größere Biegeradien vorgesehen werden. Dünnwandige Hohlprofile werden i. d. R. gewalzt oder geschweißt. Warmgewalzte austenitische Bleche mit einer Dicke von bis zu 13 mm können kaltgewalzt werden, um Querschnitte wie z. B. Winkelprofile zu fertigen. Weitere Hinweise finden sich in Abschnitt 11.5.2.

### **2.7.3 Warmwalzen**

Bleche aus nichtrostendem Stahl, welche für das Kaltumformen zu dick sind, werden erwärmt und danach durch Warmwalzen in ihre endgültige Form gebracht. Dieses Verfahren ist bei größeren Produktionsmengen i. d. R. am wirtschaftlichsten. Eine Vielzahl an Blechdicken und -breiten wird eingesetzt, um mittlere bis große Bauteile zu fertigen. Winkel- und U-Profile werden üblicherweise auf diese Art gefertigt. Durch die Kombination von Warmwalzen und Schweißen können weitere Querschnitte entstehen. Beispielsweise können I-förmige Profile aus zwei aneinander geschweißten U-Profilen gefertigt werden. Dickwandige Hohlprofile werden meistens durch eine Kombination aus Warmwalzen und Schweißen gefertigt.

### **2.7.4 Strangpressen**

Warmgefertigte Strangpressprofile aus nichtrostendem Stahl werden aus Stäben gefertigt. Falls die gewünschte Form nicht den üblichen Geometrien entspricht, kann eine größere Produktionsmenge nötig werden, damit die Kosten der Form gedeckt werden. Die maximale Größe hängt vom jeweiligen Hersteller ab, muss aber in jedem Fall durch einen Kreis von 330 mm Durchmesser hindurchpassen. Querschnitte können i. d. R. bis zu einer Länge von 10 m zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich zu den üblichen Querschnittsformen kann mit dem Strangpressen eine große Auswahl an den Wünschen des Kunden entsprechend gefertigten Formen hergestellt werden, welche ansonsten eine maschinelle Bearbeitung oder eine nach

Maß geschweißte Fertigung erfordern würden. Hinsichtlich der Mindestwerte für Eckradien bzw. Querschnittsdicken sollte sich an entsprechende Lieferanten gewandt werden.

### **2.7.5 Zusammengeschweißte Bleche**

Bauteile aus zusammengeschnittenen Blechen werden i. d. R. dann verwendet, wenn wenige maßgefertigte Formen erforderlich sind, scharfe Kanten oder keine geneigten Schenkel gewünscht werden oder wenn Bauteile sehr groß sind. Werden beispielsweise für ein Projekt nur wenige aber sehr große oder ungewöhnlich geformte Bauteile benötigt, wenden erfahrene Fertiger meistens bewährte Verfahren an, um Bleche zusammenzuschweißen.

Lasergeschweißte Winkelprofile, Träger, U-, T- und Hohlprofile werden zunehmend von Lieferanten in gebräuchlichen Größen gelagert. Winkelprofile, Träger und U-Profile können bis zu einer Größe von 400 mm aus austenitischem nichtrostendem Stahl verfügbar sein. Größere Querschnitte und Querschnitte aus Duplex-Stahl können ebenfalls produziert werden.

### **2.7.6 Oberflächenbeschaffenheit**

Bei bestimmten Anwendungen sind die Oberflächenbeschaffenheit oder eine gleichmäßige Optik wichtig für die Korrosionsbeständigkeit, die Ästhetik bzw. die Oberflächenreinigung. EN 10088-4 und -5 beschreiben eine Reihe von üblichen Oberflächenbeschaffenheiten, von matten, werksseitigen bis hin zu blankpolierten. Jede Oberflächenbeschaffenheit wird dabei über eine Nummer (1 für warmgewalzte und 2 für kaltgewalzte Oberflächen) gefolgt von einem Buchstaben definiert. Dickwandige Hohlprofile besitzen i. d. R. die Oberflächenausführung 1D (warmgewalzt, wärmebehandelt, gebeizt<sup>1</sup>). Für architektonische Anwendungen werden üblicherweise kaltgewalzte Oberflächen gewählt, da diese glatter sind als warmgewalzte, beispielsweise ist die Oberflächenausführung 2B (kaltgewalzt, wärmebehandelt, gebeizt, kalt nachgewalzt) eine übliche kostengünstige werksseitige Oberfläche. Weitere kundenspezifische Oberflächenbeschaffenheiten, welche speziell für die optische Beständigkeit in der Architektur entwickelt wurden, sind ebenfalls verfügbar. Es bleibt anzumerken, dass es durch Veränderungen im Bearbeitungsprozess zu unterschiedlichen Erscheinungsbildern bei unterschiedlichen aber auch bei ein und demselben Hersteller kommen kann, weshalb Lieferanten über die Oberflächenanforderungen informiert werden müssen. Es wird empfohlen, dass Käufer und Lieferant sich mit Hilfe einer Referenzprobe einigen. Auf blanken Oberflächen ist jede Unebenheit deutlich sichtbar. Dagegen wirken matte Oberflächen stets ebener. Dabei bestehen von vornherein geringe Unterschiede in der natürlichen silbernen Farbe der verschiedenen nichtrostenden Stahlsorten (austenitisch, ferritisch und Duplex), welche bei der Planung berücksichtigt werden sollte.

### **2.7.7 Schrauben**

Schrauben der Festigkeitsklasse 70 gemäß EN ISO 3506 sind am häufigsten verfügbar. Bei bestimmten Größen- und Längenbeschränkungen sollte entsprechend auf EN ISO 3506 verwiesen werden. Es ist möglich, „Sonderanfertigungen“ auf Bestellung zu erhalten, wodurch manchmal wirtschaftlichere Lösungen erreicht werden können.

---

<sup>1</sup> Beizen ist das Entfernen einer dünnen Metallschicht an der Oberfläche des nichtrostenden Stahls, üblicherweise durch Auftragen einer Mischung aus Salpeter- und Flusssäure. Alternativ sind auch weniger aggressive Verbindungen bei speziellen Lieferanten erhältlich.

Schrauben können auf verschiedene Weise hergestellt werden, z. B. durch Zerspanung, Kaltumformung oder Schmieden. Gedrehte Gewinde sind aufgrund der beim Umformen auftretenden Verfestigung widerstandsfähiger als geschnittene Gewinde. Die Druckspannungen an den Oberflächen gedrehter Gewinde verbessern die Widerstandsfähigkeit gegen Ermüdungskorrosion und, in einigen Fällen, gegen Spannungsrisskorrosion. Gedrehte Gewinde besitzen außerdem eine größere Widerstandsfähigkeit gegen Fressen in den gepaarten Gewinden. Umformen ist die häufigste Methode zur Herstellung von Schrauben, insbesondere für großen Mengen von üblichen Größen. Bei größeren Schrauben (z. B. M36 oder größer) und besonders bei den härteren Duplex-Schrauben werden die Gewinde i. d. R. geschnitten.

## 2.8 Lebenszykluskosten und Umweltbelastung

Das Bewusstsein, dass die Lebenszykluskosten (bzw. die Kosten für die gesamte Nutzungsdauer) und nicht nur die Anfangsinvestitionskosten bei der Materialauswahl berücksichtigt werden sollten, nimmt immer mehr zu. Erfahrungen zeigen, dass, um spätere Instandhaltungen, Ausfallzeiten und Ersatzteile zu vermeiden, der Einsatz von korrosionsbeständigen Materialien eine kosteneffizientere Lösung sein kann, auch wenn die Anfangsinvestitionen für das Material zunächst größer sind. Bei den Lebenszykluskosten wird u. a. folgendes berücksichtigt:

- Anfangsinvestitionskosten,
- Instandhaltungskosten,
- bezogene Schrottanteile von Deponien bzw. Recycling-Güter,
- Lebensdauer sowie die Umgebung.

Die Rohstoffkosten eines Produktes aus nichtrostendem Stahl sind abhängig von der Stahlsorte wesentlich höher als bei einem vergleichbaren Produkt aus Baustahl. Allerdings können ebenso anfängliche Kosteneinsparungen erzielt werden, da keine korrosionsbeständigen Beschichtungen benötigt werden. Durch die Verwendung von hochfesten nichtrostenden Stählen können Bauteilquerschnitte und somit das Gesamtgewicht des Bauwerks reduziert werden, wodurch wiederum die Anfangsinvestitionskosten sinken. Außerdem können erhebliche langfristige Einsparungen bei den Wartungskosten erzielt werden, da eine Instandhaltung der Beschichtung bzw. ein Austauschen von korrodierten Bauteilen nicht mehr nötig werden.

Die hervorragende Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Stählen sorgt für geringere Inspektionshäufigkeiten und -kosten, geringere Wartungskosten und eine längere Lebensdauer.

Nichtrostender Stahl hat einen hohen Restverwertungswert (d. h. der Wert am Ende der Nutzungsdauer eines Bauwerks), allerdings spielt dieser Faktor bei einem Bauwerk mit einer langen geplanten Nutzungsdauer (von z. B. über 50 Jahren) nur selten eine entscheidende Rolle. Allerdings wird aufgrund dieses hohen Restverwertungswertes Schrott von Deponien bezogen und in neuem Metall wiederverwertet. Gleichzeitig sind die Recycling-Raten nach Ablauf der Lebensdauer dadurch sehr hoch. Stahlhersteller verwenden so viel Schrott wie möglich, allerdings wird die Verfügbarkeit durch die durchschnittliche Materiallebensdauer von ca. 20 bis 30 Jahren begrenzt. Üblicherweise liegt der Anteil an recyceltem Stahl in allen nichtrostenden Stahlsorten bei mindestens 60 %. Nichtrostender Stahl ist zu 100 % recycelbar und kann daher unbegrenzt zu neuem, qualitativ hochwertigem nichtrostendem Stahl wiederverwertet werden.

Die Berechnung der Lebenszykluskosten basiert auf dem Ansatz der Diskontierung des gesamten Zahlungsstroms, um alle Kosten auf ihre Gegenwartswerte abzuzinsen. Der Diskontierungszinssatz setzt sich anteilig aus der Inflationsrate, Bankzinsen, Steuern und gegebenenfalls einem Risikoaufschlag zusammen. Hierdurch wird die Vergleichbarkeit der vorhandenen Alternativen sichergestellt und ein potentieller Langzeitvorteil durch die Verwendung von nichtrostendem Stahl im Vergleich zu anderen Materialien kann ermittelt werden.



# 3 DAUERHAFTIGKEIT UND WERKSTOFFAUSWAHL

## 3.1 Einführung

Nichtrostende Stähle sind im Allgemeinen sehr korrosionsbeständig und bieten unter den meisten Umgebungsbedingungen einen ausreichenden Korrosionsschutz. Die Korrosionsbeständigkeit eines nichtrostenden Stahls hängt vorrangig von den jeweiligen Legierungsbestandteilen ab, wodurch jede Sorte ein spezifisches Verhalten in aggressiver Umgebung aufweist. Daher sollte die am besten geeignete Stahlsorte für jeden Anwendungsfall sehr sorgfältig ausgewählt werden. Im Allgemeinen gilt, je höher der erforderliche Grad der Korrosionsbeständigkeit ist, desto höher sind die Materialkosten. Beispielhaft kostet die Stahlsorte 1.4401 aufgrund der Zugabe von Molybdän mehr als die Sorte 1.4301. Mit nichtrostenden Duplex-Stählen kann bei vergleichsweise geringeren Materialkosten eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit erzielt werden. Außerdem können durch die höheren Festigkeiten geringere Querschnittsgrößen realisiert und somit weitere Materialkosten eingespart werden.

Austenitischer Stahl im kaltverfestigten Zustand weist eine vergleichbare Korrosionsbeständigkeit auf wie Material im geglähten Zustand.

Die Hauptgründe, weswegen Metalle den Erwartungen hinsichtlich ihrer Korrosionsbeständigkeit nicht gerecht werden, sind:

- (a) falsche Beurteilung der Umgebungsbedingungen oder Umwelteinflüsse, die nicht den vorangegangenen Erwartungen entsprechen, wie z. B. unerwartete Verunreinigungen durch Chloridionen oder unvermutet hohe Ablagerungen an Oberflächen;
- (b) für nichtrostenden Stahl ungeeignete Fertigungstechniken (z. B. Schweißen, Wärmebehandlung und Erwärmen während des Umformens), unvollständiges Entfernen von Anlauffarben oder Oberflächenverunreinigungen können die Korrosionsanfälligkeit erhöhen;
- (c) zu grobe oder falsche Oberflächenbehandlung.

Selbst wenn Oberflächenverfärbungen oder Korrosion entstehen, ist es dennoch nicht sehr wahrscheinlich, dass die Tragfähigkeit des Bauwerks oder eines Bauteils beeinträchtigt wird. Allerdings können unansehnliche Roststellen an äußeren Sichtflächen trotzdem vom Kunden als Mangel angesehen werden. Neben der sorgfältigen Werkstoffauswahl können eine gute Planung sowie eine fachgerechte Ausführung die Wahrscheinlichkeit für Verfärbungen und Korrosion vermindern; baupraktische Hinweise finden sich in Kapitel 11. Die Erfahrung zeigt, dass gravierende Korrosionsschäden am ehesten bereits in den ersten zwei oder drei Nutzungsjahren auftreten.

Unter bestimmten, meist aggressiven Umgebungsbedingungen zeigen auch einige nichtrostende Stahlsorten Anfälligkeiten gegenüber örtlich begrenzter Korrosion. Im nachfolgenden Abschnitt werden sechs Korrosionsarten beschrieben, wobei die letzten drei sehr selten in Bauwerken auftreten.

Es sei noch zu erwähnen, dass Feuchtigkeit (z. B. durch Kondensation) eine notwendige Voraussetzung für das Auftreten von Korrosion ist.

## 3.2 Korrosionsarten und Verhalten der Stahlsorten

### 3.2.1 Lochfraßkorrosion

Wie der Name schon vermuten lässt, entstehen bei der Lochfraßkorrosion örtlich begrenzte Vertiefungen an der Oberfläche. Diese entstehen als Resultat örtlichen Aufbrechens der Passivschicht, üblicherweise hervorgerufen durch Chloridionen, obwohl auch andere Halogenide oder Anionen einen ähnlichen Effekt bewirken können. In einem entstehenden Loch können Korrosionsprodukte sehr aggressive Lösungen bilden, wodurch die weitere Korrosion oftmals beschleunigt wird. Bei den meisten Anwendungen ist das Ausmaß des sogenannten Lochfraßes vermutlich nur oberflächlich, sodass die Verminderung eines Bauteilquerschnittes vernachlässigbar ist. Allerdings 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 bei weitem die häufigste Ursache für Lochfraßkorrosion in Außenbereichen darstellen, sind Küstengebiete und Umgebungen mit hohem Tausalzvorkommen deutlich aggressiver. Neben dem Chloridgehalt hängt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Nutzungsumgebung Lochfraß verursacht, von weiteren Einflussfaktoren wie der Temperatur, korrosiven Schadstoffen bzw. Partikeln, dem Säure- oder Basengehalt, dem Gehalt an Oxidationsmitteln und schließlich auch von der Anwesen- bzw. Abwesenheit von Sauerstoff ab. Die Beständigkeit eines nichtrostenden Stahls gegenüber Lochfraßkorrosion wird durch dessen chemische Zusammensetzung bestimmt, wobei Chrom, Molybdän bzw. Stickstoff jeweils die Korrosionsbeständigkeit verbessern.

Das Lochfraßbeständigkeitsäquivalent (englisch: Pitting Resistance Equivalent (PRE)), oder auch Wirksumme (WS) genannt, ist eine empirisch hergeleitete Abschätzung der Lochfraßbeständigkeit und wird wie folgt definiert:

$$\text{PRE (WS)} = \text{Cr [Masse in \%]} + 3,3 \text{ Mo [Masse in \%]} + 16 \text{ N [Masse in \%]}$$

Die Ermittlung der Wirksumme eines nichtrostenden Stahls bietet eine sinnvolle Möglichkeit, um seine Korrosionsbeständigkeit in Relation zu anderen nichtrostenden Stählen zu stellen, allerdings sollte sie nur als ein erster grober Indikator betrachtet werden. Geringe Abweichungen der WS können leicht durch andere Faktoren, welche ebenfalls die Lochfraßbeständigkeit beeinflussen, überdeckt werden. Daher sollte die WS nicht das einzige Auswahlkriterium sein.

Die Sorte 1.4301 hat von den austenitischen nichtrostenden Stählen, die in diesen Bemessungshilfen betrachtet werden, die geringste WS, weshalb sich bei Anwendungen in gering bis mäßig aggressiven Küstengebieten oder in Umgebungen mit Tausalzbelastung Oberflächenkorrosion zeigt. Daher ist sie nicht geeignet für Umgebungen in denen Sprühnebel/Dunst oder Spritzwasser auftreten bzw. in denen ein Eintauchen in Flüssigkeiten (meist Wasser) stattfinden kann. Auch unter Industrietatmosphären können bei dieser austenitischen Sorte unerwünschte Ausmaße von Lochfraßkorrosion entstehen.

In gering bis mäßig aggressiven Umgebungen sowie bei industrieller Verschmutzung, Küstengebieten oder bei Umgebungen mit Tausalzchloriden werden stattdessen die austenitische Sorte 1.4401 bzw. die Duplex-Sorten 1.4362 oder 1.4162 bevorzugt verwendet. Ist die Verschmutzung oder die Salzbelastung in der Umgebung noch größer, ist die Duplex-Sorte 1.4462 oder sogar eine noch korrosionsbeständigere nichtrostende Stahlsorte generell eine Option.

### 3.2.2 Spaltkorrosion

An schmalen, unversiegelten Spalten, bei denen ein Wasserfilm sowohl innerhalb als auch außerhalb des Spaltes vorhanden ist, kann Spaltkorrosion entstehen. Der Spalt muss dabei schmal genug sein, sodass einerseits zwar Wasser mit gelöstem Chlorid aber kein weiterer Sauerstoff eindringen kann.

Spaltkorrosion kann grundsätzlich durch das Versiegeln oder die Beseitigung von Spalten verhindert werden. Die Korrosionsgefahr an einem Spalt hängt sehr stark von seiner Geometrie ab: je schmaler und tiefer der Spalt ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit für Korrosion.

Bauteilanschlüsse, die nicht unter Wasser liegen, sollten so konstruiert werden, dass sie Feuchtigkeit abweisen. Einige nichtrostende Stähle, wie z. B. die austenitischen Sorten 1.4301 und 1.4401, sind besonders anfällig für Spaltkorrosion, wenn Chloride oder Salze in der Umgebung vorhanden sind. Korrosionsbeständigere Austenite sowie Duplex-Stähle sind dagegen weniger anfällig und ihre Korrosionsbeständigkeit hängt von den äußeren Bedingungen ab, besonders von der Temperatur.

Die Korrosionsgefahr bei Spalten, die dauerhaft unter Wasser liegen, ist grundsätzlich größer als bei Spalten deren Umgebungsbedingungen sowohl nasse als auch trockene Phasen oder eine durchgängige, aber nur geringe Feuchtigkeit aufweisen. Schmale, unter Wasser liegende Spalte sind deutlich gefährdeter, da der vorhandene Sauerstoff, welcher zur Aufrechterhaltung der Passivschicht benötigt wird, begrenzt ist.

Spalte können an Anschlüssen metallischer Bauteile, an Dichtungsprofilen, durch biologische Verschmutzungen, durch Ablagerungen an Oberflächen (wie z. B. Partikel, Blätter, Lebensmittel oder Bauschutt) und durch materielle Imperfektionen an Oberflächen, z. B. durch eingelagertes Eisen, entstehen. Spalte überall zu vermeiden, ist nicht realistisch, jedoch sollte der größtmögliche Aufwand zur Vorbeugung betrieben werden.

Wie schon bei der Lochfraßkorrosion verbessern die Legierungselemente Chrom, Molybdän und Stickstoff die Beständigkeit gegen Spaltkorrosion, welche, ausgehend von den Austeniten der Stahlsorte 1.4301 über die Sorte 1.4401 bis hin zur Duplex-Stahlsorte 1.4462 ansteigt.

### 3.2.3 Bimetallkorrosion (Kontaktkorrosion/galvanische Korrosion)

Wenn ein elektrischer Kontakt zwischen zwei unterschiedlichen Metallen besteht und diese außerdem durch einen Elektrolyten (z. B. eine elektrisch leitende Flüssigkeit wie Meerwasser oder unreines Süßwasser) überbrückt werden, fließt ein Strom vom anodischen bzw. unedleren zum kathodischen bzw. edleren Metall durch den Elektrolyten hindurch. Infolgedessen korrodiert das unedlere der beiden Metalle.

Nichtrostende Stähle bilden in einem galvanischen Paar i. d. R. die Kathode, wodurch sie keiner zusätzlichen Korrosionsgefahr ausgesetzt sind. Nichtrostende Stähle und Kupferlegierungen liegen bezüglich ihrer galvanischen Eigenschaften eng beieinander, weshalb diese unter mäßig aggressiven Umgebungsbedingungen bedenkenlos in direktem Kontakt stehen können.

Diese Art der Korrosion wird besonders relevant bei der Betrachtung von Verbindungen aus nichtrostendem Stahl mit Baustählen oder anderen niedrig legierten Stählen sowie mit wetterfesten Stählen oder Aluminium. Dabei sollte

sichergestellt werden, dass z. B. Schweißzusatzwerkstoffe mindestens so edel sind wie das korrosionsbeständigste Material der Verbindung (i. d. R. der nichtrostende Stahl). Ebenso sollte bei geschraubten Anschlüssen das Schraubenmaterial gleichwertig mit dem korrosionsbeständigsten Metall in der Verbindung sein. Bimetallkorrosion zwischen verschiedenen nichtrostenden Stahlsorten tritt selten auf und wenn, dann nur bei vollständig unter Wasser liegenden Verbindungen.

Bimetallkorrosion kann vermieden werden, indem der Stromfluss durch folgende Maßnahmen verhindert wird:

- Isolierung ungleicher Metalle, um die metallische Stromleitung zu unterbrechen (siehe Kapitel 7.1.1),
- verhindern einer Elektrolytbrücke durch Unterbrechung dieser mit Hilfe von Anstrichen oder anderen Beschichtungen. Soll diese Schutzmaßnahme angewendet werden und können nicht beide Metalle beschichtet werden, dann sollte zumindest das edlere Metall mit einer Beschichtung versehen werden (im Falle einer Verbindung von nichtrostendem Stahl mit Baustahl ist dies der nichtrostende Stahl).

Das Risiko eines großen Korrosionsschadens ist am höchsten, 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 Baustählen sollte besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Befinden sich nämlich gerade kleinere Poren oder winzige Löcher in der Beschichtung, so führt eben diese kleine Oberfläche des ungeschützten Baustahls zu einem sehr großen Flächenverhältnis zwischen Kathode und Anode, so dass ein starker Lochfraß am Baustahl auftreten kann. Bei unter Wasser liegenden Bauteilen ist das Risiko einer solchen Korrosion erwartungsgemäß am größten. Aus diesem Grund sollte der nichtrostende Stahl ebenfalls beschichtet werden und zwar bis zu einem Abstand von mindestens 75 mm von der Verbindungsstelle entfernt, sodass durch die Poren nur kleine Flächenverhältnisse entstehen.

Ungünstige Oberflächenverhältnisse entstehen i. d. R. durch Verbindungsmittel und an Anschlüssen. Der Einsatz von Baustahlschrauben in Bauteilen aus nichtrostendem Stahl sollte vermieden werden, da das Oberflächenverhältnis zwischen nichtrostendem Stahl und Baustahl groß wäre und die Schraube demzufolge einem hohen Korrosionsrisiko ausgesetzt wird. Im umgekehrten Fall ist das Korrosionsrisiko bei einem Bauteil aus Baustahl oder Aluminium durch eine Schraube aus nichtrostendem Stahl verhältnismäßig gering. Erfahrungen unter ähnlichen Bedingungen können dabei helfen, wenn unterschiedliche Metalle unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen mit gelegentlicher Kondensation oder Feuchtigkeit sicher miteinander verbunden werden müssen, ohne dass nachteilige Effekte auftreten sollen, besonders wenn die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten gering ist.

Eine Vorhersage dieser Auswirkungen ist nur schwer machbar, da die Korrosionsgeschwindigkeit von vielen Variablen beeinflusst wird. Die Verwendung elektrischer Potentialtabellen vernachlässigt Aspekte wie das Vorhandensein von Oberflächenoxidschichten sowie die Auswirkungen von Oberflächenverhältnissen und von verschiedenen chemischen Zusammensetzungen der (elektrolytischen) Lösungsbrücke. Dementsprechend kann unsachgemäßer Gebrauch solcher Tabellen zu falschen Ergebnissen führen, weshalb sie mit Sorgfalt angewendet und nur für erste abschätzende Bewertungen herangezogen werden sollten.

Das grundsätzliche Verhalten von Metallen bei bimetallischem Kontakt unter ländlichen, städtischen, industriellen oder küstennahen Umgebungsbedingungen wurde umfangreich im BS PD 6484 „*Commentary on corrosion at bimetallic contacts and its alleviation*“ dokumentiert.

### 3.2.4 Spannungsrisskorrosion

Spannungsrisskorrosion (engl.: stress corrosion cracking (SCC)) wird bedingt durch das gleichzeitige Vorhandensein von Zugspannungen und speziellen Umwelteinflüssen, welche jedoch bei den üblichen Umweltbedingungen im Bauwesen nicht auftreten. Die Spannungen müssen dabei im Vergleich zur 0,2%-Dehngrenze des Materials nicht sehr groß sein und können durch äußere Belastungen oder Eigenspannungen infolge des Fertigungsprozesses, wie z. B. beim Schweißen oder durch Umformen, entstehen. Ferritische nichtrostende Stähle sind i. d. R. wenig anfällig für Spannungsrisskorrosion, wohingegen Duplex-Stähle üblicherweise eine höhere Beständigkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion aufweisen als die in diesen Bemessungshilfen betrachteten Austenite. Die höher legierten austenitischen nichtrostenden Stahlsorten wie z. B. 1.4539, 1.4529, 1.4547 und 1.4565, welche allerdings nicht in diesen Bemessungshilfen betrachtet werden, wurden speziell für Anwendungsfälle entwickelt, bei denen ein Risiko für Spannungsrisskorrosion besteht.

Besondere Vorsicht sollte beim Einsatz von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl mit hohen Eigenspannungen (z. B. bedingt durch Kaltverfestigung) in chloridhaltigen Umgebungen (z. B. in Hallenbädern, auf See oder an Küstengebieten) gelten. Sehr stark beanspruchte Kabel in chloridhaltiger Umgebung können, je nach Sorte des nichtrostenden Stahls, anfällig für Spannungsrisskorrosion sein.

Zur Vermeidung von Spannungsrisskorrosion werden in Kapitel 3.5.3 Hilfestellungen zur Stahlsortenauswahl in Schwimmhallenatmosphäre angegeben.

### 3.2.5 Allgemeine (gleichmäßige) Korrosion

Unter den typischerweise im Bauwesen vorherrschenden Bedingungen, leiden nichtrostende Stähle nicht an allgemeiner Korrosion, welche jedoch bei nicht legierten Eisen- und Stahlwerkstoffen charakteristisch ist.

### 3.2.6 Interkristalline Korrosion (Sensibilisierung) und Schweißnahtversprödung

Wenn austenitische nichtrostende Stähle längere Zeit Temperaturen zwischen 450°C und 850°C ausgesetzt sind, wandert der in den festen Gefügebestandteilen des Stahls gebundene Kohlenstoff zusammen mit Chrom an die Korngrenzen. Hierdurch kommt es zu einer Chromverarmung innerhalb der Körner und an den Außenbereichen wird Chromcarbid ausgelagert. In diesem Zustand spricht man üblicherweise von „sensibilisiertem“ Stahl. Die Korngrenzen werden dadurch anfällig gegenüber interkristalliner Korrosion, wenn sie anschließend korrosiven Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Tritt dieses Phänomen in den wärmebeeinflussten Bereichen einer Schweißnaht auf, spricht man auch von Schweißnahtversprödung.

Es gibt drei Möglichkeiten interkristalline Korrosion zu vermeiden:

- durch den Einsatz von Stahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt,
- durch den Einsatz von mit Titan oder Niob „stabilisiertem“ Stahl (z. B. die Austenite 1.4541 oder 1.4571 sowie die Ferrite 1.4509, 1.4521 oder 1.4621), da diese Elemente stabile Verbindungen in erster Linie mit Kohlenstoff eingehen wollen, wodurch das Risiko der Chromcarbidbildung minimiert wird,
- durch den Einsatz einer Wärmebehandlung, was jedoch in der Praxis kein übliches Verfahren ist.

Beim Schweißen von Bauteilen sollte zur Vermeidung einer Sensibilisierung bzw. einer interkristallinen Korrosion beim Einsatz von austenitischen oder Duplex-

Stählen eine kohlenstoffarme Sorte (maximal 0,03 % Massenanteil) gewählt werden. Interkristalline Korrosion tritt heutzutage bei austenitischen oder Duplex-Stählen nur noch sehr selten auf, da moderne Verfahren zur Stahlherstellung einen niedrigen Kohlenstoffanteil ermöglichen und somit diese Art der Korrosion vorweg vermieden werden kann.

Ferritische nichtrostende Stahlsorten sind grundsätzlich anfälliger gegenüber einer durch Schweißprozesse hervorgerufenen Sensibilisierung als Austenite. Daher sollte bei geschweißten Bauteilen darauf geachtet werden, dass auch bei Ferriten mit niedrigem Kohlenstoffanteil immer eine „stabilisierte“ Sorte verwendet wird.

### **3.3 Korrosion unter ausgewählten Bedingungen**

#### **3.3.1 Luft**

Atmosphärische Umgebungsbedingungen unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Wirkung auf nichtrostende Stähle. In ländlichen Umgebungen, die nicht durch industrielle Schadstoffe oder Meersalz belastet sind, ist die Korrosionsgefahr selbst in Gebieten mit hoher Luftfeuchtigkeit sehr gering. In Gebieten mit industriellen Tausalzen und in Küstennähe ist die Korrosionsgefahr wesentlich größer. Für Hilfestellungen bei der Wahl einer geeigneten nichtrostenden Stahlsorte wird an dieser Stelle auf Kapitel 3.5 verwiesen.

Die häufigsten Gründe für Korrosion an der Luft sind Oberflächenverschmutzungen durch metallische Eisenpartikel, welche durch Fertigungsprozesse entweder in der Werkstatt oder auf der Baustelle entstehen, und Chloride, die aus dem Meer, aus Tausalzen, aus industrieller Verschmutzung oder aus Chemikalien (z. B. aus Bleichmitteln oder Salzsäure (Chlorwasserstoffsäure)) stammen können. Durch bestimmte abgelagerte Partikel (Staub, Sand, Bewuchs oder Bauschutt) können trotz ihrer grundsätzlichen chemischen Inaktivität Löcher in der Passivschicht der Stahloberfläche entstehen, sodass sich Salze, Chemikalien oder schwache säurehaltige Lösungen aus saurem Regen ansammeln können. Dadurch, dass außerdem Feuchtigkeit über längere Zeit vorhanden sein kann, steigt an diesen Stellen die Korrosionsgefahr.

Die Oberflächenbeschaffenheit hat ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die Optik von freiliegenden nichtrostenden Stählen (z. B. durch Schmutzablagerungen) auf die Effektivität der selbstreinigenden Wirkung bei Regen und auf die Korrosionsgeschwindigkeit (glatte Oberflächen weisen i. d. R. eine bessere Korrosionsbeständigkeit auf).

#### **3.3.2 Meerwasser**

Meerwasser einschließlich Brackwasser enthält eine hohe Konzentration an Chloriden und ist daher grundsätzlich korrosiv. Starke Lochfraßkorrosion kann besonders bei den austenitischen Sorten 1.4301 und 1.4401 entstehen. Außerdem besteht bei diesen Sorten die Gefahr für Spaltkorrosion, hervorgerufen entweder durch die Bauteilgeometrie oder durch anhaftende Organismen, wie z. B. Seepocken.

In einigen Anwendungsfällen, in denen Korrosion bis zu einem gewissen Maß toleriert werden kann, ist die Duplex-Sorte 1.4462 eine geeignete Wahl, wenn die erwartete Lebensdauer begrenzt ist und die Bauteile entsprechend überprüft werden. Bei Langzeitanwendungen sollten „Super“ Austenite, „Super“ Ferrite oder „Super“ Duplex-Stähle verwendet werden. (Diese Sorten enthalten größere Anteile an Legierungselementen wie z. B. Chrom, Nickel, Molybdän, Kupfer oder Stickstoff. Sie weisen eine so hohe Korrosionsbeständigkeit auf, dass sie für den Einsatz unter Wasser und bei Kontakt mit konzentrierten Säuren geeignet sind. Typische „Super“ Austenite sind 1.4565, 1.4529 und 1.4547, typische „Super“ Duplex-Stähle sind 1.4410, 1.4501 und 1.4507.)

Regelmäßiger Kontakt mit salzhaltigem Wasserdampf bzw. Spritzwasser kann genauso gefährlich sein wie vollständiges Eintauchen in Salzwasser, da die Konzentration von Chloriden an der Stahloberfläche durch die Verdampfung von Wasser noch verstärkt wird. Es sollte erwähnt werden, dass abfließendes, stark chloridhaltiges Wasser mit Tausalzen ähnliche Korrosionsprobleme in Regenwasserauffangbecken verursachen kann.

Die Möglichkeit starker Bimetallkorrosion muss berücksichtigt werden, wenn nichtrostender Stahl zusammen mit anderen Metallen in Meerwasserumgebungen eingesetzt wird.

### **3.3.3 Andere Wasserarten**

Standardaustenite und Duplex-Stähle sind üblicherweise gut geeignet bei Kontakt mit destilliertem Wasser, Leitungs- oder Heizungswasser. Liegt der pH-Wert des Wassers unter 4, sollte fachkundiger Rat bei der Stahlsortenauswahl zu Hilfe genommen werden. Ungeklärtes Fluss- oder Seewasser sowie Wasser aus Industrieprozessen kann manchmal sehr korrosiv sein. Hierfür sollte eine vollständige chemische Wasseranalyse erfolgen, inklusive einer Messung des pH-Wertes, des Anteils und der Zusammensetzung der Schwebstoffe und des Chloridgehaltes. Der typische Temperaturbereich, die biologische oder mikrobiologische Aktivität sowie die Konzentration und die Art von eventuell vorhandenen, korrosiven Chemikalien sind ebenfalls entscheidend. Falls das Wasser keine Trinkwasserqualität aufweist, sollte ebenfalls fachkundiger Rat bei der Stahlsortenauswahl zu Hilfe genommen werden.

Die Möglichkeit der Erosionskorrosion sollte bei Wasserarten, die Schleifpartikel enthalten, berücksichtigt werden.

### **3.3.4 Chemische Umgebungen**

Aufgrund seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber vielen Chemikalien wird nichtrostender Stahl häufig zur Lagerung dieser eingesetzt. In chemischen Umgebungen gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten für nichtrostende Stähle, jedoch werden diese im Rahmen der vorliegenden Bemessungshilfen nicht im Detail aufgeführt, da chemische Umgebungen außerhalb des Anwendungsbereiches der in EN 1993-1-4 betrachteten Stahlsorten liegen. Allerdings soll erwähnt sein, dass in vielen Anwendungsfällen andere als die in diesen Bemessungshilfen betrachteten Stähle besser geeignet sein können. In diesen Fällen sollte fachkundiger Rat z. B. eines Ingenieurs, der Erfahrungen mit Korrosion aufweisen kann, zu Hilfe genommen werden.

Von Herstellern veröffentlichte Diagramme, die die Ergebnisse von Korrosionsversuchen in unterschiedlichen Chemikalien zeigen, sollten mit Vorsicht interpretiert werden. Diese können allerdings, trotz wechselnder Betriebsbedingungen (Temperatur, Druck, Konzentration der Chemikalien, etc.) und einem grundsätzlich vorhandenen Unterschied zu den Versuchsbedingungen, als Hilfestellung zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit einer speziellen Stahlsorte dienen. Ebenso können Verunreinigungen und der Grad der Belüftung einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

### **3.3.5 Böden**

Böden unterscheiden sich in ihrer Korrosivität in Abhängigkeit von ihrem Feuchtegrad, pH-Wert, der Durchlüftung, der chemischen Verunreinigungen, der mikrobiologischen Aktivität und der Oberflächenentwässerung. Nichtrostende Stähle sind grundsätzlich für den Einsatz in unterschiedlichen Bodenarten geeignet und besonders gut in Böden mit einem hohen spezifischen (elektrischen) Widerstand,

wobei auch schon Lochfraßkorrosion in feuchten Böden mit einem geringen spezifischen Widerstand festgestellt wurde. Die Anwesenheit von aggressiven chemischen Substanzen wie z. B. Chloridionen, von bestimmten Bakterienarten oder von Streustrom (verursacht durch lokale elektrische Gleichstromtransportsysteme wie z. B. bei Eisenbahn- oder Straßenbahnanlagen) kann lokale Korrosion verursachen. Die Entstehung von Streustrom kann durch eine ordnungsgemäße elektrische Isolierung der Leitungen (Beschichtungen oder Ummantelungen) und/oder durch Kathodenschutz vermieden werden.

Bei der Stahlsortenauswahl wird empfohlen die Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Stählen, die in Kontakt mit Böden kommen, zuerst unter dem Gesichtspunkt der Anwesenheit von Chloridionen und zweitens anhand des spezifischen Bodenwiderstandes und des pH-Wertes des Bodens zu berücksichtigen, wobei in jedem Fall schlecht entwässerter Boden vorausgesetzt werden sollte. Tabelle 3.1 empfiehlt geeignete nichtrostende Stahlsorten für verschiedene Bodeneigenschaften.

**Tabelle 3.1** Geeignete nichtrostende Stahlsorten für den Einsatz bei verschiedenen Bodeneigenschaften

Typische Umgebung	Bodeneigenschaft	nichtrostende Stahlsorte
Inland	Chloride (Cl) < 500x10 <sup>-6</sup> (ppm)	1.4301, 1.4307 1.4401, 1.4404 (jeweils Austenite)
	spezifischer (elektrischer) Widerstand >1000 Ω x mm <sup>2</sup> /m	
	pH-Wert > 4,5	
Chloridhaltig, (Küsten/Tausalze) Zonen ohne Gezeiten	Chloride (Cl) < 1500x10 <sup>-6</sup> (ppm)	1.4401, 1.4404 (jeweils Austenite)
	spezifischer (elektrischer) Widerstand >1000 Ω x mm <sup>2</sup> /m	
	pH-Wert > 4,5	
Chloridhaltig, (Küsten/Tausalze) Zonen mit Gezeiten	Chloride (Cl) < 6000x10 <sup>-6</sup> (ppm)	1.4410, 1.4547, 1.4529 (siehe Anmerkung)
	spezifischer (elektrischer) Widerstand >500 Ω x mm <sup>2</sup> /m	
	pH-Wert > 4,5	
Anmerkung: 1.4410 ist ein „Super“ Duplex, 1.4547 sowie 1.4529 sind „Super“ Austenite. Diese Sorten werden üblicherweise nicht im Bauwesen eingesetzt und liegen daher auch nicht im Anwendungsbereich dieser Bemessungshilfen.		

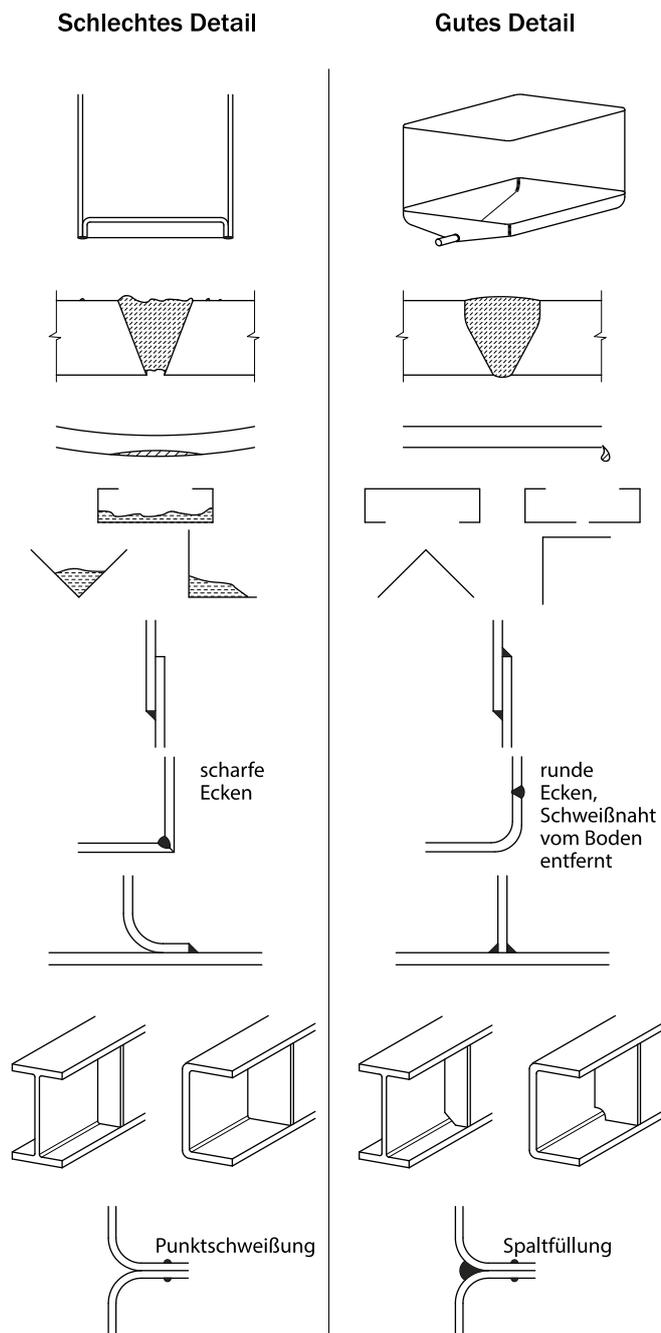
### 3.4 Korrosionssicheres Konstruieren

Der wichtigste Schritt zur Vermeidung von Korrosionsproblemen ist die Wahl einer entsprechend beständigen nichtrostenden Stahlsorte sowie geeigneter Fertigungsverfahren für die vorhandenen Umgebungsbedingungen. Allerdings kann auch noch nach der Wahl der Stahlsorte einiges getan werden, um das volle Beständigkeitspotential des gewählten Stahls auszunutzen, z. B. indem eine sorgfältige Detailplanung durchgeführt wird. Maßnahmen zur Korrosionsvermeidung sollten idealerweise bereits in der Planungsphase und bei der Konstruktion von Details berücksichtigt werden.

Tabelle 3.2 enthält Maßnahmen zur Vermeidung von Korrosion. Jedoch sind diese Maßnahmen weder unter statischer Betrachtung stets eine optimale Lösung noch sind sie unter allen Umgebungsbedingungen immer sinnvoll umzusetzen. Insbesondere in Umgebungen mit geringer Korrosivität oder bei regelmäßiger Wartung sind nur wenige Maßnahmen erforderlich. Abbildung 3.1 zeigt schlechte und gute Ausführungsdetails in Bezug auf die Dauerhaftigkeit.

**Tabelle 3.2 Korrosionssichere Planung und Konstruktion**

<p><b>Vermeidung von Schmutz, Feuchtigkeit und korrosiven Ablagerungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Winkel und U-Profile entsprechend ausrichten, um die Wahrscheinlichkeit für Ablagerungen oder Staunässe zu minimieren,</li> <li>• Ablauflöcher mit entsprechender Größe vorsehen, ohne dass Verstopfungen auftreten,</li> <li>• Horizontal ausgerichtete Oberflächen vermeiden,</li> <li>• Ein geringes Gefälle bei Zwischensteifen vorsehen, auch wenn diese planmäßig horizontal ausgerichtet werden sollen,</li> <li>• Rohr- und Stabprofile verwenden (Rohre unter trockenem Gas oder Luft versiegeln, falls ein Risiko für schädliche Kondensatbildung besteht),</li> <li>• Glatte Oberflächen vorsehen oder, falls rauere Oberflächen unvermeidbar sind, die Oberflächenstruktur möglichst vertikal ausrichten.</li> </ul>
<p><b>Vermeidung oder Versiegeln von Spalten</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wenn möglich geschweißte an Stelle von geschraubten Verbindungen verwenden,</li> <li>• Schließnähte oder Fugenmassen verwenden,</li> <li>• Geformte/profilierter Schweißnähte bevorzugen, um glatte Oberflächen zu erhalten,</li> <li>• Biologische Verschmutzungen vermeiden,</li> <li>• Flexible schützende Scheiben oder qualitativ hochwertige Dichtungsmittel bei oberirdischen, nicht unter Wasser liegenden geschraubten Verbindungen verwenden.</li> </ul>
<p><b>Minimierung der Wahrscheinlichkeit für Spannungsrisskorrosion unter den speziellen Bedingungen, bei denen diese entstehen kann (siehe Kapitel 3.2.4):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Herstellungsbedingte Eigenspannungen durch eine sorgfältige Wahl der Schweißfolge vermeiden,</li> <li>• Kugelstrahlen anwenden (wobei auf den Einsatz von Eisen-/Baustahlkugeln verzichtet werden sollte, um Partikeleinschlüsse in der Oberfläche zu vermeiden).</li> </ul>
<p><b>Minimierung der Wahrscheinlichkeit für Lochfraßkorrosion (siehe Kapitel 11):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schweißspritzer entfernen,</li> <li>• Nichtrostenden Stahl beizen, um Anlauffarben zu entfernen. Stark oxidierende chloridhaltige Reagenzien, wie z. B. Eisenchlorid vermeiden; stattdessen wird die Verwendung von entweder einem Beizbad oder einer Beizpaste empfohlen, wobei beide eine Mischung aus Salpeter- und Flusssäure enthalten sollten. Schweißnähte sollten immer gesäubert werden, um die Korrosionsbeständigkeit wiederherzustellen. Weitere Maßnahmen, wie z. B. mechanisches Säubern mit Schleifmitteln oder durch Glaskugelstrahlen sowie lokale Elektrolyse, können ebenfalls verwendet werden, um Anlauffarben zu entfernen und Schweißnähte zu säubern.</li> <li>• Kontakt mit Baustahlpartikeln verhindern (z. B. durch den Gebrauch von Arbeitsbereichen oder -geräten ausschließlich für nichtrostenden Stahl),</li> <li>• Geeignetes Wartungsprogramm einhalten.</li> </ul>
<p><b>Minimierung der Wahrscheinlichkeit für Bimetallkorrosion (siehe Kapitel 3.2.3):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrische Isolierung mit schützenden Materialien, wie z. B. Neopren, zwischen verschraubten Metallen vorsehen,</li> <li>• Gegebenenfalls Anstriche verwenden,</li> <li>• Feuchtigkeit vermeiden,</li> <li>• Metalle mit einem ähnlichen elektrischen Potential verwenden.</li> </ul>



**Abbildung 3.1** Schlechte und gute Ausführungsdetails in Bezug auf die Dauerhaftigkeit

## 3.5 Werkstoffauswahl

### 3.5.1 Einführung

Bei der Mehrheit der Anwendungen von nichtrostendem Stahl im Bauwesen ist es seine Korrosionsbeständigkeit, weswegen er eingesetzt wird, sei es aus ästhetischen Gründen, wegen dem geringen Wartungsaufwand oder der langen Dauerhaftigkeit. Die Korrosionsbeständigkeit muss demnach das Hauptkriterium bei der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes sein.

Bei der Auswahl eines geeigneten nichtrostenden Stahls müssen also die Betriebsbedingungen, die Fertigungsanforderungen wie z. B. für Biegeradien und für das Schweißen, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Wartung des Bauwerks

berücksichtigt werden. Außerdem sollte der Konstrukteur die Kriterien für den Korrosionsschutz festlegen. Für den Fall, dass die Tragfähigkeit eines Bauteils über eine bestimmte Zeitspanne gewährleistet werden muss und das Aussehen nicht entscheidend ist, kann eine akzeptable Korrosionsgeschwindigkeit bei der Werkstoffauswahl berücksichtigt werden und ein weniger korrosionsbeständiger nichtrostender Stahl kann den Anforderungen genügen. Falls jedoch ein sauberes, korrosionsfreies Erscheinungsbild von Bedeutung ist, kann eine korrosionsbeständigere nichtrostende Stahlsorte, eine glatte Oberflächenbeschaffenheit oder häufige Reinigung erforderlich sein. Zu erwähnen sind nochmals die geringen Wartungsanforderungen; bloßes Abwaschen des nichtrostenden Stahls und sei es durch Regen, kann die ursprüngliche Optik erhalten oder sogar verbessern und zusätzlich die Lebensdauer verlängern.

Der erste Schritt zur Werkstoffauswahl besteht also darin, die Betriebsbedingungen zu charakterisieren einschließlich angemessener und erwartungsgemäßer Abweichungen von den Planungsbedingungen. Neben dem Kontakt mit korrosiven Stoffen müssen betriebliche, klimatische und konstruktive Details, welche die Korrosionsbeständigkeit des Stahls beeinflussen können, sowie die erwartete Betriebsdauer berücksichtigt werden. Beispielsweise können bei industrieller Anwendung korrosive chemische Kombinationen sowie Konzentrationen, die Kontaktzeiten mit korrosiven Medien, Ablagerungen von Verschmutzungen an den Oberflächen, der Säuregehalt und wartungsbedingte Reinigungen die Korrosionsbeständigkeit beeinflussen. Bei außenliegenden Anwendungen müssen starker reinigender Regen (oder der Schutz davor), Feuchtigkeitsgehalte (z. B. die Luftfeuchtigkeit, die Regenintensität oder Nebel), mit der Luft übertragbare Schwebstoffe, salziger Sprühnebel (z. B. an felsigen Küsten oder Straßen), das Bespritzen mit oder sogar das Untertauchen in chloridhaltiges (salzhaltiges) Wasser sowie ähnliche Faktoren berücksichtigt werden. Bei allen Anwendungen können Konstruktionsdetails, wie nicht abgedichtete Spalte, der Kontakt mit anderen Metallen und die Oberflächenbeschaffenheit die Korrosionsbeständigkeit beeinflussen. Mögliche zukünftige Veränderungen dieser Faktoren oder wechselnde Nutzungsbedingungen sollten ebenfalls berücksichtigt werden. Außerdem sollte erwähnt werden, dass bei verschiedenen Bauwerken, die jedoch in unmittelbarer Nähe stehen, trotzdem sehr unterschiedliche Bedingungen auftreten können.

Die infrage kommenden nichtrostenden Stahlsorten sollten anhand dieser Aspekte ausgewählt werden, sodass insgesamt eine angemessene Korrosionsbeständigkeit für die zu erwartenden Umgebungsbedingungen erzielt werden kann. Bei der Auswahl der Stahlsorte sollte ebenfalls berücksichtigt werden, welche Korrosionsarten möglicherweise auftreten können. Erst danach sollten die mechanischen Eigenschaften, die Umsetzbarkeit der Fertigung, die Verfügbarkeit der benötigten Produktformen, die Oberflächenbeschaffenheit sowie die Kosten betrachtet werden.

### **3.5.2 Vorgehensweise zur Stahlsortenauswahl von austenitischen und Duplex-Stählen gemäß EN 1993-1-4**

Anhang A der EN 1993-1-4 regelt die Vorgehensweise bei der Auswahl geeigneter nichtrostender Stahlsorten für tragende Bauteile. Diese Vorgehensweise ist im allgemeinen Stahlbau anwendbar und kann unter Berücksichtigung von EN 1992 bzw. EN 1996 auch als Hilfestellung zur Materialauswahl bei Befestigungen in Beton sowie in Mauerwerk dienen. Bei diesem Vorgehen bleiben folgende Aspekte unberücksichtigt:

- Verfügbarkeit des Stahls/Produktes,
- Oberflächenanforderungen beispielsweise aus architektonischen oder hygienischen Gründen,

- Verbindungsmethoden/Anschlusstypen.

Folgende Kriterien müssen allerdings bei dieser Vorgehensweise erfüllt sein:

- Die Betriebsbedingungen weisen einen annähernd neutralen pH-Wert auf (pH-Werte zwischen 4 und 10),
- tragende Bauteile befinden sich weder unmittelbar in der Nähe noch sind sie Teil eines chemischen Prozesses,
- tragende Bauteile sind weder dauerhaft noch häufig vollständig mit Meerwasser bedeckt.

Falls diese Bedingungen nicht eingehalten werden können, sollte fachkundiger Rat eingeholt werden.

Das Verfahren ist für Umgebungsbedingungen geeignet, die ausschließlich in Europa vorkommen. Dies mag insbesondere in einigen Teilen der Welt, wie z. B. im Mittleren Osten, im Fernen Osten sowie in Zentralamerika zu Irritationen führen.

Das Verfahren beinhaltet die folgenden Schritte:

- Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF (**engl.: Corrosion Resistance Factor**) für die vorherrschenden Bedingungen (siehe Tabelle 3.3);
- Bestimmung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC (**engl.: Corrosion Resistance Class**) in Abhängigkeit vom Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF (siehe Tabelle 3.4).

Tabelle 3.5 gibt für jede Korrosionsbeständigkeitsklasse geeignete nichtrostende Stahlsorten an. Die Auswahl einer spezifischen Stahlsorte innerhalb einer Korrosionsbeständigkeitsklasse hängt neben der Korrosionsbeständigkeit von weiteren Faktoren ab, wie z. B. der Festigkeit und der Verfügbarkeit der erforderlichen Produktform. Die Angabe der Korrosionsbeständigkeitsklasse sowie der Bemessungsfestigkeit für ein Material, z. B. CRC II und  $f_y = 450 \text{ N/mm}^2$ , reicht aus, sodass ein Lieferant eine geeignete nichtrostende Stahlsorte auswählen kann.

Das Verfahren gilt vorrangig für außenliegende Bauteile. Bei innenliegenden Bauteilen unter kontrollierten Bedingungen liegt der Korrosionsbeständigkeitsfaktor bei  $\text{CRF} = 1,0$ . Eine innenliegende, kontrollierte Umgebung liegt vor, wenn entweder eine Klimatisierung, Heizung oder ein Bereich zwischen geschlossenen Türen vorhanden ist. Mehrgeschossige Parkhäuser, Laderampen sowie andere Bauwerke mit großen Öffnungen sollten als außenliegende Umgebungen betrachtet werden. Hallenbäder sind Sonderfälle innenliegender Umgebungen (siehe Kapitel 3.5.3).

Der Korrosionsbeständigkeitsfaktor hängt von der Stärke der Umweltbelastung in der betrachteten Umgebung ab und wird wie folgt bestimmt:

$$\text{CRF} = F_1 + F_2 + F_3$$

Dabei ist

$F_1$  = Risiko der Exposition gegenüber Chloriden aus Salzwasser oder Tausalzen;

$F_2$  = Risiko der Exposition gegenüber Schwefeldioxid;

$F_3$  = Reinigungskonzept oder die Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen.

Der Wert für  $F_1$  hängt bei Bauwerken in Küstennähe von der jeweiligen Region in Europa ab und ergibt sich aus Erfahrungswerten von bereits existierenden

Bauwerken, aus Korrosionsversuchen oder aus Daten zur Verteilung der Chloridkonzentration. Bei der großen Anzahl an unterschiedlichen Umgebungsbedingungen in Europa kann der ermittelte Korrosionsbeständigkeitsfaktor in einigen Fällen konservativ ausfallen.

Der Nationale Anhang zur EN 1993-1-4 kann regeln, ob ein weniger kritischer Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF ausgewählt werden darf, wenn begründete lokale Erfahrungswerte über den Betrieb oder Versuchsdaten eine derartige Auswahl unterstützen.

Verschiedene Bereiche eines Bauwerks können unterschiedliche Umgebungsbedingungen aufweisen, so kann z. B. ein Bereich vollständig den äußeren Umweltbedingungen ausgesetzt und ein anderer komplett dagegen geschützt sein. Jede einzelne dieser Umgebungsbedingungen sollte unabhängig voneinander beurteilt werden.

Das Verfahren setzt das Einhalten der Anforderungen von EN 1090-2 bezüglich Schweißverfahren und der Nachbehandlung von Schweißnähten sowie der Vermeidung, Beseitigung und Reinigung von Verunreinigungen auf den Oberflächen von nichtrostenden Stählen nach thermischem oder mechanischem Schneiden voraus. Andernfalls kann sich die Korrosionsbeständigkeit von geschweißten Bauteilen vermindern.

### **3.5.3 Schwimmhallenatmosphäre**

Um die Gefahr von Spannungsrisskorrosion (SCC) in Schwimmhallenatmosphäre zu berücksichtigen, sollten für tragende Bauteile, die diesen Bedingungen ausgesetzt sind, nur die in Tabelle 3.6 angegebenen nichtrostenden Stahlsorten verwendet werden. Bezüglich der Reinigung von tragenden Bauteilen darf der Nationale Anhang zu EN 1993-1-4 festlegen, ob eine weniger häufige Reinigung zulässig ist.

### **3.5.4 Vorgehensweise zur Stahlsortenauswahl von ferritischen nichtrostenden Stählen**

Ferritische nichtrostende Stähle eignen sich für den Einsatz in mäßig korrosiven Umgebungen mit einer begrenzten Konzentration an Verunreinigungen in der Atmosphäre und an Chloriden. Bei vielen Umgebungsbedingungen kann es zu Verfärbungen an ferritischen Stählen kommen, die allerdings in den meisten Fällen rein optisch sind und die Tragfähigkeit nicht beeinflussen. Tabelle 3.7 bietet eine konservative Hilfestellung zur Auswahl zwischen vier ferritischen nichtrostenden Stahlsorten an.

**Tabelle 3.3** Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF  
 $CRF = F_1 + F_2 + F_3$

<b><math>F_1</math> Risiko der Exposition gegenüber Chloriden aus Salzwasser oder Tausalzen</b>		
ANMERKUNG M ist der Abstand vom Meer und S der Abstand von Straßen, bei denen Tausalze zum Einsatz kommen.		
1	Innenräume	
0	Niedriges Expositionsrisiko	$M > 10 \text{ km}$ oder $S > 0,1 \text{ km}$
-3	Mittleres Expositionsrisiko	$1 \text{ km} < M \leq 10 \text{ km}$ oder $0,01 \text{ km} < S \leq 0,1 \text{ km}$
-7	Hohes Expositionsrisiko	$0,25 \text{ km} < M \leq 1 \text{ km}$ oder $S \leq 0,01 \text{ km}$
-10	Sehr hohes Expositionsrisiko	Straßentunnel, bei denen Tausalz ausgebracht wird bzw. Fahrzeuge Tausalze einbringen können.
-10	Sehr hohes Expositionsrisiko	$M \leq 0,25 \text{ km}$
		Nordseeküste Deutschlands und alle Küstenregionen der Ostsee.
-15	Sehr hohes Expositionsrisiko	$M \leq 0,25 \text{ km}$
		Atlantikküste Portugals, Spaniens und Frankreichs. Küste des Ärmelkanals und der Nordseeregionen von GB, Frankreich, Belgien, den Niederlanden und Südschweden. Alle anderen Küstenregionen von GB, Norwegen, Dänemark und Irland. Mittelmeerküste
<b><math>F_2</math> Das Risiko der Exposition gegenüber Schwefeldioxid</b>		
ANMERKUNG In den europäischen Küstenregionen ist die Konzentration von Schwefeldioxid üblicherweise gering. Im Landesinneren ist sie entweder gering oder mittelmäßig. Ein hohes Expositionsrisiko ist ungewöhnlich und stets mit besonderen Standorten der Schwerindustrie oder spezifischen Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Straßentunneln, verbunden. Die Schwefeldioxidkonzentration kann in Übereinstimmung mit dem Verfahren in ISO 9225 bewertet werden.		
0	Niedriges Expositionsrisiko	Mittelwert der Gaskonzentration $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
-5	Mittleres Expositionsrisiko	Mittelwert der Gaskonzentration zwischen $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$
-10	Hohes Expositionsrisiko	Mittelwert der Gaskonzentration zwischen $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$
<b><math>F_3</math> Reinigungskonzept oder Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen (wenn <math>F_1 + F_2 \geq 0</math>, dann ist <math>F_3 = 0</math>)</b>		
0	Vollständige Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen	
-2	Spezifisches Reinigungskonzept	
-7	Kein Abwaschen durch Regen oder keine spezifische Reinigung	
ANMERKUNG Wenn das Bauteil regelmäßig auf Anzeichen von Korrosion überprüft und gereinigt werden muss, sollte das dem Anwender in schriftlicher Form mitgeteilt werden. Die Überprüfung, das Reinigungsverfahren und die Häufigkeit sollten festgelegt sein. Je häufiger die Reinigung erfolgt, desto größer ist der Nutzen. Die Zeitspanne zwischen den Reinigungen sollte nicht größer als 3 Monate sein. Ist die Reinigung festgelegt, sollte sie für alle Teile des Bauwerks gelten und nicht nur für die leicht zugänglichen und gut sichtbaren Bauteile.		

**Tabelle 3.4** Bestimmung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC

Korrosionsbeständigkeitsfaktor (CRF)	Korrosionsbeständigkeitsklasse (CRC)
CRF = 1	I
$0 \geq \text{CRF} > -7$	II
$-7 \geq \text{CRF} > -15$	III
$-15 \geq \text{CRF} \geq -20$	IV
CRF < -20	V

**Tabelle 3.5** Geeignete, nichtrostende Stahlsorten für jede Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC

Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC				
I	II	III	IV	V
1.4003 (F)	1.4301 (A)	1.4401 (A)	1.4439 (A)	1.4565 (A, S)
1.4016 (F)	1.4307 (A)	1.4404 (A)	1.4462 (D)	1.4529 (A, S)
1.4512 (F)	1.4311 (A)	1.4435 (A)	1.4539 (A)	1.4547 (A, S)
	1.4541 (A)	1.4571 (A)		1.4410 (D, S)
	1.4318 (A)	1.4429 (A, S)		1.4501 (D, S)
	1.4306 (A)	1.4432 (A)		1.4507 (D, S)
	1.4567 (A)	1.4162 (D, S)		
	1.4482 (D, S)	1.4662 (D, S)		
		1.4362 (D)		
		1.4062 (D, S)		
		1.4578 (A)		

A: Austenit; D: Duplex; F: Ferrit; S: Sondergüte

ANMERKUNG 1 Die Korrosionsbeständigkeitsklassen sind nur für die Anwendung mit diesem Auswahlverfahren für Stahlsorten vorgesehen und gelten nur für Konstruktionen, die eine tragende Funktion erfüllen.

ANMERKUNG 2 Die Stahlsorte einer höheren Klasse darf anstelle der durch den CRF vorgegebenen verwendet werden.

**Tabelle 3.6** Nichtrostende Stahlsorten für Schwimmhallenatmosphären

Tragende Bauteile in Schwimmhallenatmosphäre	Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC
Tragende Bauteile, die regelmäßig gereinigt werden <sup>1</sup>	CRC III oder CRC IV (außer 1.4162, 1.4662, 1.4362, 1.4062)
Tragende Bauteile, die nicht regelmäßig gereinigt werden	CRC V (außer 1.4410, 1.4501 and 1.4507)
Alle Befestigungs-, Verbindungsmittel und Gewindeteile	CRC V (außer 1.4410, 1.4501 and 1.4507)

<sup>1</sup> Wenn das Bauteil regelmäßig auf Anzeichen von Korrosion überprüft und gereinigt werden muss, sollte das dem Anwender in schriftlicher Form mitgeteilt werden. Die Überprüfung, das Reinigungsverfahren und die Häufigkeit sollten festgelegt sein. Je häufiger die Reinigung erfolgt, desto größer ist der Nutzen. Die Zeitspanne zwischen den Reinigungen sollte nicht größer als eine Woche sein. Ist die Reinigung festgelegt, sollte sie für alle Teile des Bauwerks gelten und nicht nur für die leicht zugänglichen und gut sichtbaren Bauteile.

**Tabelle 3.7 Geeignete ferritische nichtrostende Stahlsorten in Bezug auf ihre Korrosionsbeständigkeit**

Stahlsortenauswahl bei qualitativ hochwertiger Oberflächenverarbeitung (d. h. keine Toleranz gegenüber sichtbaren Verfärbungen an äußeren Oberflächen)					
Stahlsorte	C1	C2	C3	C4	C5
1.4003	✓	✗	✗	Mangels Daten zur Korrosionsbeständigkeit werden hier keine Informationen angegeben.	
1.4509	✓	✗	✗		
1.4621, 1.4521	✓	✓	✗		
Stahlsortenauswahl bei Toleranz von kosmetischen Korrosionsschäden (d. h. Verfärbungen und geringe Lochfraßkorrosion können auftreten, beeinflussen die Tragfähigkeit jedoch nicht)					
Stahlsorte	C1	C2	C3	C4	C5
1.4003	✓	(✓)	✗	Mangels Daten zur Korrosionsbeständigkeit werden hier keine Informationen angegeben.	
1.4509	✓	✓	(✓)		
1.4621, 1.4521	✓	✓	✓		
Die Korrosionsklassen sind gemäß EN ISO 12944-2:2009 folgendermaßen definiert:					
Korrosionsklasse und Risiko	Beispiele von typischen Umgebungen in gemäßigten Klimazonen				
	Außenliegend		Innenliegend		
C1 sehr gering	-		Beheizte Gebäude mit sauberer Atmosphäre, z. B. Büroräume, Geschäfte, Schulen oder Hotels.		
C2 gering	Umgebungen mit geringer Verschmutzung. Überwiegend ländliche Gebiete.		Unbeheizte Gebäude in denen Kondensation auftreten kann, z. B. Lagerräume oder Sporthallen.		
C3 mittel	Städtische oder industrielle Umgebungen mit mäßiger Verschmutzung durch Schwefeldioxid. Küstengebiete mit geringer Salzkonzentration.		Produktionsräume mit hoher Luftfeuchtigkeit, z. B. Lebensmittelverarbeitungsbetriebe, Wäschereien, Brauereien oder Molkereien.		
C4 hoch	Industrielle Umgebungen und Küstengebiete mit mäßiger Salzkonzentration.		Chemieanlagen, Schwimmbäder, Küsten, Schiffe oder Werften.		
C5 sehr hoch	Industrielle Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit und aggressiver Atmosphäre. Küsten- oder Offshoregebiete mit hoher Salzkonzentration.		Gebäude oder Gebiete mit überwiegend ständiger Kondensation und hoher Verschmutzung.		
<p>Anmerkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Zeigt an, dass die Stahlsorte für die Umgebungskategorie geeignet ist.</li> <li>✗ Zeigt an, dass die Stahlsorte für die Betriebsbedingungen ungeeignet ist.</li> <li>(✓) Zeigt an, dass bei dieser Kombination aus Stahlsorte und Umgebungsbedingung Vorsicht geboten ist. Es besteht ein Risiko für Verfärbungen und örtliche Korrosion an freiliegenden Schweißnähten bzw. Befestigungen. Das Risiko ist dort am größten, wo sich stehendes Wasser und/oder Schadstoffe aus der Atmosphäre (insbesondere Chloride) ansammeln können.</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Die Einordnung nach Klasse C1 beruht auf der Annahme einer innenliegenden Betriebsumgebung ohne direkten Kontakt zu Wettererscheinungen oder Chloriden. Dazu gehören bei Gebäuden z. B. Dachböden, Mauern oder Fassadenunterkonstruktionen.</li> <li>2. Schweißnähte und mechanische Befestigungen an nichtrostendem Stahl erzeugen Spalte, welche an außenliegenden Bauteilen anfälliger für Korrosion sein können. Dieses Risiko ist dort am größten, wo sich Wasser und Schadstoffe aus der Atmosphäre an den Oberflächen ansammeln können.</li> <li>3. Die ISO Klassifizierung berücksichtigt über die Luft übertragende Chloride aus dem Meer, jedoch nicht aus Tausalzen von Straßen. Der Konstrukteur sollte dies berücksichtigen, falls das Bauwerk in der Nähe von Straßen liegt, an denen Tausalze zum Einsatz kommen.</li> </ol>					

# 4 GRUNDLAGEN DER BEMESSUNG

## 4.1 Allgemeine Voraussetzungen

Ein Tragwerk sollte so geplant und gefertigt werden, dass es

- über die geplante Lebensdauer hinweg standsicher bleibt,
- den Lasten während der Bauphase, dem Ausbau und der Nutzung standhält,
- Unfallschäden infolge Überbelastung lokal begrenzt und
- in Hinblick auf die Instandhaltungskosten eine angemessene Dauerhaftigkeit aufweist.

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

Tragwerke sind unter Beachtung aller zu erwartenden Grenzzustände zu bemessen.

## 4.2 Bemessung der Grenzzustände

Grenzzustände sind Extrembedingungen, bei deren Überschreitung ein Tragwerk die für die Bemessung geforderten Kriterien nicht mehr erfüllen kann. Es werden drei Arten von Grenzzuständen unterschieden: die Grenzzustände der Tragfähigkeit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit. Bei den Grenzzuständen der Tragfähigkeit kann es bei einer Überschreitung zum Versagen eines Teilabschnittes oder des Gesamttragwerkes kommen, wodurch Menschenleben gefährdet werden können. Bei Überschreitung eines Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit können bestimmte Betriebsanforderungen nicht länger erfüllt werden. Die Grenzzustände der Dauerhaftigkeit können sowohl den Grenzzuständen der Tragfähigkeit als auch der Gebrauchstauglichkeit zugeordnet werden, abhängig davon, ob z. B. Korrosion Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Bauwerkes oder nur auf das äußere Erscheinungsbild hat.

Für die Grenzzustände der Tragfähigkeit gilt allgemein folgendes Nachweisformat:

$$E_d \leq R_d \quad (4.1)$$

wobei gilt:

- $E_d$  Bemessungswert der einwirkenden Lasten, wie z. B. innere Momente bzw. Kräfte in einem Bauteil, unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte und
- $R_d$  Bemessungswert des Widerstandes entsprechend der zutreffenden Kapitel in dieser Bemessungshilfe.

Der Bemessungswert des Widerstandes  $R_d$  wird im Allgemeinen mit  $R_k/\gamma_M$  angegeben, wobei  $R_k$  der charakteristische Wert des Widerstandes und  $\gamma_M$  ein Teilsicherheitsbeiwert ist. Der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  kann dabei unterschiedliche Werte annehmen. Tabelle 4.1 enthält die Werte für  $\gamma_M$ , die in Verbindung mit diesen Bemessungshilfen zu verwenden sind und EN 1993-1-4 sowie EN 1993-1-8 entsprechen. Diese Werte für  $\gamma_M$  sollten unter Berücksichtigung der Bemessungsregeln in den maßgebenden Anwendungsteilen von EN 1993, wie z. B. EN 1993-2 für Stahlbrücken oder EN 1993-3 für Türme, Maste und Schornsteine, ebenfalls für nichtrostenden Stahl verwendet werden, wobei die in diesen Bemessungshilfen empfohlenen Werte für  $\gamma_M$  die aus den Anwendungsteilen ersetzen.

Des Weiteren wird auf den jeweiligen Nationalen Anhang zur EN 1993-1-4 sowie auf die maßgebenden Anwendungsteile von EN 1993 (z. B. EN 1993-1-8) verwiesen, da dort eventuell andere Werte für  $\gamma_M$  als in Tabelle 4.1 ausgewiesen angegeben werden. (Falls ein entsprechender Nationaler Anhang nicht verfügbar ist, sollten die Werte für  $\gamma_M$  mit der zuständigen nationalen Bauaufsichtsbehörde vereinbart werden.)

Alternativ zum rechnerischen Nachweis kann der Bemessungswert des Widerstandes auch anhand von Material-, Bauteilabschnitts- und Bauteilversuchen bestimmt werden (zur Vorgehensweise siehe Kapitel 10).

**Tabelle 4.1 Empfohlene Werte für  $\gamma_M$**

Widerstand gegen:	Symbol	Wert (EN 1993-1-4)
Querschnittstragfähigkeit gegenüber ausgeprägtem Fließen einschließlich lokaler Instabilitäten (unabhängig von der Querschnittsklasse)	$\gamma_{M0}$	1,10
Bauteiltragfähigkeit gegenüber Instabilitäten, ermittelt aus Bauteilnachweisen	$\gamma_{M1}$	1,10
Querschnittstragfähigkeit gegenüber Zugbruch	$\gamma_{M2}$	1,25
Beanspruchbarkeit von Schrauben, Nieten, Schweißnähten, Bolzen und Blechen mit Lochleibungsbeanspruchung	$\gamma_{M2}$	1,25

Für nichtrostende Stähle, die nicht speziell in Tabelle 2.1 der EN 1993-1-4 aufgeführt sind, sollten die Werte für  $\gamma_M$  um 10 % vergrößert werden.

### 4.3 Einwirkungen

Die Einwirkungen auf Bauwerke aus nichtrostendem Stahl sollten auf die gleiche Weise ermittelt werden wie für Bauwerke aus Baustahl, d. h. gemäß EN 1991.

# 5 BEMESSUNG VON QUERSCHNITTEN

## 5.1 Allgemeines

Die Empfehlungen in Kapitel 5 und 6 gelten für Querschnitte mit Querschnittsteilen entsprechend den in Kapitel 5.2 definierten Abmessungen.

Die Breite-zu-Dicke-Verhältnisse von Querschnittsteilen, die teilweise oder vollständig unter Druckspannungen stehen, bestimmen, ob das Querschnittsteil hinsichtlich lokalen Beulens gefährdet ist und demnach die Querschnittstragfähigkeit abgemindert werden muss. Querschnittsteile und Querschnitte werden in die Querschnittsklassen 1, 2, 3 oder 4 entsprechend ihrer Gefährdung gegen Beulen bzw. entsprechend ihres Rotationsvermögens (Querschnittsklassen 1 oder 2) eingeordnet, siehe Kapitel 5.3.

Die reduzierte Querschnittstragfähigkeit eines Querschnitts der Klasse 4 kann bei einer Bemessung zugelassen werden, wenn wirksame Breiten des Querschnittsteiles angesetzt werden, siehe Kapitel 5.4.1.

Auf Achsmaße bezogene Abmessungen dürfen bei der Ermittlung von Querschnittswerten nur für kaltgeformte Bauteile und für dünnwandige Bleche angesetzt werden. Bei allen anderen Querschnitten sollten die tatsächlichen Abmessungen berücksichtigt werden. Gemäß EN 1993-1-3 und EN 1993-1-5 sind auf Achsmaße bezogene Abmessungen für die Berechnung von Widerstandswerten erlaubt. Ebenso erlaubt EN 1993-1-1 die Verwendung von auf Achsmaße bezogene Abmessungen zur Berechnung von Widerstandswerten in bestimmten Fällen (siehe 6.2.1(9) und 6.2.5(2) in EN 1993-1-1).

## 5.2 Maximale Breite-zu-Dicke-Verhältnisse

Tabelle 5.1 enthält die maximal zulässigen Breite-zu-Dicke-Verhältnisse für Bauteile aus nichtrostendem Stahl.

## 5.3 Klassifizierung von Querschnitten

### 5.3.1 Allgemeines

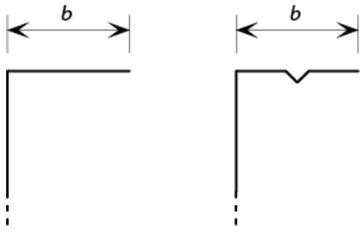
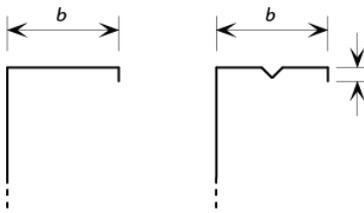
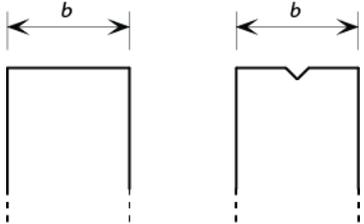
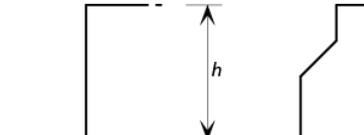
Grundsätzlich werden Querschnitte aus nichtrostendem Stahl auf die gleiche Weise klassifiziert wie Querschnitte aus Baustahl. Es werden vier Querschnittsklassen wie folgt definiert:

- |          |   |
|----------|---|
| Klasse 1 | Querschnitte der Klasse 1 können Fließgelenke mit einer für eine plastische Bemessung erforderlichen Rotationskapazität bilden.   |
| Klasse 2 | Querschnitte der Klasse 2 können einen plastischen Momentenwiderstand entwickeln, besitzen aber nur eine begrenzte Rotationskapazität.  |
| Klasse 3 | Querschnitte der Klasse 3 können mit den rechnerischen Werten der Spannungen die Streckgrenze in den äußersten Druckbereichen der Stahlbauteile erreichen, aber lokales Beulen verhindert die Entwicklung des plastischen Momentenwiderstandes. |

Klasse 4 Querschnitte der Klasse 4 können bereits lokales Beulen aufweisen, bevor die Streckgrenze in einem oder mehreren Querschnittsteilen erreicht wird.

Die Zuordnung eines Querschnitts zu einer Querschnittsklasse richtet sich nach der höchsten (ungünstigsten) ermittelten Klasse seiner teilweise oder vollständig unter Druckspannungen stehenden Querschnittsteile. Dabei gilt es zu beachten, dass die Querschnittsklassifizierung von der Größe eines einwirkenden Momentes sowie einer einwirkenden Normalkraft abhängt und demnach über die Bauteillänge variieren kann.

**Tabelle 5.1** Maximal zulässige Breite-zu-Dicke-Verhältnisse für Bauteile aus nichtrostendem Stahl

a) Ebene Querschnittsteile oder Querschnittsteile mit Zwischensteifen, die an einem Ende durch einen Steg gestützt und am anderen Ende nicht gestützt sind:	$b/t \leq 50$	
b) Ebene Querschnittsteile oder Querschnittsteile mit Zwischensteifen, die an einem Ende durch einen Steg gestützt sind und am anderen Ende eine einfache Lippe aufweisen:	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$	
c) Ebene Querschnittsteile oder Querschnittsteile mit Zwischensteifen, die an beiden Enden durch Stege oder Flansche gestützt sind:	$b/t \leq 400$	
	$h/t \leq 400$	
<p>Anmerkung: Ebene Querschnitte, die entsprechend a) gestützt sind und deren <math>b/t</math>-Verhältnisse größer als ca. 30 sind, sowie ebene Querschnitte, die auf andere Weise gestützt sind und deren <math>b/t</math>-Verhältnisse größer als ca. 75 sind, können voraussichtlich sichtbare Verformungen unter Gebrauchslasten entwickeln.</p>		

### 5.3.2 Grenzwerte zur Klassifizierung von Querschnittsteilen

Querschnitte werden anhand der in Tabelle 5.2 angegebenen Grenzwerte in die Klassen 1, 2 oder 3 eingeteilt. Querschnitte, welche die Grenzwerte für Klasse 3 überschreiten, werden automatisch der Klasse 4 zugeordnet.

**Tabelle 5.2** Maximale Breite-zu-Dicke-Verhältnisse für druckbeanspruchte Querschnittsteile

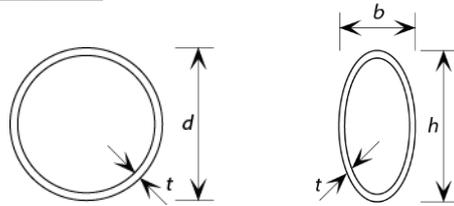
Beidseitig gestützte Querschnittsteile				
Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile	
1	$c/t \leq 72,0\varepsilon$	$c/t \leq 33,0\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq 396,0\varepsilon/(13\alpha - 1)$ für $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq 36,0\varepsilon/\alpha$	
2	$c/t \leq 76,0\varepsilon$	$c/t \leq 35,0\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq 420,0\varepsilon/(13\alpha - 1)$ für $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq 38,0\varepsilon/\alpha$	
3	$c/t \leq 90,0\varepsilon$	$c/t \leq 37,0\varepsilon$	$c/t \leq 18,5\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Zu $k_\sigma$ siehe Kapitel 5.4.1.	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Stahlsorte	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698
<p>Anmerkungen:            Bei Hohlprofilen darf auf der sicheren Seite liegend <math>c = (h - 3t)</math> oder <math>c = (b - 3t)</math> gesetzt werden.  <math>E = 200 \times 10^3</math> N/mm<sup>2</sup>  <math>\alpha = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)</math> bei Querschnitten, die bezüglich der starken Achse symmetrisch sind</p>				

**Tabelle 5.2 (Fortsetzung) Maximale Breite-zu-Dicke-Verhältnisse für druckbeanspruchte Querschnittsteile**

Einseitig gestützte Querschnittsteile				
Klasse	Querschnittsart	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile	
			freier Rand im Druckbereich	freier Rand im Zugbereich
1	kaltgeformt und 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 und geschweißt	$c/t \leq 10,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10,0\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,0\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	kaltgeformt und geschweißt	$c/t \leq 14,0\varepsilon$	$c/t \leq 21,0\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ Zu $k_\sigma$ siehe Kapitel 5.4.1.	
<u>Winkel</u> Siehe auch unter „einseitig gestützte Querschnittsteile“				Gilt nicht bei Winkeln, die in Längsrichtung durchgängig an andere Bauteile angeschlossen sind.
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnitte			
3	$\frac{h}{t} \leq 15,0\varepsilon ; \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$			
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Stahlsorte	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698
Anmerkungen: Bei kaltgeformten U-Profilen sollte ein weniger konservativer Ansatz mit $c = b_p$ verwendet werden, wobei $b_p$ der Abstand vom Rand des Flansches bis zur Mitte des Eckradius ist (siehe Abbildung 5.5). $E = 200 \times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> $\alpha = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)$ bei Querschnitten, die bezüglich der starken Achse symmetrisch sind				

**Tabelle 5.2 (Fortsetzung) Maximale Breite-zu-Dicke-Verhältnisse für druckbeanspruchte Querschnittsteile**

Rohrrohprofile



Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile		auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	
	1	$d_e/t \leq 50\varepsilon^2$		$d_e/t \leq 50\varepsilon^2$
2	$d_e/t \leq 70\varepsilon^2$		$d_e/t \leq 70\varepsilon^2$	
3	$d_e/t \leq 280\varepsilon^2$ Zu $d_e > 240$ mm und/oder $d_e/t > 280\varepsilon^2$ , siehe EN 1993-1-6		$d_e/t \leq 90\varepsilon^2$ Zu $d_e/t > 90\varepsilon^2$ , siehe EN 1993-1-6	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Stahlsorte	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698

Anmerkungen:

$E = 200 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>

$d_e$  ist der äquivalente Durchmesser. Bei kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) ist  $d_e = d$ .

Bei elliptischen Hohlprofilen (EHS) hängt  $d_e$  von der Art der Belastung ab:

Bei auf Druck beanspruchten EHS-Querschnitten:

$$d_e = h \left[ 1 + \left\{ 1 - 2,3 \left( \frac{t}{h} \right)^{0,6} \right\} \left( \frac{h}{b} - 1 \right) \right] \quad \text{oder, konservativ} \quad d_e = \frac{h^2}{b}$$

Bei auf Biegung über die starke Achse (y-y) beanspruchten EHS-Querschnitten:

Für  $\frac{h}{b} \leq 1,36$ ,  $d_e = \frac{b^2}{h}$

Für  $\frac{h}{b} > 1,36$ ,  $d_e = 0,4 \frac{h^2}{b}$

Bei auf Biegung über die schwache Achse (z-z) sowie auf Druck und Biegung über die schwache Achse (z-z) beanspruchten EHS-Querschnitten:  $d_e = \frac{h^2}{b}$

Bei auf Druck und Biegung um die starke Achse (y-y) beanspruchten EHS-Querschnitten kann  $d_e$  mit Hilfe einer linearen Interpolation zwischen dem äquivalenten Durchmesser für Druck und dem für Biegung ermittelt werden, basierend auf  $\alpha$ -Werten für Querschnitte der Klasse 1 bzw. Klasse 2 sowie  $\psi$ -Werten für Querschnitte der Klasse 3 bzw. Klasse 4.

## 5.4 Wirksame Breiten

### 5.4.1 Wirksame Breiten bei Querschnittsteilen der Klasse 4

Querschnittswerte von Querschnitten der Klasse 4 können durch Berechnung mit den wirksamen Breiten der Querschnittsteile, die teilweise oder vollständig unter Druck stehen, ermittelt werden. Alternativ können auch Versuche durchgeführt werden, siehe Kapitel 10.

Die wirksame Querschnittsfläche  $A_{\text{eff}}$  eines Querschnitts der Klasse 4, der teilweise oder vollständig unter Druck steht, ergibt sich aus der Bruttoquerschnittsfläche

abzüglich der Summe der nicht wirksamen Flächen jedes schlanken Querschnittsteils, welches dem Querschnitt zugeordnet wird. Die wirksame Fläche jedes Querschnittsteils der Klasse 4 ergibt sich aus dem Produkt der wirksamen Breite  $b_{\text{eff}}$  mit der Dicke des Querschnittsteils. Bei auf Biegung beanspruchten Querschnitten müssen zusätzlich das wirksame Flächenträgheitsmoment  $I_{\text{eff}}$  sowie das wirksame Widerstandmoment  $W_{\text{eff}}$  ermittelt werden.

Die wirksamen Breiten von Querschnittsteilen, die teilweise oder vollständig unter Druck stehen, können für beidseitig gestützte Querschnittsteile aus Tabelle 5.3 und für einseitig gestützte Querschnittsteile aus Tabelle 5.4 entnommen werden.

Die wirksamen Breiten von druckbeanspruchten Querschnittsteilen eines Flansches können anhand des auf die Bruttofläche bezogenen Spannungsverhältnisses  $\psi$  ermittelt werden ( $\psi$  ist in Tabelle 5.3 bzw. in Tabelle 5.4 definiert). Die wirksamen Breiten von Querschnittsteilen eines Steges sollten ebenfalls anhand des auf eine Bruttoquerschnittsfläche bezogenen Spannungsverhältnisses  $\psi$  ermittelt werden, wobei die Bruttoquerschnittsfläche hierbei aus der wirksamen Fläche des druckbeanspruchten Flansches und der Bruttofläche des Steges sowie des zugbeanspruchten Flansches besteht.

Der Abminderungsfaktor  $\rho$  darf wie folgt ermittelt werden:

Beidseitig gestützte, druckbeanspruchte Querschnittsteile (kaltgeformt oder geschweißt):

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{jedoch } \leq 1,0 \quad (5.1)$$

Einseitig gestützte, druckbeanspruchte Querschnittsteile (kaltgeformt oder geschweißt):

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{jedoch } \leq 1,0 \quad (5.2)$$

Dabei ist der Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_p$  eines Querschnittsteils wie folgt definiert:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (5.3)$$

Dabei gilt:

$t$  Dicke des Querschnittsteils

$k_\sigma$  Beulwert für das maßgebende Spannungsverhältnis  $\psi$  entweder aus Tabelle 5.3 oder Tabelle 5.4

$\bar{b}$  nachfolgend definierte, maßgebende Breite:

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

$\bar{b} =$  Breite der ebenen Querschnittsteile von Stegen bei RHS,  $\bar{b} = h - 3t$

$\bar{b} = b$  bei beidseitig gestützten Querschnittsteilen von Flanschen (außer bei Rechteckhohlprofilen)

$\bar{b} =$  Breite der ebenen Querschnittsteile von Flanschen bei RHS,  $\bar{b} = b - 3t$

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

$\bar{b} = h$  bei gleichschenkligen bzw. ungleichschenkligen Winkelprofilen

$\epsilon$  Materialbeiwert, wie in Tabelle 5.2 beschrieben.

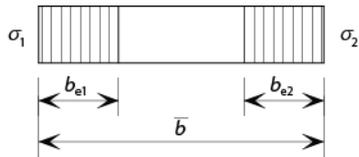
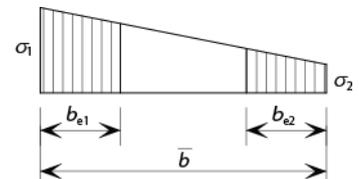
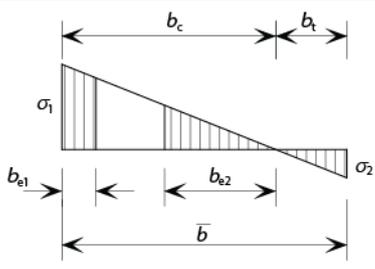
Gemäß EN 1993-1-4 kann  $\bar{b}$  für Stege und Flansche von Rechteckhohlprofilen (RHS) auf der sicheren Seite liegend mit  $\bar{b} = h - 2t$  bzw.  $\bar{b} = b - 2t$  angesetzt werden. Es ist zu erwarten, dass diese Werte zur Ermittlung der maßgebenden Breite in der kommenden Überarbeitung von EN 1993-1-4 zu  $\bar{b} = h - 3t$  bzw.  $\bar{b} = b - 3t$  geändert werden, sodass die Definitionen mit EN 1993-1-5 übereinstimmen.

Bei kaltgeformten offenen Querschnitten sollte ein weniger konservativer Ansatz mit  $\bar{b} = b_p$  gewählt werden, wobei  $b_p$  die nominelle ebene Breite des Querschnittsteils ist, gemessen zwischen den Mittelpunkten der benachbarten Ecken (siehe Abbildung 5.5).

Grundsätzlich verschiebt sich die Schwerlinie des wirksamen Querschnitts verglichen mit der Schwerlinie des Bruttoquerschnitts um den Wert  $e$ , siehe Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2. Diese Verschiebung muss bei der Berechnung der Querschnittswerte für den wirksamen Querschnitt berücksichtigt werden.

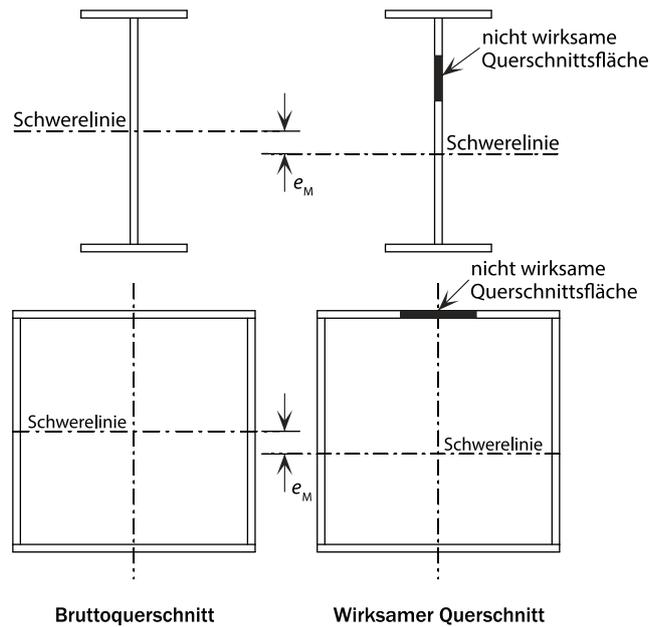
Bei druckbeanspruchten Querschnitten berücksichtigen die Empfehlungen in Kapitel 6.5.2 das zusätzliche Moment  $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N$ , welches aus der Exzentrizität der Normalkraft entsteht und bei dem  $e_N$  die Verschiebung der Schwerlinie des druckbeanspruchten Querschnitts ist, siehe Abbildung 5.2.

**Tabelle 5.3** Beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

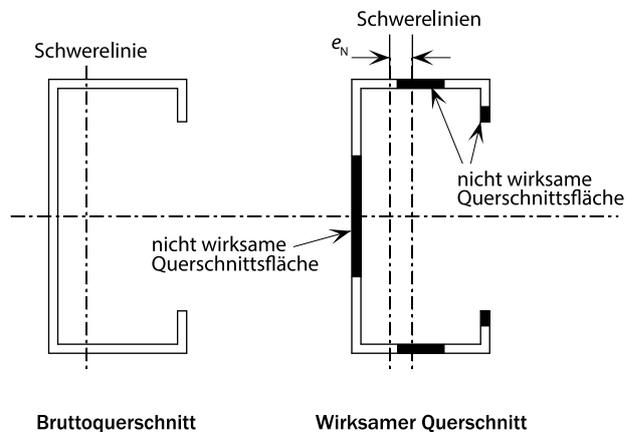
Spannungsverteilung (Druck positiv)				Wirksame Breite $b_{eff}$		
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2 b_{eff}}{5 - \psi}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi \geq -3$
Beulwert $k_\sigma$	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 5.4** Einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

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



**Abbildung 5.1** Auf Biegung beanspruchter Querschnitt der Klasse 4



**Abbildung 5.2** Auf Druck beanspruchter Querschnitt der Klasse 4

### 5.4.2 Wirkung der Schubverzerrung (mittragende Breiten)

Die Wirkung der Schubverzerrung muss nicht durch mittragende Breiten berücksichtigt werden, wenn  $b_0 < L_e / 50$ , wobei  $b_0$  die einseitig gestützte Breite eines Flansches bzw. die halbe Breite bei beidseitig gestützten Querschnittsteilen und  $L_e$  die Länge zwischen zwei Momentennullpunkten ist. Wird dieser Grenzwert für  $b_0$  überschritten, sollte die Wirkung der Schubverzerrung durch mittragende Breiten bei Flanschen berücksichtigt werden; die Vorgehensweise für Baustahl gemäß EN 1993-1-5 ist hier ebenfalls für nichtrostenden Stahl anzuwenden. Zu beachten ist, dass gemäß EN 1993-1-5 die Wirkung der Schubverzerrung durch mittragende Breiten sowohl im Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit berücksichtigt werden muss.

### 5.4.3 Eindrehen der Flansche

Das Eindrehen der Flansche (d. h. die Krümmung nach innen zur neutralen Achse hin) sollte bei sehr breiten Flanschen eines biegebeanspruchten Querschnittes oder bei Flanschen eines biegebeanspruchten Bogenquerschnitts, bei dem die konkave Seite druckbeansprucht ist, für die Tragfähigkeit berücksichtigt werden, solange das

Eindreuen der Flansche weniger als 5 % der Querschnittshöhe beträgt. Wenn das Eindreuen der Flansche größer ist, sollte eine Abminderung der Tragfähigkeit, beispielsweise durch die Verringerung der Hebelarmlänge von Querschnittsteilen bei breiten Flanschen und durch die mögliche Auswirkung von Stegbiegungen, berücksichtigt werden.

Die Breite-zu-Dicke-Verhältnisse der Flansche von gängigen Trägerprofilen aus nichtrostendem Stahl verhindern i. d. R. ein Eindreuen der Flansche. Falls erforderlich, kann das Verfahren für Baustahl gemäß EN 1993-1-3 auch für nichtrostenden Stahl angewendet werden.

## 5.5 Ausgesteifte ebene Querschnittsteile

### 5.5.1 Ebene Querschnittsteile mit Randsteifen

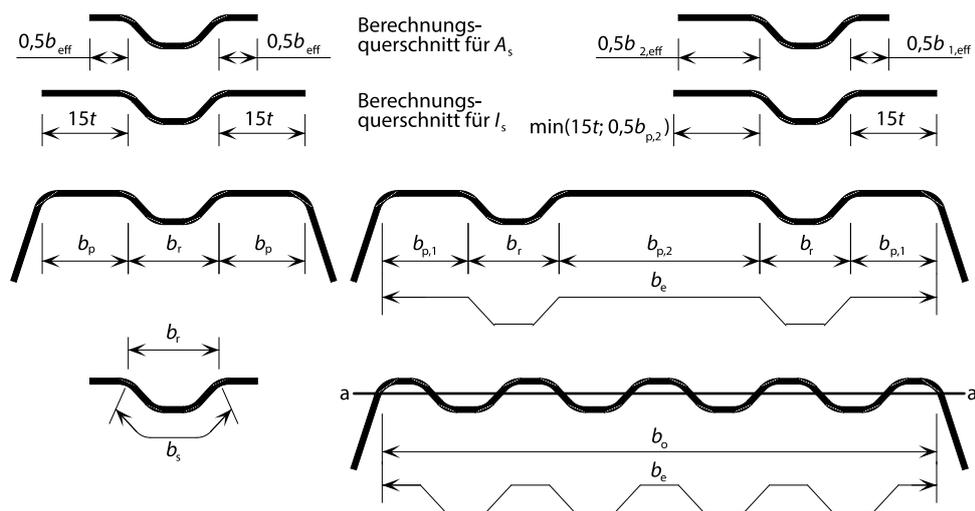
Das Vorgehen für mit Randsteifen ausgesteifte Querschnittsteile aus Baustahl gemäß EN 1993-1-3 ist auch für nichtrostenden Stahl anzuwenden.

### 5.5.2 Ebene Querschnittsteile mit Zwischensteifen

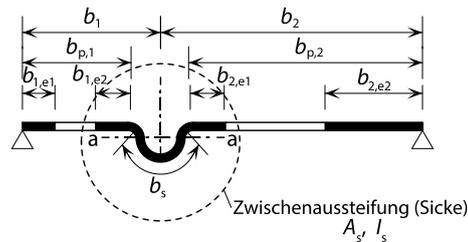
Das Vorgehen für mit Zwischensteifen ausgesteifte Querschnittsteile aus Baustahl gemäß EN 1993-1-3 ist auch für nichtrostenden Stahl anzuwenden.

### 5.5.3 Trapezblechprofile mit Zwischenaussteifungen (Sicken) in den Gurten

Die wirksame Querschnittsfläche eines Gurtes mit Zwischenaussteifungen (Sicken) unter konstanter Druckbeanspruchung besteht aus den reduzierten wirksamen Querschnittsflächen der Aussteifungen (Sicken)  $A_{s,red}$  zuzüglich zwei an eine Zwischenaussteifung (Sicke) angrenzende Gurtstreifen der Breite  $0,5b_{eff}$  bzw.  $15t$ , siehe Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4.



**Abbildung 5.3** Druckgurt mit einfacher, zweifacher oder mehrfacher Aussteifung durch Sicken



**Abbildung 5.4** Zwischenaussteifung (Sicke)

Es ist zu erwarten, dass der Abstand  $15t$  zur Ermittlung der reduzierten wirksamen Querschnittsflächen von Aussteifungen (Sicken)  $A_{s,red}$  in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-3 auf  $20t$  erhöht wird.

Bei einer mittig angeordneten Zwischenaussteifung (Sicke) im Gurt sollte die elastische kritische Spannung  $\sigma_{cr,s}$  (für die Berechnung von  $\bar{\lambda}_d$  erforderlich) wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} \quad (5.4)$$

Dabei gilt:

- $b_p$  nominelle ebene Breite eines Querschnittsteils,
- $b_s$  Breite der Aussteifung (Sicke), gemessen entlang ihres Umfangs,
- $A_s$  Querschnittsfläche der Aussteifung (Sicke),
- $I_s$  Flächenträgheitsmoment 2. Grades der Aussteifung.

Die oben genannten Parameter sind in Abbildung 5.3, Abbildung 5.4 bzw. Abbildung 5.5 angegeben.

- $k_w$  Beiwert, der eine teilweise Drehbettung des ausgesteiften Gurtes durch die Stege oder andere angrenzende Querschnittsteile berücksichtigt. Für die Berechnung eines druckbeanspruchten wirksamen Querschnitts gilt  $k_w = 1,0$ .

Bei zwei symmetrisch angeordneten Zwischenaussteifungen (Sicken) sollte die elastische kritische Spannung  $\sigma_{cr,s}$  wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8b_1^2(3b_e - 4b_1)}} \quad (5.5)$$

mit:

$$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s \quad (5.6)$$

$$b_1 = b_{p,1} + 0,5b_r \quad (5.7)$$

Dabei gilt:

- $b_{p,1}$  nominelle ebene Breite eines äußeren Querschnittsteils, siehe Abbildung 5.4,
- $b_{p,2}$  nominelle ebene Breite eines inneren Querschnittsteils, siehe Abbildung 5.4,
- $b_r$  Gesamtbreite einer Zwischenaussteifung (Sicke), siehe Abbildung 5.3.

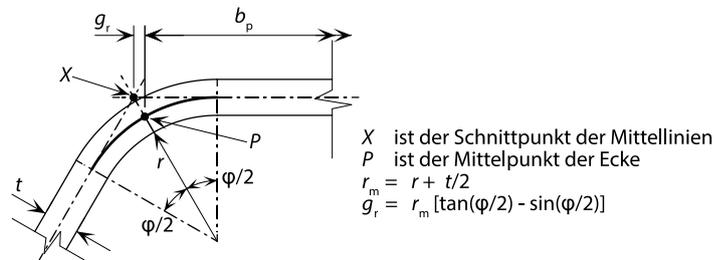
Der Wert für  $k_w$  darf mit der Beulhalbwellenlänge  $l_b$  des Druckgurtes wie folgt bestimmt werden:

$$\frac{l_b}{s_w} \geq 2, \quad k_w = k_{w0} \quad (5.8)$$

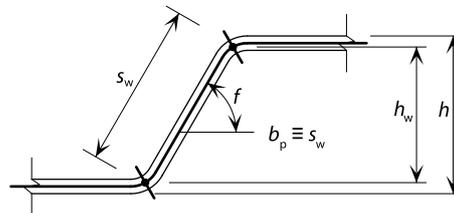
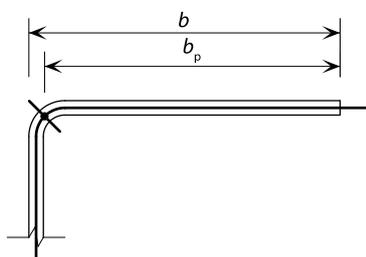
$$\frac{l_b}{s_w} < 2, \quad k_w = k_{w0} - (k_{w0} - 1) \left[ \frac{2l_b}{s_w} - \left( \frac{l_b}{s_w} \right)^2 \right] \quad (5.9)$$

Dabei ist:

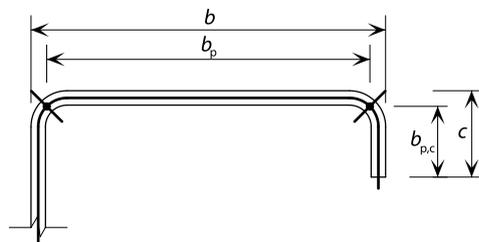
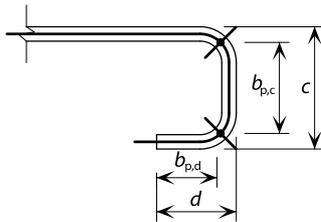
$s_w$  geneigte Steghöhe, siehe Abbildung 5.5.



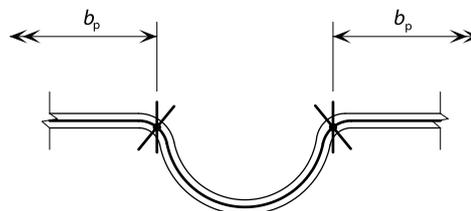
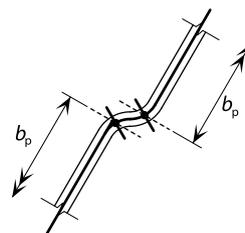
a. Mittelpunkt der Ecke oder Biegung



c. Nominelle ebene Breite  $b_p$  eines Steges  
 ( $b_p \equiv$  geneigte Steghöhe  $s_w$ )



b. Nominelle ebene Breite  $b_p$   
 der Querschnittsteile  $b$ ,  $c$  bzw.  $d$



d. Nominelle ebene Breite  $b_p$  von Querschnittsteilen,  
 die an eine Aussteifung (Sicke) angrenzen

**Abbildung 5.5** Nominelle Breiten ebener Querschnittsteile  $b_p$  unter Berücksichtigung der Ausrundungsradien

Alternativ kann die elastische Drehbettung  $k_w$  auf der sicheren Seite liegend wie für eine gelenkige Lagerung mit 1,0 angenommen werden.

Die Werte für  $l_b$  und  $k_{wo}$  dürfen wie folgt bestimmt werden:

a) bei einem Druckgurt mit einer Zwischenaussteifung (Sicke):

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2b_p + 3b_s)}{t^3}} \quad (5.10)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} \quad (5.11)$$

$$b_d = 2b_p + b_s \quad (5.12)$$

b) bei einem Druckgurt mit zwei oder drei Zwischenaussteifungen (Sicken):

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{\frac{I_s b_1^2 (3b_e - 4b_1)}{t^3}} \quad (5.13)$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1)}{b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3b_e - 4b_1)}} \quad (5.14)$$

Die reduzierte wirksame Querschnittsfläche einer Aussteifung (Sicke)  $A_{s,red}$  unter Berücksichtigung von Biegeknicken der Aussteifung sollte wie folgt ermittelt werden:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad \text{jedoch } A_{s,red} \leq A_s \quad (5.15)$$

Dabei gilt:

$\sigma_{com,ser}$  Druckspannung in der Schwerlinie der Aussteifung (Sicke) berechnet mit der wirksamen Querschnittsfläche.

Bei Stegen ohne eine Aussteifung sollte der Abminderungsfaktor  $\chi_d$  wie folgt bestimmt werden:

$$\chi_d = 1,0, \quad \text{wenn } \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad (5.16)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d, \quad \text{wenn } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad (5.17)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d}, \quad \text{wenn } \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad (5.18)$$

$$\text{Dabei ist } \bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,s}}$$

Bei Stegen mit einer Aussteifung sollte gemäß EN 1993-1-3 verfahren werden.

Bei der Berechnung von wirksamen Querschnittswerten sollten die reduzierten wirksamen Querschnittsflächen von Aussteifungen (Sicken)  $A_{s,red}$  für alle Querschnittsteile die in den wirksamen Querschnittsflächen der Aussteifungen  $A_s$  enthalten sind, mit reduzierten Blechdicken  $t_{red} = t (A_{red}/A_s)$  ermittelt werden.

## 5.6 Berechnung von Querschnittswerten

### 5.6.1 Allgemeines

Die Berechnung von Querschnittswerten sollte nach üblichen und bewährten Verfahren erfolgen, wobei jede Abminderung der Bruttoquerschnittsfläche durch örtliches Beulen oder durch Löcher berücksichtigt werden muss.

### 5.6.2 Einfluss ausgerundeter Ecken

Wenn der Innenradius  $r \leq 5t$  sowie  $r \leq 0,10b_p$  ist, kann der Einfluss ausgerundeter Ecken auf die Tragfähigkeiten von Querschnitten vernachlässigt werden und es darf vereinfacht angenommen werden, dass der Querschnitt aus ebenen Querschnittsteilen mit scharfen Ecken besteht. Bei Querschnittssteifigkeiten ist der Einfluss ausgerundeter Ecken immer zu berücksichtigen.

Der Einfluss ausgerundeter Ecken auf die Querschnittswerte kann mit hinreichender Genauigkeit berücksichtigt werden, indem die Querschnittswerte eines ansonsten ähnlichen Ersatzquerschnitts mit scharfen Ecken, siehe Abbildung 5.6, durch die folgenden Näherungen abgemindert werden:

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) \quad (5.19)$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) \quad (5.20)$$

$$I_w = I_{w,sh} (1 - 4\delta) \quad (5.21)$$

mit:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (5.22)$$

Dabei gilt:

$A_g$  Bruttoquerschnittsfläche

$A_{g,sh}$  Fläche eines Querschnitts mit scharfen Ecken, als Ersatz für  $A_g$

$b_{p,i}$  nominelle ebene Breite eines Querschnittsteils  $i$  bei einem Ersatzquerschnitt mit scharfen Ecken

$I_g$  Flächenträgheitsmoment 2. Grades des Bruttoquerschnitts

$I_{g,sh}$  Flächenträgheitsmoment 2. Grades eines Querschnitts mit scharfen Ecken als Ersatz für  $I_g$

$I_w$  Wölbwiderstand des Bruttoquerschnitts

$I_{w,sh}$  Wölbwiderstand eines Querschnitts mit scharfen Ecken als Ersatz für  $I_w$

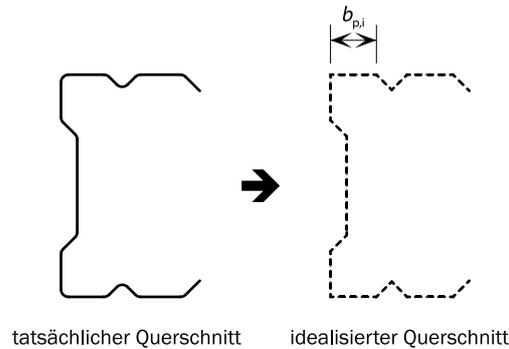
$\varphi_j$  Winkel zwischen zwei ebenen Querschnittsteilen

$m$  Anzahl der ebenen Querschnittsteile

$n$  Anzahl der gekrümmten Querschnittsteile

$r_j$  Innenradius eines gekrümmten Querschnittsteils  $j$ .

Die oben dargestellten Abminderungen dürfen ebenfalls zur Berechnung der wirksamen Querschnittswerte  $A_{eff}$ ,  $I_{y,eff}$ ,  $I_{z,eff}$  und  $I_{w,eff}$  verwendet werden, vorausgesetzt, dass die nominellen ebenen Breiten der Querschnittsteile ausgehend von den Schnittpunkten der Mittellinien gemessen wurden.



**Abbildung 5.6** Näherungsweise Berücksichtigung ausgerundeter Ecken

### 5.6.3 Bruttoquerschnitt

Bei der Berechnung von Bruttoquerschnittswerten brauchen die Löcher für Verbindungsmittel nicht abgezogen werden, allerdings müssen größere Öffnungen i. d. R. berücksichtigt werden.

### 5.6.4 Nettoquerschnitt

Die Nettoquerschnittsfläche eines Querschnitts oder eines Querschnittsteils ist i. d. R. aus der Bruttoquerschnittsfläche durch geeigneten Abzug aller Löcher für Verbindungsmittel und anderer Öffnungen zu bestimmen. Beim Abzug der Löcher für Verbindungsmittel sollte der Nenndurchmesser eines jeden Lochs angesetzt werden.

Bei nicht versetzten Löchern für Verbindungsmittel sollte die gesamte Lochabzugsfläche die maximale Summe aller Lochquerschnittsflächen eines kritischen Schnitts senkrecht zur Bauteilachse (siehe Risslinie (2) in Abbildung 5.7) sein.

Bei versetzt angeordneten Löchern für Verbindungsmittel sollte die gesamte Lochabzugsfläche der größere der beiden folgenden Werte sein:

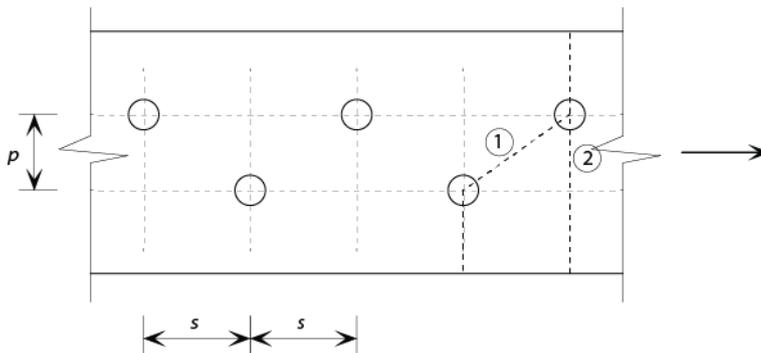
- Die Lochabzugsfläche wie bei nicht versetzten Löchern oder
- $t \left( nd_0 - \sum \left[ \frac{s^2}{4p} \right] \right)$

Dabei gilt:

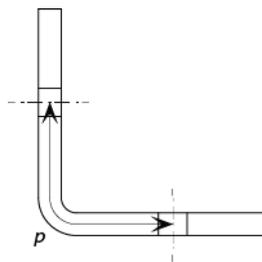
- $s$  Abstand zwischen zwei versetzt angeordneten Löchern, d. h. der Abstand zwischen den Achsen zweier aufeinanderfolgender Löcher, parallel zur Bauteilachse gemessen,
- $p$  Abstand zwischen zwei versetzt angeordneten Löchern, d. h. der Abstand zwischen den Achsen zweier aufeinanderfolgender Löcher, senkrecht zur Bauteilachse gemessen,
- $t$  Blechdicke,
- $n$  Anzahl der Löcher entlang einer Diagonalen oder einer Zickzacklinie (kritische Risslinie), die sich über das Bauteil oder einen Teil davon erstreckt, siehe Abbildung 5.7,
- $d_0$  Lochdurchmesser.

Als Beispiel sollte der Abstand bei Winkeln mit Löchern in beiden Schenkeln entlang der Profilmittellinie gemessen werden, siehe Abbildung 5.8.

Bei Winkeln, die nur über einen Schenkel angeschlossen werden, sollte gemäß Kapitel 7.2 verfahren werden.



**Abbildung 5.7** Versetzte Löcher und kritische Risslinien 1 und 2



**Abbildung 5.8** Lochabstand bei Winkeln mit Löchern in beiden Schenkeln

## 5.7 Beanspruchbarkeit von Querschnitten

### 5.7.1 Allgemeines

Dieses Kapitel beinhaltet ausschließlich die Beanspruchbarkeiten von Querschnitten; um die Tragfähigkeit eines Bauteils vollständig zu betrachten, sind jedoch zusätzlich auch die Stabilitätsnachweise für das Bauteil erforderlich. Die Stabilitätsnachweise für Bauteile werden in Kapitel 6 behandelt. Die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M$ , die in diesem Kapitel verwendet werden, sind in Tabelle 4.1 angegeben.

Eine Kaltverfestigung, die durch Kaltumformen während der Fertigung entsteht (siehe Kapitel 2.2.1), erhöht i. d. R. die Beanspruchbarkeit eines Querschnitts. Hilfestellungen, wie man diese Festigkeitssteigerung ausnutzen kann, finden sich in 0.

Erhöhte Beanspruchbarkeiten von Querschnitten, wie sie durch den günstigen Einfluss der Verfestigung während der Nutzung auftreten können, werden in der „Continuous Strength Method“ (CSM) berücksichtigt, welche in 0 beschrieben wird. Alternativ kann die Festigkeitssteigerung, die durch eine Verfestigung entsteht, auch durch Versuche nachgewiesen werden (siehe Kapitel 10).

## 5.7.2 Querschnitte unter Zugbeanspruchung

Für den Bemessungswert der Beanspruchbarkeit  $N_{t,Rd}$  von ausschließlich durch eine konstante Zugkraft beanspruchten Querschnitten sollte der kleinere der beiden folgenden Werte verwendet werden:

a) der Bemessungswert der plastischen Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.23)$$

b) der Bemessungswert der Grenzzugbeanspruchbarkeit der Nettoquerschnittsfläche eines Querschnitts mit Löchern für Verbindungsmittel, ermittelt im kritischen Schnitt

$$N_{u,Rd} = \frac{k A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.24)$$

Dabei gilt:

- $A_g$  Bruttoquerschnittsfläche,
- $A_{net}$  Nettoquerschnittsfläche (siehe Kapitel 5.6.4),
- $f_y$  charakteristische Streckgrenze des Materials (i. d. R. angegeben als Mindestwert der 0,2 %-Dehngrenze, siehe Tabelle 2.2),
- $f_u$  charakteristische Zugfestigkeit (i. d. R. angegeben als Mindestwert, siehe Tabelle 2.2),
- $k$  Beiwert, der abhängig vom Fertigungsprozess der Löcher und von der Art der Beanspruchung ist:
  - $k = 1,0$  bei Querschnitten mit glatten Löchern (d. h. Löcher ohne Kerben), z. B. gebohrte oder durch Wasserstrahlschneiden hergestellte Löcher,
  - $k = 0,9$  bei Querschnitten mit rauen Löchern (d. h. Löcher mit Kerben), z. B. durch Stanzen oder Brennschneiden hergestellte Löcher,
  - $k = 0,9$  bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen.

Gleichung (5.24) wird voraussichtlich in die nächste Überarbeitung von EN 1993-1-1 für den Einsatz von Baustahl eingeführt und ist ebenfalls für den Einsatz von nichtrostendem Stahl geeignet. EN 1993-1-4 enthält zurzeit noch den konservativeren Ansatz aus EN 1993-1-3:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.25)$$

mit

$$k_r = [1 + 3r(d_0/u - 0,3)] \quad (5.26)$$

Dabei gilt:

- $r$  = [Anzahl der Schrauben im kritischen Schnitt des Querschnitts] / [gesamte Anzahl der Schrauben in der Verbindung],
- $d_0$  Nenndurchmesser des Schraubenlochs,
- $u$  =  $2e_2$  jedoch  $u \leq p_2$ ,
- $e_2$  Abstand zwischen der Achse des Schraubenlochs bis zum nächsten benachbarten Rand, senkrecht zur Krafrichtung gemessen,
- $p_2$  Abstand zwischen zwei Achsen unterschiedlicher Schraubenlöcher, senkrecht zur Krafrichtung gemessen.

### 5.7.3 Querschnitte unter Druckbeanspruchung

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit von druckbeanspruchten Querschnitten  $N_{c,Rd}$  bei einer Resultierenden durch den Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts (bei Querschnitten der Klasse 1, 2, oder 3) bzw. des wirksamen Querschnitts (bei Querschnitten der Klasse 4) sollte wie folgt bestimmt werden:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (5.27)$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (5.28)$$

Anmerkung: Nicht doppelsymmetrische Querschnitte der Klasse 4 sollten gemäß den Angaben in Kapitel 5.7.6 behandelt werden, um das Zusatzmoment  $\Delta M_{Ed}$ , welches infolge der Exzentrizität der Schwerlinie des wirksamen Querschnitts entsteht, zu berücksichtigen, siehe Kapitel 5.4.1.

### 5.7.4 Querschnitte unter Biegebeanspruchung

Ohne das zusätzliche Einwirken von äußeren Quer- oder Normalkräften sollte der Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit von Querschnitten unter einachsiger Biegung,  $M_{c,Rd}$ , wie folgt bestimmt werden:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1 oder 2} \quad (5.29)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 3} \quad (5.30)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,min} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (5.31)$$

Dabei gilt

$W_{pl}$  plastisches Widerstandsmoment,

$W_{el,min}$  minimales elastisches Widerstandsmoment bezogen auf die Querschnittsfaser mit der maximalen elastischen Normalspannung (bei kaltgeformten Bauteilen siehe Kapitel 5.1),

$W_{eff,min}$  minimales wirksames Widerstandsmoment bezogen auf die Querschnittsfaser mit der maximalen elastischen Normalspannung (bei kaltgeformten Bauteilen siehe Kapitel 5.1).

Bei Querschnitten unter zweiachsiger Biegung siehe Kapitel 5.7.6.

### 5.7.5 Querschnitte unter Querkraftbeanspruchung

Der Bemessungswert der plastischen Querkraftbeanspruchbarkeit von Querschnitten,  $V_{pl,Rd}$ , kann grundsätzlich wie folgt ermittelt werden

$$V_{pl,Rd} = \left( \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \right) \quad (5.32)$$

wobei  $A_v$  die wirksame Schubfläche ist.

Tabelle 5.5 gibt verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung der wirksamen Schubfläche an.

**Tabelle 5.5** Wirksame Schubfläche  $A_v$  bei verschiedenen Querschnitten

Querschnitt	Wirksame Schubfläche $A_v$
Gewalzte Profile mit I- oder H-Querschnitten, Lastrichtung parallel zum Steg	$A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$ aber mindestens $\eta h_w t_w$
Gewalzte Profile mit U-Querschnitten, Lastrichtung parallel zum Steg	$A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$
Profile mit T-Querschnitten, Lastrichtung parallel zum Steg	gewalzt: $A - bt_f + (t_w + 2r) \frac{t_f}{2}$ geschweißt: $t_w(h - \frac{t_f}{2})$
Geschweißte Profile mit I-, H- oder Kastenquerschnitten, Lastrichtung parallel zum Steg	$\eta \sum(h_w t_w)$
Geschweißte Profile mit I-, H-, U- oder Kastenquerschnitten, Lastrichtung parallel zu den Flanschen	$A - \sum(h_w t_w)$
Gewalzte Rechteckhohlquerschnitte mit konstanter Blechdicke	Lastrichtung parallel zur Trägerhöhe: $Ah/(b + h)$ Lastrichtung parallel zur Trägerbreite: $Ab/(b + h)$
Rundhohlquerschnitte mit konstanter Blechdicke	$2A/\pi$
Elliptische Hohlquerschnitte mit konstanter Blechdicke, Lastrichtung parallel zur Trägerhöhe	$2(h - t)/t$
Elliptische Hohlquerschnitte mit konstanter Blechdicke, Lastrichtung parallel zur Trägerbreite	$2(b - t)/t$

Dabei gilt:

- $A$  Querschnittsfläche,
- $b$  Gesamtbreite,
- $h$  Gesamthöhe,
- $h_w$  Steghöhe,
- $r$  Ausrundungsradius,
- $t_f$  Flanschdicke,
- $t_w$  Stegdicke (bei nicht konstanter Stegdicke sollte für  $t_w$  die minimale Dicke angesetzt werden),
- $\eta$  gemäß EN 1993-1-5 anzusetzen. (EN 1993-1-4 empfiehlt einen Wert von  $\eta = 1,20$ ).

Anmerkung: Derselbe Wert für  $\eta$ , der bei der Berechnung der plastischen Querkraftbeanspruchbarkeit verwendet wird, sollte auch bei der Berechnung der Schubtragfähigkeit verwendet werden.

Die Schubbeulbeanspruchbarkeit sollte ebenfalls untersucht werden, siehe Kapitel 6.4.3.

### 5.7.6 Querschnitte unter kombinierter Beanspruchung (Interaktion von Normalkraft, Querkraft und Biegung)

Bei einem Querschnitt unter Biegebeanspruchung sollte der Einfluss einer zusätzlich einwirkenden Normalkraft auf die plastische Biegebeanspruchbarkeit berücksichtigt werden. Bei Querschnitten der Klasse 1 oder 2 muss die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (5.33)$$

wobei  $M_{N,Rd}$  der durch die Auswirkung einer einwirkende Normalkraft  $N_{Ed}$  reduzierte Bemessungswert der plastischen Biegebeanspruchbarkeit ist.

Bei doppelsymmetrischen I- und H-Querschnitten sowie anderen Querschnitten mit Gurten muss die Auswirkung einer einwirkenden Normalkraft auf die plastische Biegebeanspruchbarkeit für Biegung um die  $y$ - $y$  Achse nicht berücksichtigt werden, wenn die folgenden beiden Bedingungen erfüllt werden:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad (5.34)$$

$$N_{Ed} \leq 0,5h_w t_w f_y / \gamma_{M0} \quad (5.35)$$

Bei Querschnitten der Klasse 3 oder 4 ohne Einwirken einer zusätzlichen äußeren Querkraft muss die maximale Normalspannung folgende Bedingung erfüllen:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_y / \gamma_{M0} \quad (5.36)$$

Dabei gilt:

$\sigma_{x,Ed}$  Bemessungswert der lokalen, einwirkenden Normalspannung aus Biegung und Normalkraft, gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Löchern für Verbindungsmittel.

Bei Querschnitten der Klasse 4 kann alternativ zu Gleichung (5.36) die folgende vereinfachte Bedingung erfüllt werden:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (5.37)$$

Dabei gilt:

$A_{eff}$  wirksame Querschnittsfläche bei konstanter Druckbeanspruchung,  
 $W_{eff,y,min}$  wirksames Widerstandsmoment eines Querschnitts bei Biegebeanspruchung ausschließlich um die maßgebende Achse,  
 $e_N$  Exzentrizität der maßgebenden Schwereachse eines Querschnitts bei reiner Druckbeanspruchung.

Bei Winkeln ist zu beachten, dass die oben angegebenen Achsbezeichnungen  $y$  und  $z$  jeweils durch  $u$  und  $v$  zu ersetzen sind.

Falls der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft  $V_{Ed}$  bei einem Querschnitt unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft, Querkraft und Biegung einen Anteil von 50 % des Bemessungswertes der plastischen Querkraftbeanspruchbarkeit  $V_{pl,Rd}$  überschreitet, sollte der Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts unter kombinierter Beanspruchung mit einer reduzierten Streckgrenze  $(1 - \rho) f_y$  für die wirksamen Schubflächen berechnet werden, wobei gilt  $\rho = (2V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$ .

## 6 BEMESSUNG VON BAUTEILEN

### 6.1 Einleitung

Die Bemessung von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl ist grundsätzlich ähnlich wie die Bemessung von Bauteilen aus Baustahl. Es wird empfohlen, dass die Kräfte und Momente in den Bauteilen anhand einer globalen elastischen Berechnung bestimmt werden.

Neben der Querschnittbemessung, siehe Kapitel 5, sollte ebenfalls die Stabilität von Bauteilen berücksichtigt werden, welche in diesem Kapitel betrachtet wird.

Zur Stabilitätsuntersuchung von Bauteilen aus nichtrostendem Stahl kann der auf die Beulspannung bezogene Tangentenmodul verwendet werden anstelle des Anfangstangentenmoduls, wie bei einer Bemessung von Bauteilen aus Baustahl üblich. Unter der Annahme ähnlicher geometrischer und struktureller Imperfektionen in Bauteilen aus nichtrostendem Stahl und aus Baustahl, kann dieser Ansatz zu angemessenen Ergebnisse führen und daher auch von Tragwerksplanern genutzt werden, solange er auf anerkannten Bemessungsregeln für Baustähle beruht. Da diesem Ansatz allerdings iterative Lösungsverfahren zu Grunde liegen, wird er, bis auf einige Fälle, in denen wirksame Bemessungskurven für den Einsatz des Anfangstangentenmoduls hergeleitet wurden, nicht weiter in diesen Bemessungshilfen betrachtet. Stattdessen liegt der Fokus auf der Kalibrierung von verfügbaren Versuchsergebnissen.

Die nachfolgenden Abschnitte berücksichtigen den Einsatz von einfach-, doppelt- oder punktsymmetrischen gleichförmigen Querschnitten. Die Beanspruchbarkeit von Querschnitten ohne Symmetrieachse sollte durch geeignete Versuche untersucht werden.

### 6.2 Bauteile unter Zugbeanspruchung

Bauteile unter reiner Zugbeanspruchung sind grundsätzlich nicht stabilitätsgefährdet. Ihre Bemessung beruht daher ausschließlich auf der Querschnittsbemessung in Kapitel 5.7.2 und eventuell auf einer Bemessung von Anschlüssen, siehe Kapitel 7.

Bei Winkelprofilen, die nur über einen Schenkel angeschlossen werden, und bei anderen unsymmetrisch angeschlossenen Bauteilen gilt:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd} \quad (6.1)$$

wobei die Beanspruchbarkeiten entsprechend Kapitel 5.7.2 ermittelt werden sollten und  $N_{u,Rd}$  aus Kapitel 7.2.3 zu entnehmen ist.

### 6.3 Bauteile unter Druckbeanspruchung

#### 6.3.1 Allgemeines

Bauteile unter Druckbeanspruchung sind grundsätzlich anfällig gegenüber einer Vielzahl möglicher Stabilitätsprobleme, einschließlich:

- Plattenbeulen (ausschließlich bei Querschnitten der Klasse 4),
- Biegeknicke,
- Drillknicke und
- Biegedrillknicke.

### **Doppelsymmetrische Querschnitte (Rundhohlprofile (CHS), Rechteckhohlprofile (RHS), I-Profile etc.)**

Doppelsymmetrische Querschnitte müssen nicht auf Biegedrillknicken untersucht werden, da der Schubmittelpunkt mit dem Schwerpunkt zusammenfällt. Allerdings kann Drillknicken maßgebend werden.

Kreisförmige bzw. quadratische Hohlprofile versagen i. d. R. nicht unter Drillknicken.

Bei den üblicherweise im Bauwesen eingesetzten Rechteckhohlprofilen (RHS) wird Drillknicken i. d. R. nicht maßgebend. Bei Rechteckhohlprofilen muss Drillknicken daher nur berücksichtigt werden, wenn ungewöhnlich große  $h/b$ -Verhältnisse vorliegen.

### **Einfachsymmetrische Querschnitte (gleichschenklige Winkelprofile, U-Profile etc.)**

Bei Querschnitten wie z. B. einzelnen U-Profilen und gleichschenkligen Winkelprofilen muss Biegedrillknicken untersucht werden, da der Schubmittelpunkt und der Schwerpunkt nicht zusammenfallen.

### **Punktsymmetrische Querschnitte (Z-Profile, Kreuzprofile etc.)**

Bei punktsymmetrischen Querschnitten kann Drillknicken maßgebend werden.

## **6.3.2 Plattenbeulen**

Bei Querschnitten der Klasse 4 wird Plattenbeulen durch die Verwendung von wirksamen Querschnittsflächen berücksichtigt. Bei unsymmetrischen Querschnitten der Klasse 4 ist das aus der Exzentrizität der Schwerelinie des wirksamen Querschnitts entstehende zusätzliche Moment  $\Delta M_{Ed}$  in Übereinstimmung mit den Empfehlungen aus Kapitel 6.5 zu berücksichtigen.

## **6.3.3 Biegeknicken**

Die Beanspruchbarkeit unter Biegeknicken sollte wie folgt ermittelt werden:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (6.2)$$

$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_y / \gamma_{M1} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (6.3)$$

Dabei gilt:

$A$  Bruttoquerschnittsfläche,

$A_{eff}$  wirksame Fläche eines Querschnitts der Klasse 4,

$\chi$  Abminderungsbeiwert für Knicken bestimmt durch:

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (6.4)$$

mit:

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) \quad (6.5)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (6.6)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E} \frac{A_{eff}}{A}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (6.7)$$

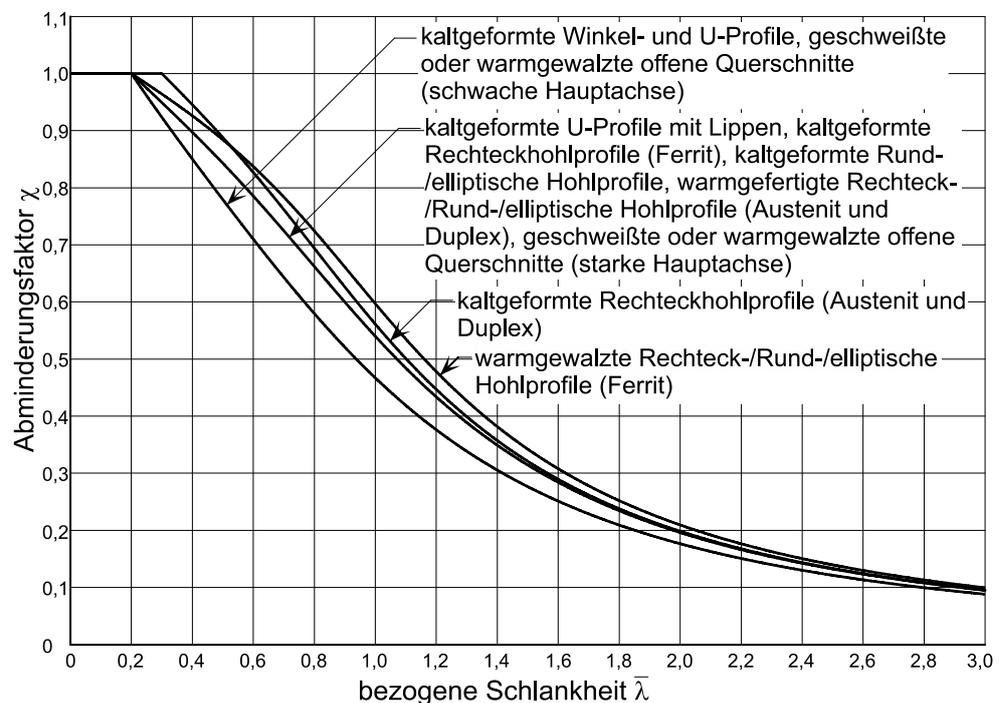
Dabei gilt:

- $\alpha$  Imperfektionsbeiwert, gemäß Tabelle 6.1,
- $N_{cr}$  elastische Verzweigungslast für die maßgebende Knickform, ermittelt mit Bruttoquerschnittswerten,
- $\bar{\lambda}_0$  einheitslose Grenزشlankheit, gemäß Tabelle 6.1,
- $L_{cr}$  Knicklänge in der betrachteten Knickebene. Die Ermittlung der Knicklänge sollte anhand von mechanischen Tragwerksprinzipien erfolgen, wobei die Randbedingungen berücksichtigt werden müssen.
- $i$  Trägheitsradius für die maßgebende Knickebene, ermittelt mit Bruttoquerschnittswerten.

**Tabelle 6.1** Werte für den Imperfektionsbeiwert  $\alpha$  und die Grenزشlankheit  $\bar{\lambda}_0$  beim Biegeknicken

Bauteiltyp	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Austenit und Duplex		Ferrit	
		$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Kaltgeformte Winkel- und U-Profile	jede	0,76	0,2	0,76	0,2
Kaltgeformte U-Profile mit Lippen	jede	0,49	0,2	0,49	0,2
Kaltgeformte Rechteckhohlprofile	jede	0,49	0,3	0,49	0,2
Kaltgeformte Rund-/elliptische Hohlprofile	jede	0,49	0,2	0,49	0,2
Warmgefertigte Rechteckhohlprofile	jede	0,49	0,2	0,34	0,2
Warmgefertigte Rund-/elliptische Hohlprofile	jede	0,49	0,2	0,34	0,2
Geschweißte oder warmgewalzte offene Querschnitte	starke Hauptachse	0,49	0,2	0,49	0,2
	schwache Hauptachse	0,76	0,2	0,76	0,2

Abbildung 6.1 zeigt die Knicklinien für Biegeknicken.



**Abbildung 6.1** Knicklinien für Biegeknicken

Biegeknicken kann vernachlässigt werden, sodass nur Querschnittsnachweise zu führen sind, wenn folgende Bedingung erfüllt wird:

$$\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad \text{oder bei} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq \bar{\lambda}_0^2$$

Die Knicklinien in Abbildung 6.1 und Tabelle 6.1 liegen im Vergleich zu den Werten für den Imperfektionsbeiwert  $\alpha$  und die Grenزشlankheit  $\bar{\lambda}_0$  gemäß EN 1993-1-4, siehe Tabelle 6.2, auf der sicheren Seite. Diese Abweichungen beruhen auf Erkenntnissen der Forschung aus den letzten 10 Jahren, woraus hervorgeht, dass die Knicklinien in EN 1993-1-4 für kaltgeformte offene Querschnitte und kaltgeformte Hohlprofile übermäßig optimistisch sind und dass es einen Unterschied beim Knickverhalten von kaltgeformten Rechteckhohlprofil-Stützen aus ferritischem nichtrostendem Stahl zu solchen aus austenitischem oder Duplex-Stahl gibt. Es ist zu erwarten, dass die in Abbildung 6.1 und Tabelle 6.1 dargestellten Biegeknicklinien in die nächste Überarbeitung von EN 1993-1-4 eingearbeitet werden.

**Tabelle 6.2** Werte für den Imperfektionsbeiwert  $\alpha$  und die Grenزشlankheit  $\bar{\lambda}_0$  bei Biegeknicken gemäß EN 1993-1-4

Knickform	Bauteiltyp	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Biegeknicken	Kaltgeformte, offene Querschnitte	0,49	0,40
	Hohlprofile (geschweißt und nahtlos)	0,49	0,40
	Geschweißte offene Querschnitte (um die starke Hauptachse)	0,49	0,20
	Geschweißte offene Querschnitte (um die schwache Hauptachse)	0,76	0,20

Die Werte für  $\alpha$  und  $\bar{\lambda}_0$  gelten nicht für Hohlprofile, die nach der Fertigung gegläht wurden (was jedoch nur selten der Fall ist).

### 6.3.4 Drillknicken und Biegedrillknicken

Die Beanspruchbarkeit unter Drillknicken bzw. Biegedrillknicken sollte gemäß dem Verfahren in Kapitel 6.3.3 ermittelt werden, allerdings muss die Schlankheit  $\bar{\lambda}$  durch  $\bar{\lambda}_T$  entsprechend Gleichung (6.8) bzw. (6.9) ersetzt werden und der Imperfektionsbeiwert sollte mit  $\alpha = 0,34$  sowie die Grenزشlankheit mit  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$  angesetzt werden.

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (6.8)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (6.9)$$

wobei:

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

Dabei gilt:

$N_{cr,T}$  ideale Verzweigungslast für Drillknicken mit:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} \right) \quad (6.10)$$

$N_{cr,TF}$  ideale Verzweigungslast für Biegedrillknicken. Bei über die  $y$ - $y$ -Achse einfachsymmetrischen Querschnitten (d. h.  $z_o = 0$ ) mit:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[ 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left( 1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left( \frac{y_o}{i_o} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (6.11)$$

Dabei gilt:

$$i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2 \quad (6.12)$$

$i_y$  bzw.  $i_z$  Trägheitsradius des Bruttoquerschnitts bezogen jeweils auf die  $y$ - bzw.  $z$ -Achse,

$y_o$  bzw.  $z_o$  Koordinate des Schubmittelpunktes bezogen auf den Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts,

$G$  Schubmodul,

$l_T$  Knicklänge des Bauteils für Drillknicken (siehe EN 1993-1-3),

$I_T$  Torsionswiderstand (St. Venant'sches Trägheitsmoment) des Bruttoquerschnitts,

$I_w$  Wölbwiderstand des Bruttoquerschnitts,

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

$N_{cr,y}$  bzw.  $N_{cr,z}$  ideale Verzweigungslast für Biegeknicken bezogen jeweils auf die  $y$ - bzw.  $z$ -Achse.

Bei doppelsymmetrischen Querschnitten fällt der Schubmittelpunkt mit dem Schwerpunkt zusammen, demnach gilt  $y_o = 0$  und  $z_o = 0$  sowie

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

Bei Winkeln ist zu beachten, dass die oben angegebenen Achsbezeichnungen  $y$  und  $z$  jeweils durch  $u$  und  $v$  zu ersetzen sind.

## 6.4 Bauteile unter Biegebeanspruchung

### 6.4.1 Allgemeines

Ein Bauteil ist ausschließlich einachsiger Biegung durch Beanspruchungen normal zur Längsachse ausgesetzt, wenn die Randbedingungen ein Verdrehen, Zug- sowie Druckbeanspruchungen an den Auflagern verhindern.

Die folgenden Aspekte sollten bei der Ermittlung der Biegebeanspruchbarkeit eines Trägers berücksichtigt werden:

- Fließen des Querschnitts (siehe Kapitel 5.7),
- Plattenbeulen (nur bei Querschnitten der Klasse 4, siehe Kapitel 5.7),

- Biegedrillknicken (siehe Kapitel 6.4.2),
- Schubbeulen (siehe Kapitel 6.4.3),
- lokale Festigkeiten an Lasteinleitungs- oder Auflagerpunkten (siehe Kapitel 6.4.4).

Bei Bauteilen unter Biegebeanspruchung sollten sowohl die Auswirkungen der Schubverzerrung (mittragende Breiten) als auch das Eindrehen der Flansche bei der Bemessung beachtet werden, siehe Kapitel 5.4.2 und 5.4.3.

Bei Bauteilen unter zweiachsiger Biegebeanspruchung sollte das Verfahren nach Kapitel 6.5.2 angewendet werden.

### 6.4.2 Biegedrillknicken

Seitlich nicht durchgehend gehaltene Bauteile unter Biegebeanspruchung um eine Hauptachse sollten auf Biegedrillknicken untersucht werden. Bei den nachfolgend aufgeführten Bauteiltypen kann Biegedrillknicken jedoch unberücksichtigt bleiben und zur Ermittlung der Tragfähigkeit reichen ausschließlich die Querschnittsnachweise aus:

- Träger unter Biegebeanspruchung um die schwache Hauptachse,
- Träger mit ausreichender Halterung des Druckflansches gegen seitliches Ausweichen durch angemessene Stützung über die gesamte Trägerlänge,
- Träger, bei denen die bezogene Schlankheit für Biegedrillknicken folgende Bedingung erfüllt:

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4 \quad \text{oder} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16,$$

- außerdem sind Träger mit speziellen Querschnitten, wie z. B. Rechteck- oder Rundhohlprofile, nicht biegedrillknickgefährdet.

Bei allen anderen Bauteiltypen sollte der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit unter Biegebeanspruchung für Biegedrillknicken wie folgt ermittelt werden:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1} \quad (6.13)$$

Dabei ist:

$$W_y = W_{pl,y} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1 oder 2,}$$

$$W_y = W_{el,y} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 3,}$$

$$W_y = W_{eff,y} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4,}$$

$\chi_{LT}$  der Abminderungsbeiwert für Biegedrillknicken, bestimmt durch:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (6.14)$$

mit:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (6.15)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (6.16)$$

Dabei gilt:

$\alpha_{LT}$  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,

$M_{cr}$  elastisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken (siehe ANHANG E).

Bei Winkeln ist zu beachten, dass die oben angegebenen Achsbezeichnungen  $y$  und  $z$  jeweils durch  $u$  und  $v$  zu ersetzen sind.

Abbildung 6.2 zeigt eine graphische Darstellung der Knicklinien für Biegedrillknicken anhand des Abminderungsbeiwertes  $\chi_{LT}$  und der Schlankheit  $\bar{\lambda}_{LT}$ .

Die Momentenverteilung zwischen seitlichen Halterungen von Bauteilen kann durch die nachfolgend dargestellte Modifikation des Abminderungsbeiwertes  $\chi_{LT}$  berücksichtigt werden:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1,0 \quad \text{und} \quad \chi_{LT,mod} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \quad (6.17)$$

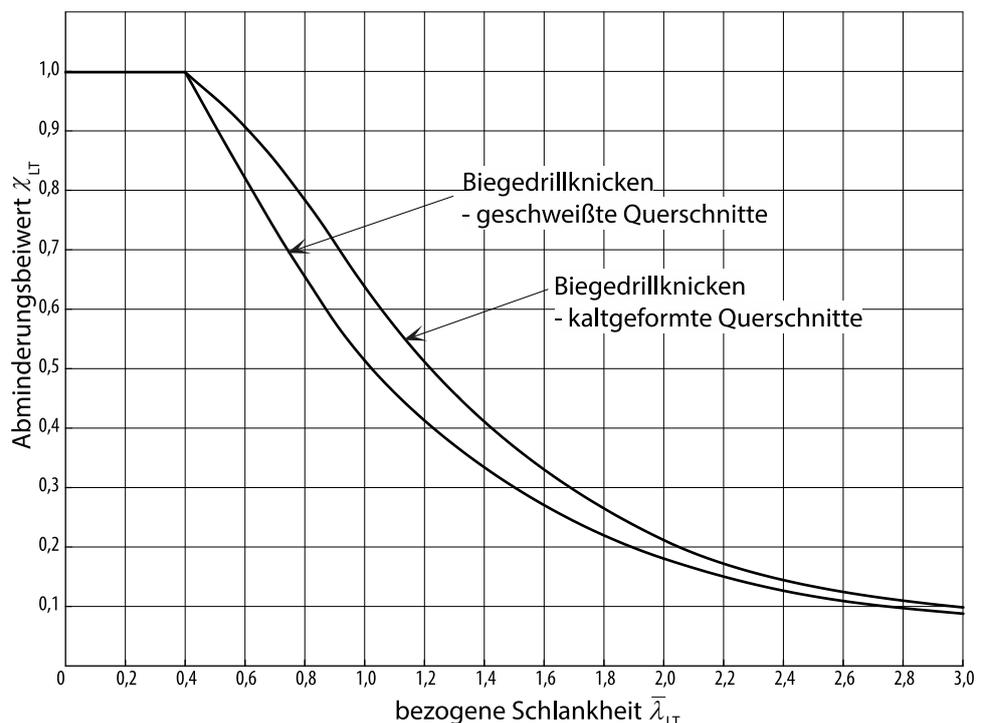
wobei der folgende Mindestwert für  $f$  empfohlen wird:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad \text{jedoch} \quad f \leq 1,0 \quad (6.18)$$

mit

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}} \quad (6.19)$$

Die Werte für  $C_1$  sind ANHANG E zu entnehmen.



**Abbildung 6.2** Knicklinien für Biegedrillknicken

### 6.4.3 Schubtragfähigkeit

Die Querkraftbeanspruchbarkeit von Bauteilen wird entweder durch die plastische Querkraftbeanspruchbarkeit (siehe Kapitel 5.7.5) oder durch die Schubtragfähigkeit begrenzt.

Die Schubtragfähigkeit muss nur unter folgenden Bedingungen betrachtet werden:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2\varepsilon}{\eta} \quad \text{bei nicht aussteiften Stegen} \quad (6.20)$$

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{24,3\varepsilon \sqrt{k_\tau}}{\eta} \quad \text{bei aussteiften Stegen} \quad (6.21)$$

Der Bemessungswert der Schubtragfähigkeit eines Trägers sollte wie folgt ermittelt werden:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.22)$$

wobei sich der Beitrag des Steges wie folgt ermitteln lässt:

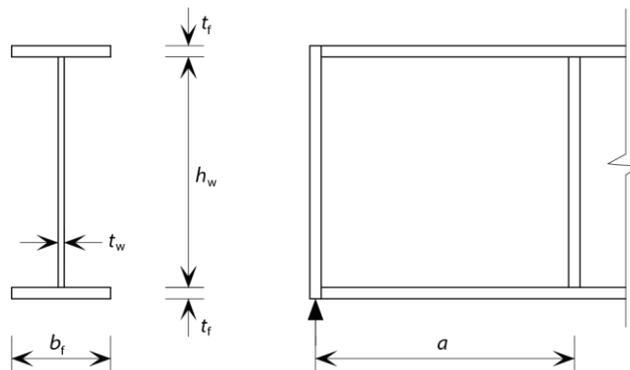
$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.23)$$

Dabei gilt:

- $h_w$  lichte Höhe des Steges zwischen den Flanschen (Abbildung 6.3),
- $\varepsilon$  Beiwert gemäß Tabelle 5.2,
- $k_\tau$  Schubbeulwert,
- $V_{bw,Rd}$  Bemessungswert des Beitrags des Steges zur Schubtragfähigkeit,
- $V_{bf,Rd}$  Bemessungswert des Beitrags der Flansche zur Schubtragfähigkeit,
- $f_{yw}$  charakteristische Streckgrenze des Steges,
- $\eta$  gemäß EN 1993-1-5 anzusetzen (EN 1993-1-4 empfiehlt einen Wert von  $\eta = 1,20$ ).

Der Nationale Anhang von EN 1993-1-4 kann einen anderen Wert für  $\eta$  festlegen.

Anmerkung: Der selbe Wert für  $\eta$ , der bei der Berechnung der plastischen Querkraftbeanspruchbarkeit verwendet wird, sollte auch bei der Berechnung der Schubtragfähigkeit verwendet werden.



**Abbildung 6.3** Definition der Querschnitts- und Trägerabmessungen

Bei Stegen mit Quersteifen nur an den Auflagern (Auflagersteifen) und bei Stegen mit entweder Zwischenquersteifen und/oder Längssteifen sollte der Beitrag des Steges mit  $\chi_w$  gemäß Tabelle 6.3 ermittelt werden.

**Tabelle 6.3** Abminderungsfaktor  $\chi_w$  für den Beitrag des Steges zur Schubtragfähigkeit

	$\chi_w$ bei starren Auflagersteifen	$\chi_w$ bei verformbaren Auflagersteifen
$\bar{\lambda}_w \leq \frac{0,65}{\eta}$	$\eta$	$\eta$
$\frac{0,65}{\eta} < \bar{\lambda}_w < 0,65$	$\frac{0,65}{\bar{\lambda}_w}$	$\frac{0,65}{\bar{\lambda}_w}$
$\bar{\lambda}_w \geq 0,65$	$\frac{1,56}{(0,91 + \bar{\lambda}_w)}$	$\frac{1,19}{(0,54 + \bar{\lambda}_w)}$

Bei Stegen mit Quersteifen nur an den Auflagern (Auflagersteifen) sollte die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_w$  wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) \quad (6.24)$$

Bei Stegen mit Quersteifen an den Auflagern sowie Zwischenquersteifen und/oder Längssteifen sollte die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_w$  wie folgt ermittelt werden:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) \quad (6.25)$$

Dabei ist  $k_\tau$  der kleinste Schubbeulwert des Stegfeldes. Bei Stegen mit starren Auflagersteifen sowie ohne oder mit mehr als zwei Längssteifen darf der Schubbeulwert  $k_\tau$  wie folgt ermittelt werden:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{für } a/h_w \geq 1 \quad (6.26)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34(h_w/a)^2 + k_{\tau st} \quad \text{für } a/h_w < 1 \quad (6.27)$$

mit:

$$k_{\tau st} = 9(h_w/a)^2 \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t^3 h_w}\right)^3} \quad \text{jedoch nicht kleiner als } \frac{2,1}{t} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}} \quad (6.28)$$

Dabei gilt:

$a$  Systemabstand zwischen Quersteifen, siehe Abbildung 6.3

$I_{sl}$  Flächenträgheitsmoment zweiten Grades der Längssteife um die z-z-Achse.

Die Gleichungen (6.26) und (6.27) dürfen auch für Blechfelder mit einer oder zwei Längssteifen angewendet werden, wenn das Verhältnis  $a/h_w \geq 3$  gilt. Bei Blechfeldern mit einer oder zwei Längssteifen und einem Verhältnis  $a/h_w < 3$  sollte der Schubbeulwert gemäß dem Verfahren in EN 1993-1-5, Anhang A.3 ermittelt werden.

Zur Vereinfachung darf der Beitrag der Flansche zur Schubtragfähigkeit  $V_{bf,Rd}$  vernachlässigt werden. Wenn jedoch die Tragfähigkeit der Flansche nicht vollständig zur Aufnahme des Biegemoments genutzt wird (d. h.  $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ ), darf der Beitrag der Flansche zur Schubtragfähigkeit wie folgt ermittelt werden:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad (6.29)$$

Dabei gilt:

$b_f$  sowie  $t_f$  bezogen auf den Flansch mit der kleineren Beanspruchbarkeit gegen Normalkräfte und  $b_f$  sollte dabei an jeder Seite des Steges nicht größer als  $15\epsilon t_f$  sein,

$M_{f,Rd}$  Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit der Bruttofläche bestehend nur aus den Flächen der wirksamen Flansche,  
 $M_{f,Rd} = M_{f,k} / \gamma_{M0}$

$$c = a \left( 0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right) \quad \text{und} \quad \frac{c}{a} \leq 0,65 \quad (6.30)$$

$f_{yf}$  charakteristische Streckgrenze der Flansche.

Wirkt zusätzlich eine Normalkraft  $N_{Ed}$ , sollte der Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit für den Beitrag der Flansche  $M_{f,Rd}$  mit dem folgenden Faktor abgemindert werden:

$$\left[ 1 - \frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) f_{yf}} \right] \gamma_{M0} \quad (6.31)$$

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

Der Nachweis der Schubtragfähigkeit sollte wie folgt geführt werden:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.32)$$

Dabei gilt:

$V_{Ed}$  Bemessungswert der einwirkenden Querkraft einschließlich der Querkraft aus Torsion.

Der Nachweis für Bauteile unter einer Drucknormalkraft und zweiachsiger Biegung sollte wie folgt geführt werden:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (6.33)$$

Dabei gilt:

$A_{eff}$  wirksame Querschnittsfläche (siehe Kapitel 5.4.1),

$e_{y,N}$  Exzentrizität der neutralen Achse bezogen auf die  $y$ -Achse (siehe Kapitel 5.4.1),

- $e_{z,N}$  Exzentrizität der neutralen Achse bezogen auf die  $z$ -Achse (siehe Kapitel 5.4.1),
- $M_{y,Ed}$  Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes um die  $y$ -Achse,
- $M_{z,Ed}$  Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes um die  $z$ -Achse,
- $N_{Ed}$  Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft,
- $W_{y,eff}$  wirksames Widerstandsmoment bezogen auf die  $y$ -Achse (siehe Kapitel 5.4.1),
- $W_{z,eff}$  wirksame Widerstandsmoment bezogen auf die  $z$ -Achse (siehe Kapitel 5.4.1).

Die Schnittgrößen  $M_{Ed}$  und  $N_{Ed}$  sollten gegebenenfalls globale Einflüsse nach Theorie II. Ordnung berücksichtigen. Für eine längs des Beulfeldes veränderliche Spannung sollte der Beulnachweis eines Blechfeldes mit den Schnittgrößen im Abstand von  $0,4a$  oder  $0,5b$ , der kleinere Wert ist maßgebend, von dem Beulfeldrand geführt werden, an dem sich die größten Spannungen befinden.

Für den Fall, dass  $\bar{\eta}_3$  (siehe Gleichung (6.36))  $0,5$  nicht überschreitet, braucht der Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft, Querkraft und Biegung bezüglich der Wirkung der Querkraft nicht reduziert werden. Wenn  $\bar{\eta}_3$  jedoch größer als  $0,5$  ist, sollten die Auswirkungen unter kombinierter Beanspruchung im Steg eines I-Profiles oder in den Stegen eines Kastenquerschnitts folgende Bedingung erfüllen:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{mit} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (6.34)$$

Dabei gilt:

$M_{f,Rd}$  Bemessungswert der plastischen Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts bestehend aus den wirksamen Flächen der Flansche,

$M_{pl,Rd}$  Bemessungswert der plastischen Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts bestehend aus den wirksamen Flächen der Flansche und dem vollständig wirksamen Steg unabhängig von der Querschnittsklasse.

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \quad (6.35)$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad (6.36)$$

Für  $M_{Ed}$  und  $V_{Ed}$  sollten gegebenenfalls Einflüsse nach Theorie II. Ordnung berücksichtigt werden.

Die Bedingung nach Gleichung (6.34) sollte an jeder Querschnittsstelle außer an denen, die weniger als  $h_w/2$  von einem Auflager mit Quersteifen entfernt sind, nachgewiesen werden.

Wirkt eine Normalkraft  $N_{Ed}$  sollte der Bemessungswert der plastischen Biegebeanspruchbarkeit  $M_{pl,Rd}$  durch einen reduzierten Wert  $M_{N,Rd}$  gemäß Kapitel 6.2.9 in EN 1993-1-1 ersetzt und der Bemessungswert der plastischen Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts bestehend aus den wirksamen Flächen der Flansche  $M_{f,Rd}$  sollte gemäß Gleichung (6.31) reduziert werden. Für den Fall, dass die Drucknormalkraft so groß ist, dass der Steg vollständig unter Druckbeanspruchung steht, sollte gemäß Kapitel 7.1 in EN 1993-1-5 verfahren werden.

#### 6.4.4 Stegblechversagen, Krüppeln oder Beulen

Unter der Voraussetzung, dass die Flansche seitlich gehalten sind, wird die Beanspruchbarkeit eines nicht ausgesteiften Steges gegenüber konzentrierten Lasten oder Auflagerkräften durch eine der folgenden drei Versagensarten bestimmt:

- plastisches Versagen des Stegbleches in der Nähe der Flansche zusätzlich begleitet durch plastische Verformungen der Flansche,
- Krüppeln des Stegbleches in Form von lokalem Beulen und plastischem Versagen des Steges in der Nähe der Flansche zusätzlich begleitet durch plastische Verformungen der Flansche,
- Beulen des Stegbleches über nahezu die gesamte Bauteilhöhe.

Bei kaltgefertigten Bauteilen können die Regeln für Baustahl gemäß EN 1993-1-3 auch für nichtrostenden Stahl angewendet werden.

Bei gewalzten und geschweißten Trägern sollte das nachfolgende Verfahren gemäß EN 1993-1-5 angewendet werden.

Bei nicht ausgesteiften aber auch bei ausgesteiften Stegen sollte der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit unter Plattenbeulen bei Querbelastrung wie folgt ermittelt werden:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad (6.37)$$

Dabei gilt:

$t_w$  Stegdicke,

$f_{yw}$  charakteristische Streckgrenze des Steges,

$L_{eff}$  wirksame Länge für die Beanspruchbarkeit bei Plattenbeulen mit Querbelastrung unter Berücksichtigung des Stegbeulens bestimmt mit  $L_{eff} = \chi_F l_y$ ,

mit:

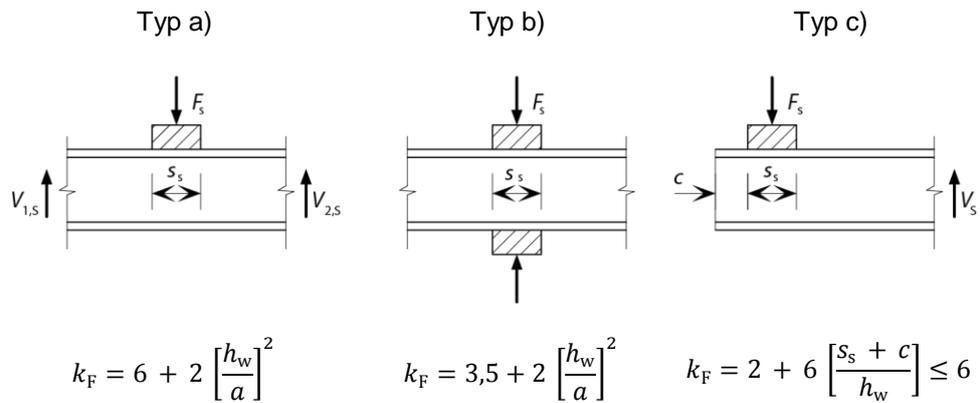
$l_y$  wirksame Lastausbreitungslänge ohne Berücksichtigung des Stegbeulens abhängig von der Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$ ,

$\chi_F$  Abminderungsbeiwert für örtliches Beulen infolge Stegbeulen.

Zusätzlich sollten die Auswirkungen der Querbelastrung auf die Biegebeanspruchbarkeit des Bauteils berücksichtigt werden.

Zur Berechnung von  $L_{eff}$  sollte zwischen den folgenden drei Arten der Lasteinleitung unterschieden werden:

- Lasten, die einseitig über einen Flansch eingeleitet werden und im Gleichgewicht mit den Querkräften im Steg stehen (Typ a) in Abbildung 6.4),
- Lasten, die beidseitig über beide Flansche eingeleitet werden und mit sich selbst im Gleichgewicht stehen (Typ b) in Abbildung 6.4),
- Lasten, die an einem nicht ausgesteiften Trägerende eingeleitet werden und im Gleichgewicht mit den Querkräften im Steg stehen (Typ c) in Abbildung 6.4).



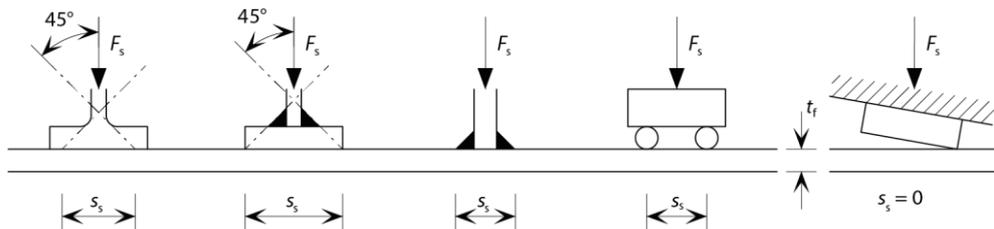
**Abbildung 6.4** Beulwerte für verschiedene Arten der Lasteinleitung

### Länge der starren Lasteinleitung

Die Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  auf einem Flansch ist die Länge, über die die Querbelastung wirksam verteilt wird. Sie kann durch die Ausbreitung der Querbelastung mit einer Steigung von 1:1 durch Stahl hindurch ermittelt werden, siehe Abbildung 6.5. Allerdings sollte die Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  nicht größer angenommen werden als die vorhandene Steghöhe  $h_w$ .

Liegen mehrere Einzellasten dicht beieinander, sollte die Beanspruchbarkeit gegen Plattenbeulen bei Querbelastung sowohl für jede Einzellast als auch für die gesamte Querbelastung ermittelt werden, wobei die Länge der starren Lasteinleitung  $s_s$  dabei der Abstand der äußeren Einzellasten ist.

Die Länge der starren Lasteinleitung sollte mit  $s_s = 0$  angesetzt werden, wenn das Bauteil, über das die Lasteinleitung stattfindet, nicht der Neigung des Trägers folgt, siehe Abbildung 6.5.



**Abbildung 6.5** Länge der starren Lasteinleitung

### Wirksame Lastausbreitungslänge

Die wirksame Lastausbreitungslänge  $l_y$  ohne Berücksichtigung des Stegbeulens sollte anhand der zwei dimensionslosen Parameter  $m_1$  und  $m_2$  wie folgt bestimmt werden:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (6.38)$$

$$m_2 = 0,02 \left( \frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad (6.39)$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (6.40)$$

Es gilt zu beachten, dass für die Berechnung des Parameters  $m_2$  ein Wert für die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_F$  angenommen werden muss. Nachdem die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_F$  bestimmt wurde, muss der Parameter  $m_2$  gegebenenfalls erneut berechnet werden.

Bei Typ a) und Typ b) gemäß Abbildung 6.4 sollte  $l_y$  wie folgt ermittelt werden:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \quad (6.41)$$

wobei jedoch  $l_y$  den Abstand zwischen benachbarten Quersteifen nicht überschreiten sollte.

Bei Typ c) gemäß Abbildung 6.4 sollte  $l_y$  als der kleinere der beiden Werte aus Gleichung (6.42) und Gleichung (6.43) verwendet werden:

$$l_y = l_e + t_f \left[ \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f}\right)^2 + m_2} \right] \quad (6.42)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (6.43)$$

wobei  $l_e$  wie folgt ermittelt wird:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (6.44)$$

### **Wirksame Länge für die Beanspruchbarkeit gegen Plattenbeulen mit Querbelastung**

Die wirksame Länge für die Beanspruchbarkeit gegen Plattenbeulen mit Querbelastung sollte wie folgt ermittelt werden:

$$L_{\text{eff}} = \chi_F l_y \quad (6.45)$$

mit

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1.0 \quad (6.46)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{\text{cr}}}} \quad (6.47)$$

$$F_{\text{cr}} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (6.48)$$

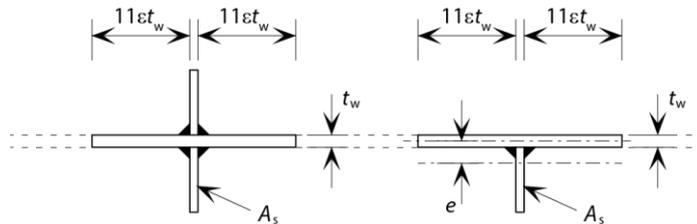
Dabei gilt:

$k_F$  Beulwert für unterschiedliche Arten der Lasteinleitung (siehe Abbildung 6.4).

### 6.4.5 Quersteifen

Quersteifen an Auflagern und an anderen Stellen, an denen maßgebende äußere Lasten einwirken, sollten vorzugsweise beidseitig und symmetrisch zur Stegachse angeordnet werden. Die Quersteifen sollten gegen plastisches Versagen sowie gegen Beulen nachgewiesen werden. Zwischenquersteifen, die nicht direkt an Stellen mit äußeren Lasten liegen, müssen nur gegen Beulen nachgewiesen werden.

Der wirksame Querschnitt für den Beulnachweis einer Quersteife sollte neben der Fläche der Quersteife selbst ebenfalls einen Anteil des Steges beinhalten, siehe Abbildung 6.6. An Bauteilenden (oder an Stegöffnungen) sollte dieses Maß den tatsächlich vorhandenen Abstand jedoch nicht überschreiten.



**Abbildung 6.6** Wirksamer Querschnitt von Quersteifen für den Beulnachweis

Die Beanspruchbarkeit einer Quersteife gegenüber Beulen  $N_{b,Rd}$  sollte nach Kapitel 6.3.3 mit einem Imperfektionsbeiwert von  $\alpha = 0,49$  und einer Grenزشlankheit von  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$  ermittelt werden. Die Beullänge  $l$  der Quersteife sollte den Randbedingungen entsprechen, allerdings nicht kleiner sein als  $0,75h_w$ , wobei beide Enden der Quersteife seitlich gehalten sein müssen. Bei weniger wirksamen Randbedingungen sollte eine größere Beullänge  $l$  gewählt werden. Die Beanspruchbarkeit des kreuzförmigen Ersatzquerschnitts gegen Drillknicken sollte ebenfalls überprüft werden.

Bei nur einseitig angeordneten oder unsymmetrischen Quersteifen sollte die sich ergebende Exzentrizität gemäß Kapitel 6.5.2 berücksichtigt werden.

An Auflagern oder an anderen Stellen, an denen maßgebende äußere Lasten einwirken, sollte die Beanspruchbarkeit einer Quersteife gegen Beulen die Auflagerreaktion bzw. die einwirkende Last überschreiten. An anderen Stellen sollte die Drucknormalkraft  $N_{Ed}$  in einer Quersteife wie folgt ermittelt werden:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (6.49)$$

Dabei gilt:

$V_{Ed}$  Bemessungswert der einwirkenden Querkraft im Bauteil.

Gleichung (6.49) sollte nur unter der Annahme verwendet werden, dass die betrachtete Quersteife entfernt wurde.

Das Flächenträgheitsmoment zweiten Grades einer Zwischenquersteife  $I_{st}$  sollte die folgende Bedingung erfüllen:

$$\text{für } \frac{a}{h_w} < \sqrt{2}: \quad I_{st} \geq \frac{1,5 h_w^3 t^3}{a^2} \quad (6.50)$$

$$\text{für } \frac{a}{h_w} \geq \sqrt{2}: \quad I_{st} \geq 0,75 h_w t^3 \quad (6.51)$$

### 6.4.6 Ermittlung von Verformungen

Verformungen sollten für die maßgebende Lastkombination im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt werden.

Die Verformungen von elastisch beanspruchten Trägern (d. h. solche ohne plastische Fließgelenke) können mit den üblichen Berechnungsmethoden bestimmt werden, sofern an Stelle des Elastizitätsmoduls der Sekantenmodul verwendet wird. Der Wert des Sekantenmoduls hängt von der Spannung im Träger ab und kann wie folgt bestimmt werden:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2} \quad (6.52)$$

Dabei gilt:

$E_{S1}$  Sekantenmodul bezogen auf die Spannung im Zugflansch,

$E_{S2}$  Sekantenmodul bezogen auf die Spannung im Druckflansch.

Die Werte der Sekantenmoduln  $E_{S1}$  und  $E_{S2}$  für den Bemessungswert der maßgebenden Gebrauchsspannung können wie folgt bestimmt werden:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{mit } i = 1 \text{ oder } 2 \quad (6.53)$$

Dabei gilt:

$\sigma_{i,Ed,ser}$  Bemessungswert der maßgebenden Gebrauchsspannung im Zug- bzw. Druckflansch,

$E$  Elastizitätsmodul mit  $E = 200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ,

$n$  Ramberg-Osgood-Koeffizient.

Der Ramberg-Osgood-Koeffizient  $n$  wird anhand der Spannung an der Proportionalitätsgrenze ermittelt und ist ein Indikator für den Grad der Nichtlinearität von Spannungs-Dehnungs-Kurven, d. h. ein kleinerer Wert bedeutet größere Nichtlinearität. Die Werte für den Ramberg-Osgood-Koeffizienten  $n$  sind abhängig von der nichtrostenden Stahlsorte, der Verarbeitung/Fertigung, dem Grad der Kaltverfestigung und der Belastungsrichtung (Zug oder Druck), wobei die Messwerte einer starken Streuung unterliegen können. Empfohlene Werte sind in Tabelle 6.4 angegeben.

**Tabelle 6.4** Werte für den Ramberg-Osgood-Koeffizienten  $n$  zur Ermittlung der Sekantenmoduln

Stahlsorte	Ramberg Osgood Koeffizient $n$
Ferrit	14
Austenit	7
Duplex	8

EN 1993-1-4 liefert zurzeit Werte für den Ramberg-Osgood-Koeffizienten  $n$ , die von der Stahlsorte und der Walzrichtung abhängen (siehe Tabelle 6.5). Es gilt zu beachten, dass die Werte für Duplex-Stähle auf sehr wenigen Daten basieren und daher mittlerweile als zu gering betrachtet werden. Es wird erwartet, dass die Werte aus Tabelle 6.5 in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 durch die Werte in Tabelle 6.4 ersetzt werden.

**Tabelle 6.5** Werte für den Ramberg Osgood Koeffizienten  $n$  zur Ermittlung der Sekantenmoduln

Stahlsorte	Werkstoffnummer	Koeffizient $n$	
		Längsrichtung	Querrichtung
Ferrit	1.4003	7	11
	1.4016	6	14
	1.4512	9	16
Austenit	1.4301, 1.4306, 1.4307, 1.4318, 1.4541	6	8
	1.4401, 1.4404, 1.4432, 1.4435, 1.4539, 1.4571,	7	9
Duplex	1.4462, 1.4362	5	5

Anmerkung: Wenn die Walzrichtung des Bauteils unbekannt oder nicht eindeutig zu bestimmen ist, können, auf der sicheren Seite liegend, die Werte für die Längsrichtung verwendet werden.

Das nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten von nichtrostendem Stahl führt dazu, dass der Elastizitätsmodul innerhalb eines Querschnitts bzw. entlang der Bauteillänge variieren kann. Daher sind komplexe nichtlineare Berechnungen notwendig, um die Verformungen von Trägern aus nichtrostendem Stahl exakt zu bestimmen. Vereinfachend kann die Abweichung des Elastizitätsmoduls  $E_S$  entlang der Bauteillänge vernachlässigt und der kleinste Wert von  $E_S$  im Bauteil (d. h. entsprechend der maximalen Spannungswerte  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  für das Bauteil) kann für die gesamte Länge angesetzt werden. Es gilt zu beachten, dass dieses Verfahren nur dann genaue Ergebnisse für eine Abschätzung der Verformungen liefert, wenn der Sekantenmodul anhand der maximalen Spannung im Bauteil berechnet wurde und wenn diese maximale Spannung einen Wert von 65 % der 0,2 %-Dehngrenze nicht überschreitet. Bei größeren Spannungen liefert dieses Verfahren sehr konservative Ergebnisse und es sollte ein genaueres Verfahren (z. B. eines, bei dem eine Integration entlang der Bauteillänge berücksichtigt wird) verwendet werden.

Bei Querschnitten der Klasse 4 und/oder Bauteilen mit Schubverzerrung sollte ein wirksamer Querschnitt in den Berechnungen verwendet werden. Für eine erste Annäherung ist es sinnvoll, den wirksamen Querschnitt anhand der wirksamen Breiten gemäß Kapitel 5.4.1 und/oder Kapitel 5.4.2 zu bestimmen. Für eine genauere Berechnung kann der wirksame Querschnitt anhand der wirksamen Breiten bei Beulen mit der tatsächlich vorhandenen Spannung im Bauteil ermittelt werden, wobei  $\varepsilon$  in Kapitel 5.4.1 (jedoch nicht in Kapitel 5.4.2) wie folgt verwendet werden sollte:

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{\sigma} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} \quad (6.54)$$

Dabei gilt:

- $\sigma$  tatsächlich vorhandene Spannung im Bauteil bezogen auf den wirksamen Querschnitt.

## 6.5 Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung

### 6.5.1 Zugnormalkraft und Biegung

Bauteile unter Zugbeanspruchung und gleichzeitiger Biegung sollten hinsichtlich der Beanspruchbarkeit für Biegedrillknicken nur unter alleiniger Biegebeanspruchung gemäß Kapitel 6.4.2 nachgewiesen werden. Ihre Beanspruchbarkeit sollte zusätzlich für die kombinierte Beanspruchung aus Normalkraft und Biegung an den Stellen mit maximalen Biegemomenten bzw. maximalen Normalkräften nachgewiesen werden. Die folgende Bedingung sollte dann erfüllt werden:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (6.55)$$

Dabei gilt:

- $N_{Ed}$  Bemessungswert der einwirkenden Zugnormalkraft an der maßgebenden Stelle des Bauteils,
- $N_{Rd}$  Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Bauteils unter Zugbeanspruchung,
- $M_{y,Ed}$  Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes um die starke Hauptachse an der maßgebenden Stelle des Bauteils,
- $M_{z,Ed}$  Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes um die schwache Hauptachse an der maßgebenden Stelle des Bauteils,
- $M_{y,Rd}$  Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Bauteils unter Biegebeanspruchung um die starke Hauptachse ohne Berücksichtigung einer Normalkraft, allerdings mit Berücksichtigung möglicher Abminderungen durch eine vorhandene Querkraft (siehe Kapitel 5.7.4),
- $M_{z,Rd}$  Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Bauteils unter Biegebeanspruchung um die schwache Hauptachse ohne Berücksichtigung einer Normalkraft, allerdings mit Berücksichtigung möglicher Abminderungen durch eine vorhandene Querkraft (siehe Kapitel 5.7.4).

### 6.5.2 Drucknormalkraft und Biegung

Zusätzlich zu den Anforderungen an die Querschnittsbemessung (siehe Kapitel 5.7.6) an jeder Stelle der Bauteillänge und zu den allgemeinen Anforderungen an Träger (siehe Kapitel 6.4) sollten die Einflüsse der Interaktion von Drucknormalkräften und Biegemomenten berücksichtigt werden.

#### **Drucknormalkraft und einachsige Biegung um die starke Hauptachse:**

Um ein vorzeitiges Knicken um die starke Hauptachse zu verhindern, sollte folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.56)$$

Um ein vorzeitiges Knicken bei biegedrillknickgefährdeten Bauteilen um die schwache Hauptsache zu verhindern, sollte folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \quad (6.57)$$

### **Drucknormalkraft und einachsige Biegung um die schwache Hauptachse:**

Um ein vorzeitiges Knicken um die schwache Hauptsache zu verhindern, sollte folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.58)$$

### **Drucknormalkraft und zweiachsige Biegung:**

Für jedes Bauteil sollte die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.59)$$

Bei biegedrillknickgefährdeten Bauteilen sollte zusätzlich folgende Bedingung eingehalten werden:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (6.60)$$

In den oben genannten Gleichungen gilt:

$e_{Ny}$ bzw. $e_{Nz}$	Exzentrizität der maßgebenden Schwereachse eines Querschnitts bei reiner Druckbeanspruchung,
$N_{Ed}$ , $M_{y,Ed}$ bzw. $M_{z,Ed}$	Bemessungswert der einwirkenden Drucknormalkraft bzw. des einwirkenden Biegemomentes um die $y$ - $y$ - bzw. um die $z$ - $z$ -Achse im Bauteil,
$(N_{b,Rd})_{\min}$	kleinster Wert für den Bemessungswert der Beanspruchbarkeit unter Druckbeanspruchung $N_{b,Rd}$ aus den folgenden vier Stabilitätsproblemen: Biegeknicken um die $y$ -Achse, Biegeknicken um die $z$ -Achse, Drillknicken oder Biegedrillknicken (siehe Kapitel 6.3.3 bzw. 6.3.4),
$(N_{b,Rd})_{\min1}$	kleinster Wert für den Bemessungswert der Beanspruchbarkeit unter Druckbeanspruchung $N_{b,Rd}$ aus den folgenden drei Stabilitätsproblemen: Biegeknicken um die $z$ -Achse, Drillknicken oder Biegedrillknicken (siehe Kapitel 6.3.3 bzw. 6.3.4),
$\beta_{W,y}$ bzw. $\beta_{W,z}$	Wert für $\beta_W$ bezogen auf die $y$ - bzw. $z$ -Achse mit: $\beta_W = 1$ bei Querschnitten der Klasse 1 oder 2, $= W_{el}/W_{pl}$ bei Querschnitten der Klasse 3, $= W_{eff}/W_{pl}$ bei Querschnitten der Klasse 4,
$W_{pl,y}$ bzw. $W_{pl,z}$	plastisches Widerstandsmoment bezogen auf die $y$ - bzw. $z$ -Achse,
$M_{b,Rd}$	Bemessungswert der Biegemomentenbeanspruchbarkeit bei Biegedrillknicken (siehe Kapitel 6.4.2).

Bei offenen Querschnitten können die Interaktionsbeiwerte  $k_y$ ,  $k_z$  und  $k_{LT}$  wie folgt ermittelt werden:

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{jedoch } 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (6.61)$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad \text{jedoch } 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad (6.62)$$

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

Bei Rund- (CHS) und Rechteckhohlprofilen (RHS) können die Interaktionsbeiwerte  $k_y$  und  $k_z$  wie folgt ermittelt werden:

$$k_y = 1 + D_1 (\bar{\lambda}_y - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad (6.63)$$

$$k_z = 1 + D_1 (\bar{\lambda}_z - D_2) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd,y})_{\min 1}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd,y})_{\min 1}} \quad (6.64)$$

Die Werte für  $D_1$ ,  $D_2$  und  $D_3$  sind in Tabelle 6.6 angegeben.

**Tabelle 6.6** Werte für  $D_1$ ,  $D_2$  und  $D_3$

Querschnittsform	Stahlsorte	$D_1$	$D_2$	$D_3$
Rechteckhohlprofile (RHS)	Ferrit	1,3	0,45	1,6
	Austenit	2,0	0,30	1,3
	Duplex	1,5	0,40	1,4
Rundhohlprofile (CHS)	Ferrit	1,9	0,35	1,3
	Austenit	2,5	0,30	1,3
	Duplex	2,0	0,38	1,3

In der aktuellen Version von EN 1993-1-4 sind nur Gleichung (6.61) und Gleichung (6.62) angegeben, die aber sehr konservative Ergebnisse für Hohlprofile liefern. Es ist zu erwarten, dass stattdessen Gleichung (6.63) bzw. Gleichung (6.64) in die nächste Überarbeitung von EN 1993-1-4 eingearbeitet werden.

Es gilt zu beachten, dass der Nationale Anhang andere Interaktionsgleichungen als die hier genannten angeben kann.

Bei Winkeln gilt zu beachten, dass die oben angegebenen Achsbezeichnungen  $y$  und  $z$  jeweils durch  $u$  und  $v$  zu ersetzen sind.

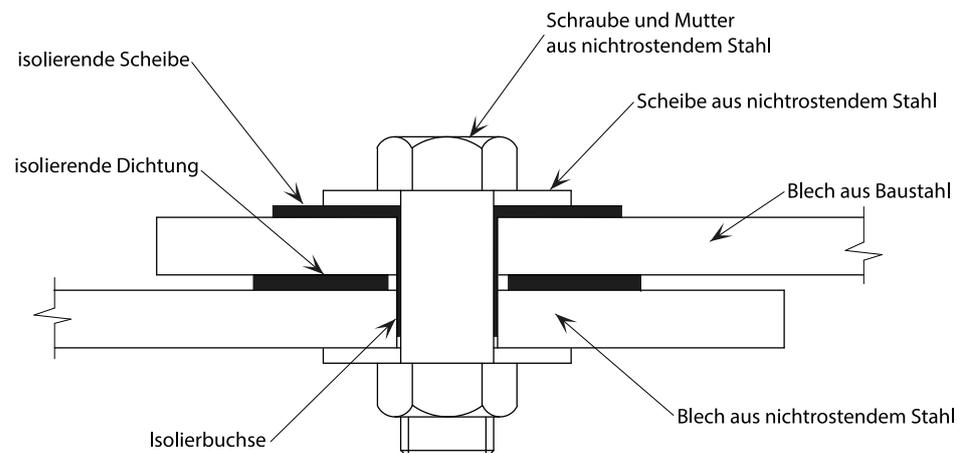
# 7 BEMESSUNG VON ANSCHLÜSSEN

## 7.1 Allgemeine Empfehlungen

### 7.1.1 Dauerhaftigkeit

Besonders bei der Konstruktion von Anschlüssen sollte mit Sorgfalt gehandelt werden, um eine bestmögliche Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten. Dies gilt vor allem bei Anschlüssen, die Feuchtigkeit ausgesetzt sind, z. B. durch äußere klimatische Bedingungen, durch Spritzwasser, durch Eintauchen oder durch Kondensation. Bei der Konstruktionsplanung können Korrosionsprobleme bereits im Vorfeld vermieden bzw. vermindert werden, indem Anschlüsse an Stellen ohne Kontakt mit Feuchtigkeit eingeplant werden. Alternativ kann eventuell auch die Ursache für die Feuchtigkeitsbildung verhindert werden; z. B. bei Kondensation, durch angemessene Belüftung oder durch die Sicherstellung, dass die Umgebungstemperatur innerhalb des Bauwerks stets über dem Taupunkt liegt.

Für den Fall, dass es nicht möglich ist, einen Anschluss, bei dem sowohl Baustahl als auch nichtrostender Stahl verwendet werden soll, vor Feuchtigkeit zu schützen, sollte zumindest Bimetallkorrosion verhindert werden, siehe Kapitel 3.2.3. Die Verwendung von Schrauben aus Baustahl in Verbindung mit Bauteilen aus nichtrostendem Stahl sollte generell vermieden werden. Bei geschraubten Anschlüssen, die ein inakzeptables Korrosionsrisiko aufweisen würden, sollte eine elektrische Isolierung zwischen den entsprechenden Bauteilen aus Baustahl und nichtrostendem Stahl vorgesehen werden. Dabei können isolierende Scheiben bzw. Isolierbuchsen zum Einsatz kommen; ein typisches, geeignetes Anschlussdetail für handfest angezogene geschraubte Verbindungen ist in Abbildung 7.1 dargestellt. Die isolierenden Scheiben und Isolierbuchsen sollten aus einem duroplastischen Polymer, wie z. B. Neopren (synthetischer Kautschuk), gefertigt sein, welches flexibel genug ist, um die Verbindung unter entsprechendem Druck abzudichten, und gleichzeitig haltbar genug ist, um den Kontakt der Metalle dauerhaft zu verhindern. Das Abdichten eines Anschlusses ist entscheidend, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern, wodurch Spaltkorrosion entstehen könnte. Um Spaltkorrosion vorzubeugen, besteht unter Umgebungsbedingungen mit Chloridbelastung eine weitere Möglichkeit darin, eine isolierende flexible Scheibe direkt unter den Schraubenkopf zu legen oder den entsprechenden Bereich mit einer durchsichtigen Silikondichtung abzudecken.



**Abbildung 7.1** *Typisches Anschlussdetail zweier unterschiedlicher Materialien zur Vermeidung von Bimetallkorrosion*

Bei geschweißten Anschlüssen, bei denen sowohl Baustahl als auch nichtrostender Stahl zum Einsatz kommt, wird grundsätzlich empfohlen, dass jede Beschichtung, die auf dem Baustahl angebracht wird, über die Schweißstelle hinaus und bis zu einer Länge von 75 mm auf den nichtrostenden Stahl übertragen werden sollte.

Geeignete Materialien für die entsprechenden Umgebungsbedingungen sollten mit Sorgfalt ausgewählt werden, um Spaltkorrosion in geschraubten Anschlüssen zu verhindern (siehe Kapitel 3.2.2).

### **7.1.2 Annahmen für die Bemessung**

Für die Bemessung von Anschlüssen sollten die Schnittgrößen möglichst wirklichkeitsgetreu abgebildet werden. Die Steifigkeitsverhältnisse der Bauteile in der Verbindung sollten dabei berücksichtigt werden und die Schnittgrößen müssen im Gleichgewicht mit den einwirkenden Kräften und Momenten stehen. Jedes so belastete Bauteil sollte den einwirkenden Lasten, die entsprechend der Berechnung angenommen werden, widerstehen können und die aufgebrachten Verformungen sollten innerhalb der Verformungsgrenzen des Bauteils liegen.

### **7.1.3 Schnittpunkte und Stöße**

Werden Bauteile miteinander verbunden, sollten diese grundsätzlich so positioniert werden, dass sich deren Schwereachsen an dem vorgegebenen Anschlusspunkt schneiden. Treten Exzentrizitäten an Anschlüssen auf, sollten die Bauteile und Verbindungen so bemessen werden, dass sie die entstehenden Momente aufnehmen können. Bei Anschlüssen mit Winkel- und T-Profilen, die mit mindestens zwei Schrauben angeschlossen werden, kann anstelle der Schwereachse das Wurzelmaß für die Anordnung der Schrauben angesetzt werden, um den Anschlusspunkt der Verbindung zu bestimmen.

Trägerstöße sollten vorzugsweise so nah wie möglich an Momentennullpunkten (kein Biegemoment) geplant werden. Bei Stützenstößen sollten Momente resultierend aus  $P$ - $\delta$ -Effekten (Steifigkeitsverringern durch Vertikalkräfte; Erdbebenbemessung) berücksichtigt werden.

### **7.1.4 Weitere allgemeine Aspekte**

Bei Anschlüssen, die durch Stoßbelastungen, Schwingungen oder häufige starke Lastwechsel beansprucht sind, werden geschweißte Verbindungen bevorzugt. Diese Anschlüsse sollte hinsichtlich der Auswirkungen von Ermüdungserscheinungen untersucht werden (siehe Kapitel 0).

Eine unkomplizierte Fertigung sowie Montage sollte grundsätzlich bei der Bemessung von Anschlüssen und Stößen berücksichtigt werden. Besondere Beachtung sollte dabei folgenden Aspekten gelten:

- Verwendung von standardisierten Anschlussdetails,
- genügend Freiraum für eine sichere Montage,
- genügend Platz, um Verbindungsmittel einzubauen (Anziehen von Schrauben),
- Zugänglichkeit an Schweißstellen,
- Anforderungen an die Schweißverfahren,
- Auswirkungen von Winkel- und Längentoleranzen bei der Montage.

Es sollte beachtet werden, dass bei der Verwendung von austenitischem nichtrostendem Stahl größere Verformungen beim Schweißen auftreten als bei Baustählen (siehe Kapitel 11.6.4). Besondere Beachtung sollte dabei den Anforderungen an eine nachträgliche Überprüfung bzw. Wartung gelten.

## 7.2 Geschraubte Verbindungen

### 7.2.1 Allgemeines

Die Empfehlungen in diesem Kapitel beziehen sich auf Anschlüsse mit Schrauben in Durchgangslöchern, die auf Abscheren, Zug oder durch eine Kombination aus Abscheren und Zug beansprucht werden. Die nachfolgenden Angaben gelten für Anschlüsse mit Schrauben der Festigkeitsklassen 50, 70 oder 80. Die Beanspruchbarkeit von Anschlüssen mit Schrauben der Festigkeitsklasse 100 sollte anhand von Versuchen bestätigt werden. Üblicherweise werden Unterlegscheiben sowohl unter dem Schraubenkopf als auch unter der Mutter vorgesehen. Hilfestellungen zur Auswahl geeigneter Materialien für Schrauben und Muttern werden in Kapitel 2.3 und Kapitel 11.7 gegeben.

Scherkräfte werden über Lochleibung zwischen den Schrauben und den miteinander verbundenen Bauteilen übertragen. Anschlüsse, in denen die Scherkräfte über den Reibungswiderstand übertragen werden, werden in diesen Bemessungshilfen nicht im Detail betrachtet, siehe Kapitel 7.2.2.

Die Beanspruchbarkeit eines Anschlusses ergibt sich aus dem kleinsten Wert entweder der Beanspruchbarkeit der miteinander verbundenen Bauteile (siehe Kapitel 7.2.3) oder der Verbindungsmittel (siehe Kapitel 7.2.4).

Um irreversible Verformungen in geschraubten Verbindungen zu begrenzen, sollten die Spannungen aus den charakteristischen Lastkombinationen in den Schrauben und an der Nettoquerschnittsfläche um das Schraubenloch die Streckgrenze nicht überschreiten.

### 7.2.2 Vorgespannte Schrauben

Historisch bedingt gibt es immer noch Bedenken bei dem Einsatz von vorgespannten geschraubten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl, u. a. auch aufgrund fehlender Erfahrungen zu den folgenden Aspekten:

- geeignete Vorspannverfahren, insbesondere um Fressen zu vermeiden,
- Auswirkungen der zeitabhängigen Spannungsrelaxationseigenschaften von nichtrostenden Stählen auf die Tragfähigkeit vorgespannter geschraubter Verbindungen,
- Haftreibungszahlen für Gleitflächen bei vorgespannten geschraubten gleitfesten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl.

Aktuelle Forschungen im Rahmen des vom „*Research Fund for Coal and Steel*“ (RFCS) geförderten europäischen Forschungsvorhabens SIROCO „*Execution and reliability of slip-resistant connections for steel structures using CS and SS*“ befassen sich mit der Tragfähigkeit von vorgespannten geschraubten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl und liefern wichtige Erkenntnisse, wodurch die bisherigen Bedenken wiederum in Frage gestellt werden. Das umfangreiche Versuchsprogramm an geschraubten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl zeigt bisher u. a. folgende Erkenntnisse:

- Schrauben aus austenitischen oder Duplex-Stählen können durchaus ausreichend vorgespannt werden, solange die richtige Schraubenfestigkeitsklasse, das richtige Anziehverfahren und ein geeignetes Schmiermittel verwendet wird,
- der Verlust der Vorspannkraft in vorgespannten geschraubten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl ist vergleichbar mit dem Vorspannkraftverlust in vorgespannten geschraubten Verbindungen aus Baustahl,

- die Haftreibungszahlen, die an gestrahlten Oberflächen von nichtrostenden Stählen gemessen wurden, sind durchgängig mindestens so groß wie die Haftreibungszahl für Klasse B (0,4).

Die abschließenden Empfehlungen aus dem europäischen Forschungsvorhaben SIROCO werden gegen Ende des Jahres 2018 im EU Bookshop unter dem Link <https://publications.europa.eu/en/web/general-publications/publications> verfügbar sein und es wird erwartet, dass die Ergebnisse in die nächsten Überarbeitungen von EN 1993-1-4 sowie EN 1090-2 einfließen werden. Bis dahin sollten weiterhin Versuche durchgeführt werden, um die Verwendbarkeit von vorgespannten geschraubten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl zu bestätigen.

### **7.2.3 Eigenschaften der zu verbindenden Bauteile**

#### **Löcher**

Löcher können gebohrt oder gestanzt werden. Allerdings kann die beim Stanzen auftretende Kaltverfestigung das Korrosionsrisiko erhöhen, weshalb gestanzte Löcher in aggressiven Umgebungen (z. B. Gebiete mit starkem Industrieaufkommen oder in maritimer Umgebung) weniger geeignet sind.

Das maximale Lochspiel bei standardisierten Löchern ist wie folgt festgelegt:

- 1 mm bei M12 und M14 Schrauben (M14 ist jedoch nicht standardisiert),
- 2 mm bei M16 bis zu M24 Schrauben und
- 3 mm bei M27 und größeren Schrauben.

#### **Anordnung von Löchern**

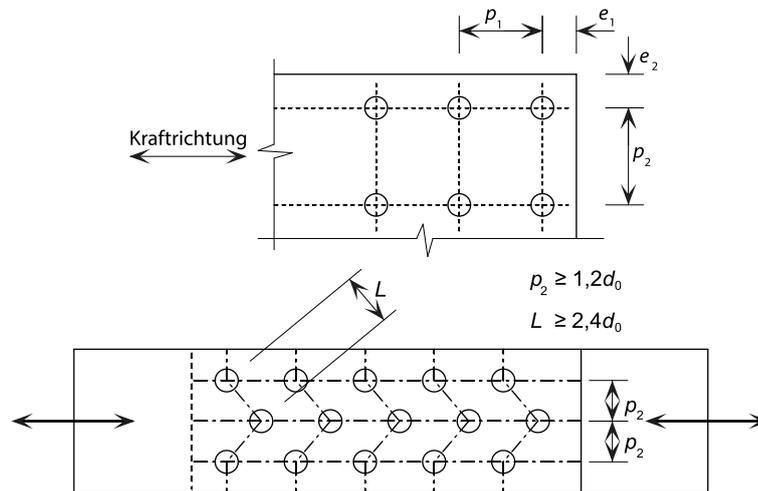
Der Randabstand quer zur Krafrichtung bzw. in Krafrichtung ist definiert als der Abstand von der Mitte eines Loches bis zum benachbarten Bauteilrand.

Als Mindestwert für die Randabstände in Krafrichtung  $e_1$  bzw. quer zur Krafrichtung  $e_2$ , siehe Abbildung 7.2, ist ein Wert von  $1,2d_0$  definiert, wobei  $d_0$  der Durchmesser eines Schraubenlochs ist. Es ist zu beachten, dass der Randabstand in Krafrichtung eventuell größer gewählt werden muss, damit eine ausreichende Beanspruchbarkeit auf Lochleibung erreicht werden kann.

Die Randabstände in Krafrichtung bzw. quer zur Krafrichtung sollten einen Maximalwert von  $4t + 40$  mm nicht überschreiten, wobei  $t$  die Dicke (in mm) des dünnsten äußeren Bleches ist.

Der Mindestwert für den Lochabstand in Krafrichtung  $p_1$  ist mit  $2,2d_0$  und der Mindestwert für den Lochabstand quer zur Krafrichtung  $p_2$  ist mit  $2,4d_0$  definiert (siehe Abbildung 7.2).

Beim maximalen Abstand in jeder Richtung zwischen den Schrauben sollte lokales Beulen der Bleche berücksichtigt werden, siehe EN 1993-1-8.



**Abbildung 7.2** Rand- und Lochabstände von Schraubenlöchern

Bei versetzt angeordneten Schraubenreihen kann ein minimaler Lochabstand von  $p_2 = 1,2d_0$  verwendet werden, wenn der Mindestabstand  $L$  in jeder Richtung zwischen zwei versetzt angeordneten Schrauben mindestens  $2,4d_0$  beträgt, siehe Abbildung 7.2.

### **Beanspruchbarkeit auf Lochleibung**

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Lochleibung von geschraubten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl sollte auf Basis entweder eines Festigkeits- oder eines Verformungskriteriums ermittelt werden. Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Lochleibung  $F_{b,Rd}$  für eine geschraubte Verbindung kann wie folgt ermittelt werden:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.1)$$

Dabei gilt:

- $\alpha_b$  Lochleibungsbeiwert in Kraftrichtung,
- $k_t$  Lochleibungsbeiwert quer zur Kraftrichtung,
- $d$  maßgebender Schraubendurchmesser,
- $t$  maßgebende Dicke der Bleche in der geschraubten Verbindung,
- $f_u$  charakteristische Zugfestigkeit der Bleche in der geschraubten Verbindung (siehe Tabelle 2.2).

Geschraubte Verbindungen werden abhängig von der Dicke der miteinander verbundenen Bleche in zwei Gruppen unterteilt. Sind die Blechdicken der miteinander verbundenen Bauteile größer als 4 mm spricht man von Verbindungen mit dicken Blechen und bei Blechdicken kleiner oder gleich 4 mm von Verbindungen mit dünnen Blechen.

### **Lochleibungsbeiwerte von Verbindungen mit dicken Blechen**

Bei Verbindungen mit dicken Blechen wird der Lochleibungsbeiwert in Kraftrichtung  $\alpha_b$  für den Fall, dass Verformungen kein maßgebendes Kriterium sind, anhand von Gleichung (7.2) ermittelt, während der Lochleibungskoeffizient quer zur Kraftrichtung  $k_t$  anhand von Gleichung (7.3) ermittelt wird.

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0; \quad \frac{e_1}{3d_0} \right\} \quad (7.2)$$

$$k_t = \begin{cases} 1,0 & \text{für } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{für } \left(\frac{e_2}{d_0}\right) \leq 1,5 \end{cases} \quad (7.3)$$

Bei Verbindungen mit dicken Blechen wird der Lochleibungsbeiwert in Krafrichtung  $\alpha_b$  für den Fall, dass Verformungen ein maßgebendes Kriterium sind, anhand von Gleichung (7.4) ermittelt, während der Lochleibungskoeffizient quer zur Krafrichtung mit  $k_t = 0,5$  anzusetzen ist.

$$\alpha_b = \min \left\{ 1,0; \quad \frac{e_1}{2d_0} \right\} \quad (7.4)$$

### *Lochleibungsbeiwerte von Verbindungen mit dünnen Blechen*

Bei Verbindungen mit dünnen Blechen werden die Lochleibungsbeiwerte in Krafrichtung  $\alpha_b$  bzw. quer zur Krafrichtung  $k_t$  für den Fall, dass Verformungen kein maßgebendes Kriterium sind, für das innere Blech einer zweischnittigen Verbindung mit Gleichung (7.2) bzw. Gleichung (7.3) für Verbindungen mit dicken Blechen ermittelt.

Bei Verbindungen mit dünnen Blechen wird der Lochleibungsbeiwert in Krafrichtung  $\alpha_b$  für den Fall, dass Verformungen kein maßgebendes Kriterium sind, für einschnittige Verbindungen und für die äußeren Bleche in zweischnittigen Verbindungen mit Gleichung (7.4) ermittelt, während der Lochleibungsbeiwert quer zur Krafrichtung mit  $k_t = 0,64$  anzusetzen ist.

Bei Verbindungen mit dünnen Blechen wird der Lochleibungsbeiwert in Krafrichtung  $\alpha_b$  für den Fall, dass Verformungen ein maßgebendes Kriterium sind, mit Gleichung (7.4) ermittelt, während der Lochleibungsbeiwert quer zur Krafrichtung mit  $k_t = 0,5$  anzusetzen ist.

Es wird erwartet, dass in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 die oben genannten Bemessungsregeln zur Ermittlung der Beanspruchbarkeit auf Lochleibung die aktuell enthaltenen konservativeren Regeln ersetzen, welche auf dem Verfahren für Baustahl gemäß EN 1993-1-8 basieren und bei denen ein reduzierter Wert für die Zugfestigkeit  $f_{u,\text{red}}$  anstelle von  $f_u$  verwendet wird:

$$f_{u,\text{red}} = 0,5f_y + 0,6f_u \quad (7.5)$$

Die Beanspruchbarkeit einer Schraubengruppe ist die Summe der Bemessungswerte der Beanspruchbarkeiten auf Lochleibung  $F_{b,Rd}$  der einzelnen Verbindungsmittel. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass bei jedem Verbindungsmittel der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Abscheren  $F_{v,Rd}$  mindestens so groß ist wie der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Lochleibung  $F_{b,Rd}$ . Andernfalls ist die Beanspruchbarkeit einer Schraubengruppe das Produkt aus dem kleinsten Bemessungswert einer Beanspruchbarkeit aus allen Verbindungsmitteln mit der Anzahl der Verbindungsmittel.

### **Beanspruchbarkeit auf Zug**

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Zug von Blechen in geschraubten Verbindungen sollte als der kleinere der beiden folgenden Werte ermittelt werden:

a) Bemessungswert der plastischen Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (7.6)$$

b) Bemessungswert der Grenzzugbeanspruchbarkeit der Nettoquerschnittsfläche eines Querschnitts mit Löchern für Verbindungsmittel

$$N_{u,Rd} = \frac{k A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.7)$$

Die entsprechenden Parameter sind in Kapitel 5.7.2 definiert.

Für den Fall, dass duktiles Verhalten erforderlich wird, sollte der Bemessungswert der plastischen Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts kleiner sein als der Bemessungswert der Grenzzugbeanspruchbarkeit der Nettofläche. Die Anforderungen an die Duktilität sowie an das Rotationsvermögen werden in EN 1993-1-8 und die Anforderungen an die Bemessung von Bauwerken gegen Erdbeben in EN 1998 festgelegt.

### **Blockversagen von Schraubengruppen**

Bei Blockversagen von Schraubengruppen sollten die Regeln in EN 1993-1-8 eingehalten werden.

### **Einseitig angeschlossene Winkel und andere unsymmetrisch angeschlossenen Bauteile unter Zugbelastung**

Die Exzentrizität von Verbindungsmitteln in Anschlüssen und die Auswirkungen der Loch- und Randabstände von Schrauben sollten bei der Ermittlung der Beanspruchbarkeit von unsymmetrischen Bauteilen sowie bei unsymmetrisch angeschlossenen symmetrischen Bauteilen berücksichtigt werden, z. B. bei einseitig angeschlossenen gleichschenkligen Winkeln.

Einseitig, mit einer Schraubenreihe angeschlossene Winkel sollten als zentrisch belastet betrachtet werden, und der Bemessungswert der Grenzzugbeanspruchbarkeit der Nettofläche des Querschnitts sollte wie folgt ermittelt werden:

$$\text{mit 1 Schraube:} \quad N_{u,Rd} = \frac{2,0 (e_2 - 0,5d_0) t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.8)$$

$$\text{mit 2 Schrauben:} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.9)$$

$$\text{mit 3 oder mehr Schrauben:} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.10)$$

Dabei gilt:

$\beta_2$  bzw.  $\beta_3$  Abminderungsbeiwert abhängig vom Lochabstand  $p_1$  gemäß Tabelle 7.1. Für Zwischenwerte von  $p_1$  dürfen die Werte von  $\beta_2$  bzw.  $\beta_3$  interpoliert werden.

$A_{net}$  Nettoquerschnittsfläche des Winkels. Bei ungleichschenkligen Winkeln, die mit dem kleineren Schenkel angeschlossen werden, sollte  $A_{net}$  dem Wert der Nettofläche für einen äquivalenten

gleichschenkligen Winkel mit der kleineren Schenkellänge entsprechen.

**Tabelle 7.1** Abminderungsbeiwerte  $\beta_2$  und  $\beta_3$

Art der Verbindung	Abminderungsbeiwert	Lochabstand $p_1$	
		$\leq 2,5d_0$	$\geq 5,0d_0$
mit 2 Schrauben	$\beta_2$	0,4	0,7
mit 3 oder mehr Schrauben	$\beta_3$	0,5	0,7

## 7.2.4 Verbindungsmittel

### Querschnittsfläche

Für die Beanspruchbarkeit von Schrauben auf Zug sollte als Querschnittsfläche der Spannungsquerschnitt der Schraube verwendet werden, welcher in der entsprechenden Produktnorm definiert ist.

Für die Beanspruchbarkeit von Schrauben auf Abscheren kann der größere Schaftquerschnitt verwendet werden, wenn sichergestellt ist, dass die Scherfuge nicht im Gewinde der Schraube liegt; dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass Schrauben grundsätzlich von jeder Seite eingebaut werden können. Kann die Lage der Scherfuge jedoch nicht eindeutig bestimmt werden, sollte der Spannungsquerschnitt der Schraube für die Bemessung verwendet werden.

### Beanspruchbarkeit auf Abscheren

Die Beanspruchbarkeit auf Abscheren einer geschraubten Verbindung hängt von der Anzahl der Scherfugen und deren Lage bezogen auf die Schraube ab. Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Abscheren jeder einzelnen Scherfuge, wobei die Schraube nicht gleichzeitig auf Zug beansprucht werden darf, kann wie folgt ermittelt werden:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (7.11)$$

Dabei gilt:

$A$  Bruttoquerschnittsfläche der Schraube (bei Scherfugen im Schaft der Schraube); bzw. die Fläche des Spannungsquerschnitts der Schraube (bei Scherfugen im Gewinde der Schraube),

$f_{ub}$  Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffs (siehe Tabelle 2.6).

Der Nationale Anhang zu EN 1993-1-4 kann einen anderen Wert für  $\alpha$  festlegen. Der empfohlene Wert liegt bei 0,6 und gilt sowohl für den Fall, dass die Scherfuge im Schaft liegt, als auch für den Fall, dass die Scherfuge im Gewinde der Schraube liegt.

Zurzeit existiert ein Fehler in EN 1993-1-4 bezüglich des empfohlenen Wertes von  $\alpha$  für den Fall, dass die Scherfuge im Gewinde der Schraube liegt. Der angegebene Wert lautet  $\alpha = 0,5$ , allerdings wird erwartet, dass dieser Wert in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 auf  $\alpha = 0,6$  erhöht wird.

### **Beanspruchbarkeit auf Zug**

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit einer Schraube auf Zug  $F_{t,Rd}$  wird wie folgt ermittelt:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (7.12)$$

Dabei gilt:

$k_2 = 0,63$  für Senkschrauben und  $k_2 = 0,9$  für alle anderen Schraubenarten.

Werden Schrauben auf Zug beansprucht, sollten gegebenenfalls zusätzliche Abstützkräfte berücksichtigt werden. Hilfestellungen zur Ermittlung von Abstützkräften können EN 1993-1-8 entnommen werden.

### **Beanspruchbarkeit auf Zug und Abscheren**

Für den Fall, dass eine Schraube gleichzeitig auf Abscheren  $F_{v,Ed}$  und auf Zug  $F_{t,Ed}$  (einschließlich Abstützkräften) beansprucht wird, sollten die Einflüsse aus der Interaktion berücksichtigt werden. Diese sollten mit der folgenden Interaktionsbedingung überprüft werden:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.13)$$

Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass der Bemessungswert der Zugkraft  $F_{t,Ed}$  (einschließlich Abstützkräften) geringer ist als der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Zug  $F_{t,Rd}$ .

### **Lange Anschlüsse und große Klemmlängen**

Bei Stößen mit unüblichen Längen (d. h. größer als 500 mm bzw. als der 15-fache Schraubendurchmesser) oder wenn die Klemmlänge (d. h. die Gesamtdicke der miteinander verbundenen Bleche) größer ist als der fünffache Schraubendurchmesser, sollte der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Abscheren abgemindert werden. Ohne geeignete Daten über den Einsatz von nichtrostenden Stählen wird in solchen Fällen empfohlen die Regelungen für Baustahl gemäß EN 1993-1-8 zu befolgen.

## **7.3 Mechanische Verbindungsmittel für dünnwandige Bauteile**

Die Bemessung von Anschlüssen in dünnwandigen Bauteilen aus nichtrostendem Stahl mit Hilfe von gewindeformenden Schrauben kann gemäß EN 1993-1-3 ausgeführt werden, allerdings sollte die Grenzzugkraft für Ausreißen anhand von Versuchen ermittelt werden. Um ein Kaltverschweißen der Schraube oder ein Abstreifen des Gewindes zu vermeiden, sollte, solange noch keine ausreichenden Erfahrungen vorhanden sind, anhand von Versuchen nachgewiesen werden, dass die Schrauben ein Gewinde in nichtrostenden Stahl bohren bzw. formen können.

## 7.4 Geschweißte Verbindungen

### 7.4.1 Allgemeines

Der Wechsel zwischen Erhitzen und Abkühlen beim Schweißvorgang beeinflusst das Materialgefüge aller nichtrostenden Stahlsorten was besonders bei Duplex-Stählen von Bedeutung ist. Daher ist es wichtig, geeignete Schweißverfahren sowie passende Schweißzusätze zu verwenden und qualifizierte Schweißer einzusetzen, siehe Kapitel 11.6. Diese Aspekte sind nicht nur wichtig, um die Beanspruchbarkeit der Schweißnaht sicherzustellen und ein definiertes Schweißprofil zu erreichen, sondern auch um die Korrosionsbeständigkeit der Schweißnaht und des umgebenden Materials zu gewährleisten.

Die folgenden Empfehlungen gelten für vollständig sowie teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte und für Kehlnähte, die mit einem der folgenden Lichtbogenschweißverfahren hergestellt wurden:

Ordnungsnummer	Schweißprozess
111	Lichtbogenhandschweißen (mit abgedeckter Elektrode)
121	Unterpulverschweißen mit Drahtelektrode
122	Unterpulverschweißen mit Bandelektrode
131	Metall-Inertgasschweißen (MIG-Schweißen)
135	Metall-Aktivgasschweißen (MAG-Schweißen)
137	Metall-Inertgasschweißen mit Fülldrahtelektrode
141	Wolfram-Inertgasschweißen (WIG-Schweißen)
15	Plasmaschweißen

(Die Ordnungsnummern und Schweißprozesse entsprechen EN ISO 4063.)

Es sind passende Schweißzusätze zu verwenden, sodass die Streckgrenze, die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung sowie der minimale Wert der Kerbschlagarbeit einer Charpy V-Probe des Schweißzusatzwerkstoffes mindestens so groß oder sogar größer als der entsprechende Wert des Grundwerkstoffes ist. Allerdings darf bei austenitischen nichtrostenden Stählen im kaltverfestigten Zustand der Schweißzusatzwerkstoff einen geringeren Festigkeitswert aufweisen als der Grundwerkstoff (siehe Kapitel 7.4.4). In Tabelle 7.2 sind geeignete Schweißzusätze für verschiedene Stahlsorten angegeben.

Um Baustahl mit nichtrostendem Stahl zu verschweißen, muss der Schweißzusatzwerkstoff „überlegiert“ sein, damit ausreichende mechanische Eigenschaften und die Korrosionsbeständigkeit der Verbindung gewährleistet werden können. Durch das „Überlegieren“ wird eine Abschwächung der miteinander verschweißten Bauteile in der Schmelzzone des nichtrostenden Grundwerkstoffes verhindert. Soll nichtrostender Stahl mit verzinktem Stahl verschweißt werden, muss die Zinkbeschichtung um den zu verschweißenden Bereich vorher entfernt werden. Durch die Einlagerung von Zink kann es zu einer Versprödung oder zu einer Verminderung der Korrosionsbeständigkeit der Schweißnaht kommen. Außerdem stellen die Dämpfe, die bei dem Versuch entstehen, durch die verzinkte Schicht zu schweißen, ein erhebliches Gesundheitsrisiko dar. Wurde die Zinkschicht jedoch entfernt, gelten die gleichen Anforderungen wie bei geschweißten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl und unverzinktem Baustahl.

**Tabelle 7.2 Beispiele für geeignete Stahlsorten und Schweißzusätze**

Grundwerkstoff		Schweißzusätze	
Stahlsorte	Werkstoffnummer	EN ISO 3581 Schweißzusätze - Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen - Einteilung	EN ISO 14343 Schweißzusätze - Drahtelektroden, Bandeletroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen von korrosionsbeständigen und hitzebeständigen Stählen - Einteilung
Austenit	1.4301, 1.4307, 1.4318	19 9 L	
	1.4541	19 9 L oder 19 9 Nb	
	1.4401, 1.4404	19 12 3 L	
	1.4571	19 12 3 L oder 19 12 3 Nb	
Duplex	1.4482, 1.4162, 1.4362, 1.4062	23 7 N L oder 22 9 3 N L	
	1.4062 (2202)	23 7 N L oder 22 9 3 N L	
	1.4662, 1.4462	22 9 3 N L	
Ferrit	1.4003	13 oder 19 9 L	
	1.4016	19 9 L oder 23 12 L	
	1.4509	19 9 Nb oder 18 8 Mn	
	1.4521	19 12 3 L oder 23 12 2L	
Bei den Schweißzusätzen für Austenite liegen die Mindestwerte für die 0,2 %-Dehngrenze bei ca. 320-350 N/mm <sup>2</sup> und für die Zugfestigkeit bei ca. 510-550 N/mm <sup>2</sup> . Bei den Schweißzusätzen für Duplex-Stähle liegt der Mindestwerte für die 0,2 %-Dehngrenze bei ca. 450 N/mm <sup>2</sup> und für die Zugfestigkeit bei ca. 550 N/mm <sup>2</sup> .			

Stahlhersteller sowie Produzenten von Schweißzusätzen können bei der Auswahl geeigneter Werkstoffe hilfreiche Informationen geben. Der Schweißzusatzwerkstoff sollte allerdings mindestens so edel sein wie der Grundwerkstoff.

Unterbrochen geschweißte Kehlnähte und unterbrochene teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte sollten grundsätzlich in allen Umgebungen, bis auf die am wenigsten aggressiven, vermieden werden, um das Korrosionsrisiko zu minimieren. Außerdem sollten unterbrochen geschweißte Stumpfnähte in maritimen Umgebungen und in sehr stark verschmutzten Küstengebieten nur mit Vorsicht verwendet werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn Wasserfluss durch Oberflächenspannung hervorgerufen wird.

## 7.4.2 Kehlnähte

### Anwendungsbereich

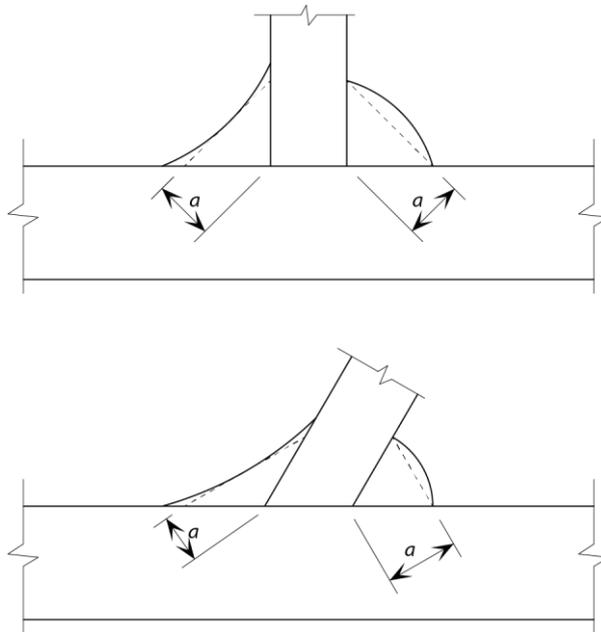
Kehlnähte können verwendet werden, um Bauteile mit einem Öffnungswinkel von 60° bis 120° Neigung zwischen den Flanken miteinander zu verschweißen. Bei Öffnungswinkeln unter 60° Neigung können Kehlnähte ebenfalls verwendet werden, wenn sie bei der Bemessung als teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte betrachtet werden. Bei Öffnungswinkeln über 120° Neigung sollten Kehlnähte nicht für eine Kraftübertragung angesetzt werden.

Kehlnähte sollten nicht verwendet werden, wenn ein Biegemoment über die Längsachse der Schweißnaht auftritt, wodurch Zug in der Schweißnahtwurzel entstehen würde.

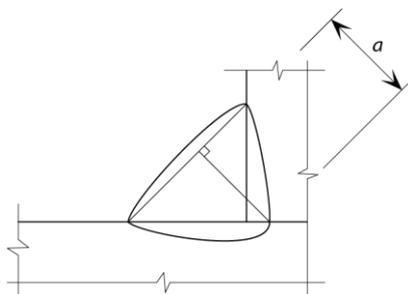
### **Wirksame Schweißnahtlänge und Nahtdicke**

Die wirksame Länge einer Kehlnaht ist die gesamte Länge mit voller Nahtdicke. Allerdings sollten Schweißnähte mit einer wirksamen Länge von weniger als 30 mm bzw. weniger als die sechsfache Nahtdicke nicht für eine Kraftübertragung bemessen werden.

Die wirksame Nahtdicke  $a$  einer Kehlnaht ist die Höhe senkrecht zur Außenseite des größten Dreiecks (gleichschenkelig oder ungleichschenkelig) gemessen, welches zwischen den Flanken und der Schweißnahtoberfläche entsteht, siehe Abbildung 7.3. Bei Kehlnähten mit tiefem Einbrand, siehe Abbildung 7.4, darf die zusätzliche Nahtdicke bei der Beanspruchbarkeit der Schweißnaht berücksichtigt werden, wenn entsprechende Versuche bestätigen, dass die erforderliche Nahtdicke (einschließlich Einbrand) durchgängig erreicht werden kann.



**Abbildung 7.3** Kehlnahtdicke



**Abbildung 7.4** Kehlnahtdicke mit tiefem Einbrand

### **Bemessungswerte der einwirkenden Spannungen und der Scherfestigkeit**

Der Bemessungswert der einwirkenden Spannung ist die Summe der Spannungsvektoren aus allen Kräften und Momenten, die in der Schweißnaht übertragen werden. Er wird anhand der wirksamen Schweißnahtlänge sowie der Nahtdicke ermittelt.

Die Tragfähigkeit einer Kehlnaht ist ausreichend, wenn die folgenden beiden Bedingungen erfüllt sind:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (7.14)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7.15)$$

Dabei gilt:

- $\sigma_{\perp}$  Normalspannung senkrecht zur Schweißnahtachse,
- $\tau_{\perp}$  Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) senkrecht zur Schweißnahtachse,
- $\tau_{\parallel}$  Schubspannung (in der Ebene der Kehlnahtfläche) parallel zur Schweißnahtachse,
- $f_u$  Zugfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile,
- $\beta_w$  Korrelationsbeiwert mit 1,0 für alle nichtrostenden Stahlsorten solange sich kein kleinerer Wert aus Versuchen ergibt.

Alternativ kann das vereinfachte Verfahren gemäß 4.5.3.3 in EN 1993-1-8 verwendet werden, um den Bemessungswert der Tragfähigkeit einer Kehlnaht zu ermitteln.

### 7.4.3 Stumpfnähte

#### ***Vollständig durchgeschweißte Stumpfnähte***

Die Tragfähigkeit einer vollständig durchgeschweißten Stumpfnahnt kann mit der Tragfähigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile gleichgesetzt werden, vorausgesetzt, dass die Schweißnaht die Anforderungen gemäß Kapitel 7.4.1 erfüllt.

#### ***Teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte***

Teilweise durchgeschweißte Stumpfnähte können zur Übertragung von Scherkräften verwendet werden, allerdings werden sie für Situationen, in denen sie möglicherweise auf Zug beansprucht werden, nicht empfohlen.

Die Tragfähigkeit einer teilweise durchgeschweißten Stumpfnahnt kann wie für eine Kehlnaht mit tiefem Einbrand bestimmt werden. Die Nahtdicke einer teilweise durchgeschweißten Stumpfnahnt ist dann die Tiefe des Einbrandes, welche anhand von Verfahrensprüfungen ermittelt wurde und durchgehend erreicht werden muss. Ohne die Möglichkeit von Verfahrensprüfungen kann die Nahtdicke mit der Tiefe der Vorbereitungsnaht abzüglich 3 mm angesetzt werden.

### 7.4.4 Schweißen von kaltverfestigtem, nichtrostendem Stahl

Grundsätzlich gelten die gleichen Anforderungen beim Schweißen von kaltverfestigtem nichtrostendem Stahl wie beim Schweißen von unverfestigtem nichtrostendem Stahl. Allerdings sollte für die Tragfähigkeit des Grundwerkstoffes in den Wärmeinflusszonen von Stumpfnähten die Zugfestigkeit des unverfestigten Grundwerkstoffes angesetzt werden.

Weist der Schweißzusatzwerkstoff eine geringere Festigkeit auf als der Grundwerkstoff, sollte die Tragfähigkeit von Kehl- bzw. Stumpfnähten anhand der

Zugfestigkeit des Schweißzusatzwerkstoffes mit einem Korrelationsbeiwert von  $\beta_w = 1,0$  ermittelt werden (siehe Tabelle 7.2).

Beim Schweißen von kaltverfestigten nichtrostenden Stählen sollten generell austenitische Schweißzusatzwerkstoffe verwendet werden. Ebenso können aber auch Schweißzusatzwerkstoffe aus Duplex-Stahl verwendet werden, wenn die mechanischen Eigenschaften der Verbindung anhand von Versuchen sichergestellt werden können.

Bei geschweißten Verbindungen mit kaltverfestigtem Material kann es vorkommen, dass die Wärmeeinflusszonen nicht vollständig erweichen. Dadurch kann die tatsächliche Tragfähigkeit der Verbindung jedoch größer sein als bei einem vollständigen Erweichen der Wärmeeinflusszonen. Unter diesen Umständen können eventuell höhere Festigkeitswerte anhand von Versuchen erzielt werden können.

# 8 BEMESSUNG IM BRANDFALL

## 8.1 Allgemeines

Dieses Kapitel befasst sich mit der Bemessung von Bauwerken aus nichtrostendem Stahl, die aus allgemeinen brandschutztechnischen Gründen bestimmte Anforderungen erfüllen müssen, wenn sie Feuer ausgesetzt sind, um ein vorzeitiges Versagen des Bauwerks (Tragwerks) zu vermeiden. Die folgenden Empfehlungen beziehen sich nur auf passive Brandschutzmaßnahmen und sind ausschließlich für die nichtrostenden Stahlsorten und die daraus entstehenden Bauwerke geeignet, die gemäß den Regeln in den Kapiteln 4 bis 7 dieser Bemessungshilfen verwendet werden.

Austenitische nichtrostende Stähle weisen auch noch bei Temperaturen von über ca. 550°C einen höheren Anteil der Festigkeit bei Raumtemperatur auf als Baustähle. Generell behalten alle nichtrostenden Stahlsorten unabhängig von der Temperatur einen größeren Anteil ihrer Steifigkeit als Baustähle.

In EN 1993-1-2 werden die thermischen und mechanischen Einwirkungen für die Temperaturberechnung zur Bemessung von Bauwerken im Brandfall angegeben. Der Brandfall wird im Eurocode als außergewöhnliche Bemessungssituation behandelt. EN 1990 definiert die Kombinationen der Einwirkungen für die außergewöhnliche Bemessungssituation und empfiehlt für die Einwirkungen Teilsicherheitsbeiwerte von 1,0. EN 1993-1-2 empfiehlt einen Teilsicherheitsbeiwert für den Brandfall  $\gamma_{M,fi}$  von 1,0. Der Nationale Anhang zu EN 1993-1-2 kann andere Werte für den Teilsicherheitsbeiwert für den Werkstoff im Brandfall festlegen.

Die Anforderungen an die Tragfähigkeit von Bauwerken aus nichtrostendem Stahl für eine außergewöhnliche Bemessungssituation im Brandfall unterscheiden sich nicht von den Anforderungen für dieselbe Bemessungssituation bei Bauwerken aus Baustahl:

- Für den Fall, dass eine strukturelle Tragfähigkeit auch noch im Brandfall erforderlich ist, sollten Bauwerke so bemessen und konstruiert werden, dass dies während der entsprechenden Brandeinwirkung gewährleistet werden kann.
- Wenn Brandschutzmaßnahmen oder die Bemessung von trennenden Bauteilen eine Betrachtung der Verformungen des Tragwerks erforderlich machen, sollten diese ebenfalls berücksichtigt werden. Allerdings müssen Verformungen des Tragwerks im Brandfall nicht berücksichtigt werden, wenn die Berechnung der Tragfähigkeit für den Brandfall der entsprechenden trennenden Bauteile auf einer standardisierten Brandkurve basiert.

## 8.2 Mechanische Werkstoffeigenschaften bei erhöhten Temperaturen

EN 1993-1-2:2005 definiert für verschiedene nichtrostende Stahlsorten acht Sätze von Abminderungsfaktoren verglichen mit nur einem Satz für Baustahl. Allerdings sind bei nichtrostenden Stählen mehrere Sätze sinnvoll, da die Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen zwischen verschiedenen Stahlsorten aufgrund der chemischen Zusammensetzungen deutlich voneinander abweichen können. Es wird erwartet, dass die nichtrostenden Stähle mit ähnlichen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-2 in Gruppen zusammengefasst werden und Abminderungsfaktoren für diese Gruppen eingeführt werden, die die Faktoren für die einzelnen Stahlsorten ersetzen. Diese gruppenspezifischen Abminderungsfaktoren werden in diesem Kapitel betrachtet.

Abminderungsfaktoren für Festigkeiten und Steifigkeiten basierend auf dem Spannungs-Dehnungs-Verhalten von sieben Gruppen nichtrostender Stähle unter erhöhten Temperaturen sind in Relation zu den entsprechenden Werten bei 20°C in Tabelle 8.1 angegeben. Diese Abminderungsfaktoren sind wie folgt definiert:

$k_{p0,2,\theta}$  Abminderungsfaktor der 0,2 %-Dehngrenze bei einer Temperatur  $\theta$  bezogen auf die Bemessungsfestigkeit bei 20°C mit

$$k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta} / f_y \quad (8.1)$$

$k_{2,\theta}$  Abminderungsfaktor der Festigkeit bei 2 % der gesamten Dehnung bei einer Temperatur  $\theta$  bezogen auf die Bemessungsfestigkeit bei 20°C mit

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta} / f_y \quad \text{aber } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta} \quad (8.2)$$

$k_{u,\theta}$  Abminderungsfaktor der Zugfestigkeit bei einer Temperatur  $\theta$  bezogen auf die Zugfestigkeit bei 20°C mit

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta} / f_u \quad (8.3)$$

$k_{E,\theta}$  Abminderungsfaktor der Steigung im linear-elastischen Bereich bei einer Temperatur  $\theta$  bezogen auf die Steigung bei 20°C mit

$$k_{E,\theta} = E_\theta / E \quad (8.4)$$

$k_{\varepsilon u,\theta}$  Abminderungsfaktor der Maximaldehnung zugehörig zur Zugfestigkeit bei einer Temperatur  $\theta$  bezogen auf die Maximaldehnung zugehörig zur Zugfestigkeit bei 20°C mit

$$k_{\varepsilon u,\theta} = \varepsilon_{u,\theta} / \varepsilon_u \quad (8.5)$$

Dabei gilt:

$E$  Elastizitätsmodul bei 20°C ( $E = 200 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ ),

$f_y$  charakteristische Streckgrenze bei 20°C, siehe Kapitel 2.3,

$f_u$  charakteristische Zugfestigkeit bei 20°C, siehe Kapitel 2.3.

Bei kaltverfestigten Werkstoffen oder wenn erhöhte Festigkeitswerte, die durch eine Kaltumformung bei der Fertigung entstanden sind, berücksichtigt werden, sollten die folgenden Abminderungsfaktoren verwendet werden:

$$k_{p0,2,\theta,CF} = k_{p0,2,\theta} \quad 200 \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$$

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8 k_{p0,2,\theta} \quad \theta \geq 800^\circ\text{C}$$

$$k_{2,\theta,CF} = k_{2,\theta} \quad 200 \leq \theta \leq 700^\circ\text{C}$$

$$k_{2,\theta,CF} = 0,9 k_{2,\theta} \quad \theta \geq 800^\circ\text{C}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} \quad \text{bei allen Temperaturen}$$

Hierbei gibt der Index CF ein kaltverfestigtes Material bzw. ein Material nach einer Kaltumformung an.

Es gilt zu beachten, dass bei den einfachen Berechnungsverfahren zur Tragwerksbemessung für den Brandfall, siehe Kapitel 8.3, die folgenden charakteristischen Materialfestigkeiten verwendet werden:

bei Stützen  $f_{p0,2,\theta}$  (für Querschnitte jeder Klasse)

bei eingespannten Trägern  $f_{2,\theta}$  (für Querschnitte der Klassen 1 bis 3)

$f_{p0,2,\theta}$  (für Querschnitte der Klasse 4)

bei frei gelagerten Trägern  $f_{p0,2,\theta}$  (für Querschnitte jeder Klasse)

bei Zuggliedern  $f_{2,\theta}$  (für Querschnitte jeder Klasse)

**Tabelle 8.1** Abminderungsfaktoren für Festigkeiten, Steifigkeiten und Dehnungen bei erhöhten Temperaturen

Temperatur $\theta$ (°C)	$k_{p0,2,\theta}$	$k_{2,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{\epsilon u,\theta}$
<b>Austenitische Sorten, Gruppe I</b> <b>1.4301, 1.4307, 1.4318</b>					
20	1,00	1,31	1,00	1,00	1,00
100	0,78	1,02	0,81	0,96	0,56
200	0,65	0,88	0,72	0,92	0,42
300	0,60	0,82	0,68	0,88	0,42
400	0,55	0,78	0,66	0,84	0,42
500	0,50	0,73	0,61	0,80	0,42
600	0,46	0,68	0,54	0,76	0,33
700	0,38	0,54	0,40	0,71	0,24
800	0,25	0,35	0,25	0,63	0,15
900	0,15	0,18	0,13	0,45	0,15
1000	0,07	0,08	0,08	0,20	0,20
1100	0,05	0,06	0,05	0,10	-
<b>Austenitische Sorten, Gruppe II</b> <b>1.4401, 1.4404, 1.4541</b>					
20	1,00	1,19	1,00	1,00	1,00
100	0,86	1,13	0,87	0,96	0,56
200	0,72	0,98	0,80	0,92	0,42
300	0,67	0,92	0,78	0,88	0,42
400	0,62	0,85	0,77	0,84	0,42
500	0,60	0,82	0,74	0,80	0,42
600	0,56	0,75	0,67	0,76	0,33
700	0,50	0,68	0,51	0,71	0,24
800	0,41	0,50	0,34	0,63	0,15
900	0,22	0,26	0,19	0,45	0,15
1000	0,14	-	0,10	0,20	0,20
1100	0,07	-	0,07	0,10	-
<b>Austenitische Sorten, Gruppe III</b> <b>1.4571</b>					
20	1,00	1,31	1,00	1,00	1,00
100	0,89	1,16	0,88	0,96	0,56
200	0,82	1,07	0,81	0,92	0,42
300	0,77	1,01	0,79	0,88	0,42
400	0,72	0,95	0,79	0,84	0,42
500	0,69	0,91	0,77	0,80	0,42
600	0,65	0,85	0,71	0,76	0,33
700	0,59	0,76	0,57	0,71	0,24
800	0,51	0,63	0,38	0,63	0,15
900	0,29	0,38	0,23	0,45	0,15
1000	0,15	0,18	0,10	0,20	0,20
<b>Duplex-Sorten, Gruppe I</b> <b>1.4362, 1.4062, 1.4482</b>					
20	1,00	1,15	1,00	1,00	1,00
100	0,83	0,94	0,94	0,96	1,00
200	0,75	0,82	0,87	0,92	1,00
300	0,69	0,77	0,79	0,88	1,00
400	0,58	0,70	0,70	0,84	1,00
500	0,43	0,59	0,59	0,80	1,00
600	0,27	0,45	0,47	0,76	1,00
700	0,14	0,28	0,33	0,71	0,80
800	0,07	0,14	0,20	0,63	0,60
900	0,04	0,05	0,09	0,45	0,40

**Tabelle 8.1 (Fortsetzung) Abminderungsfaktoren für Festigkeiten, Steifigkeiten und Dehnungen bei erhöhten Temperaturen**

Temperatur $\theta$ (°C)	$k_{p0,2,\theta}$	$k_{2,\theta}$	$k_{u,\theta}$	$k_{E,\theta}$	$k_{\epsilon u,\theta}$
<b>Duplex-Sorten, Gruppe II</b> <b>1.4462, 1.4162, 1.4662</b>					
20	1,00	1,12	1,00	1,00	1,00
100	0,82	0,96	0,96	0,96	0,87
200	0,70	0,86	0,91	0,92	0,74
300	0,65	0,82	0,88	0,88	0,74
400	0,60	0,76	0,82	0,84	0,74
500	0,53	0,67	0,71	0,80	0,74
600	0,42	0,55	0,56	0,76	0,74
700	0,27	0,37	0,38	0,71	0,44
800	0,15	0,21	0,22	0,63	0,14
900	0,07	0,11	0,14	0,45	0,14
1000	0,01	0,03	0,06	0,20	0,14
<b>Ferritische Sorten, Gruppe I</b> <b>1.4509, 1.4521, 1.4621</b>					
20	1,00	1,12	1,00	1,00	1,00
100	0,88	1,01	0,93	0,98	1,00
200	0,83	0,99	0,91	0,95	1,00
300	0,78	0,92	0,88	0,92	1,00
400	0,73	0,90	0,82	0,86	0,75
500	0,66	0,86	0,78	0,81	0,75
600	0,53	0,71	0,64	0,75	0,75
700	0,39	0,48	0,41	0,54	0,75
800	0,10	0,13	0,11	0,33	0,75
900	0,04	0,04	0,03	0,21	0,75
1000	0,02	0,02	0,01	0,09	0,75
<b>Ferritische Sorten, Gruppe II</b> <b>1.4003, 1.4016</b>					
20	1,00	1,19	1,00	1,00	1,00
100	0,93	1,12	0,93	0,98	1,00
200	0,91	1,09	0,89	0,95	1,00
300	0,89	1,04	0,87	0,92	1,00
400	0,87	1,08	0,84	0,86	0,75
500	0,75	1,01	0,82	0,81	0,75
600	0,43	0,48	0,33	0,75	0,75
700	0,16	0,18	0,13	0,54	0,75
800	0,10	0,12	0,09	0,33	0,75
900	0,06	0,09	0,07	0,21	0,75
1000	0,04	0,06	0,05	0,09	0,75

## 8.3 Tragwerksbemessung für den Brandfall

Die Feuerwiderstandsfähigkeit kann mit Hilfe eines oder mehrerer der folgenden Berechnungsverfahren bestimmt werden:

- einfache Berechnungsmodelle für einzelne Bauteile,
- erweiterte Berechnungsmodelle,
- Versuche.

Einfache Berechnungsmodelle basieren auf konservativen Annahmen. Erweiterte Berechnungsmodelle sind Berechnungsverfahren, bei denen Prinzipien des Ingenieurwesens mit realistischen Annahmen für bestimmte Fälle angewendet werden. Für den Fall, dass keine einfachen Berechnungsmodelle vorhanden sind, muss eine Bemessung entweder anhand eines erweiterten Berechnungsverfahrens oder anhand von Versuchen erfolgen.

Gemäß EN 1993-1-2 gelten die einfachen Berechnungsmodelle für Baustahl auch für nichtrostenden Stahl. Allerdings hat sich gezeigt, dass einige dieser Regeln sehr konservative Ergebnisse für nichtrostende Stähle liefern und daher ist zu erwarten, dass die modifizierten Regeln aus Kapitel 8.3 dieser Bemessungshilfen in die nächste Überarbeitung von EN 1993-1-2 einfließen werden. Diese veränderten Regeln können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Verwendung von  $f_{p0,2,\theta}$  (im Gegensatz zu  $f_{2,\theta}$ ) zur Ermittlung der
  - Knickfestigkeit von Stützen (für Querschnitte aller Klassen),
  - Momententragfähigkeit von eingespannten Trägern der Querschnittsklasse 4,
  - Momententragfähigkeit von frei gelagerten Trägern (für Querschnitte aller Klassen).
2. Verwendung eines temperaturabhängigen Wertes für  $\varepsilon$  zur Klassifizierung von Querschnitten,
3. Verwendung von Beulkurven für Stützen und frei gelagerte Träger, die sich auf Raumtemperatur beziehen.

### 8.3.2 Klassifizierung von Querschnitten

Bei der Tragwerksbemessung für den Brandfall darf das in Kapitel 5 dieser Bemessungshilfen dargestellte Verfahren zur Klassifizierung von Querschnitten angewendet werden, wobei allerdings der folgende temperaturabhängige Wert für  $\varepsilon$  verwendet werden sollte:

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} \quad (8.6)$$

Dabei gilt:

$k_{y,\theta}$  entweder  $k_{p0,2,\theta}$  oder  $k_{2,\theta}$  abhängig von der Belastungsart und der Querschnittsklasse (siehe Kapitel 8.2).

Alternativ kann der folgende konservative Wert für  $\varepsilon$  verwendet werden, wobei jedoch die Bemessungseigenschaften bei 20°C verwendet werden sollten:

$$\varepsilon = 0,85 \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} \quad (8.7)$$

### 8.3.3 Zugbeanspruchte Bauteile

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit  $N_{fi,\theta,Rd}$  eines auf Zug beanspruchten Bauteils bei einer gleichmäßigen Temperatur  $\theta$  sollte wie folgt bestimmt werden:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M0}/\gamma_{M,fi}] \quad (8.8)$$

Dabei gilt:

- $k_{2,\theta}$  Abminderungsfaktor der Festigkeit bei 2 % der gesamten Dehnung bei einer Temperatur  $\theta$ ,
- $N_{Rd}$  Bemessungswert der plastischen Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts  $N_{pl,Rd}$  für eine Bemessung bei Normaltemperatur gemäß Kapitel 5.7.2,

$\gamma_{M0}$  bzw.  $\gamma_{M,fi}$  Teilsicherheitsbeiwert, siehe Tabelle 4.1 und Kapitel 8.1.

Bei einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung sollte der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit  $N_{fi,t,Rd}$  zum Zeitpunkt  $t$  wie folgt bestimmt werden:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{2,\theta_i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (8.9)$$

Dabei gilt:

- $A_i$  Teilfläche des Querschnitts,
- $\theta_i$  Temperatur der Teilfläche  $A_i$  des Querschnitts,
- $k_{2,\theta_i}$  Abminderungsfaktor der Festigkeit bei 2 % der gesamten Dehnung bei einer Temperatur  $\theta_i$ , siehe Kapitel 8.2.

Alternativ darf der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit  $N_{fi,t,Rd}$  bei einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung konservativ mit dem Bemessungswert der Beanspruchbarkeit  $N_{fi,\theta,Rd}$  bei einer gleichmäßigen Temperatur  $\theta$  entsprechend dem Maximalwert  $\theta_{max}$  der ungleichmäßigen Temperaturverteilung zum Zeitpunkt  $t$  angenommen werden.

### 8.3.4 Druckbeanspruchte Bauteile

Der Bemessungswert der Knickfestigkeit  $N_{b,fi,t,Rd}$  zum Zeitpunkt  $t$  eines auf Druck beanspruchten Bauteils bei einer gleichmäßigen Temperatur  $\theta$  sollte wie folgt ermittelt werden:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (8.10)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (8.11)$$

Dabei gilt

- $k_{p0,2,\theta}$  Abminderungsfaktor der 0,2 %-Dehngrenze bei einer Temperatur  $\theta$ , siehe Kapitel 8.2,
- $\chi_{fi}$  Abminderungsfaktor für Biegeknicken im Brandfall ermittelt mit:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad \text{jedoch } \chi_{fi} \leq 1 \quad (8.12)$$

mit

$$\phi_{\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right], \quad (8.13)$$

wobei der Imperfektionsfaktor  $\alpha$  und die Grenzschlankheit  $\bar{\lambda}_0$  Knickbeiwerte unter Raumtemperatur gemäß Tabelle 6.1 bzw. Tabelle 6.2 sind.

Die modifizierte dimensionslose bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_\theta$  bei einer Temperatur  $\theta$  wird wie folgt bestimmt:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[ \frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{Bei Querschnitten jeder Klasse} \quad (8.14)$$

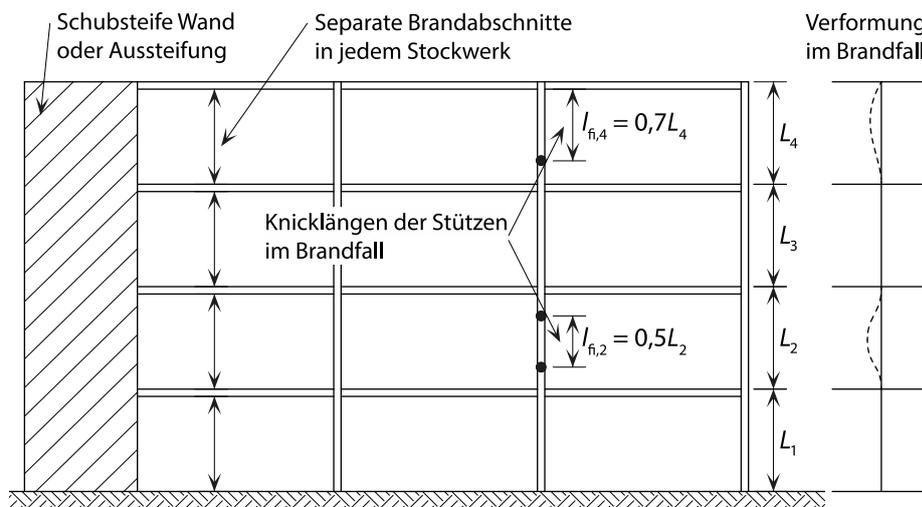
Dabei gilt:

$k_{E,\theta}$  Abminderungsfaktor der Steigung im linear-elastischen Bereich bei einer Temperatur  $\theta$  (siehe Kapitel 8.2).

Der Bemessungswert der Knickfestigkeit darf bei einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung konservativ mit dem Bemessungswert der Knickfestigkeit bei einer gleichmäßigen Temperatur entsprechend dem Maximalwert der ungleichmäßigen Temperaturverteilung in dem Bauteil angenommen werden.

Die Knicklänge  $l_{fi}$  einer Stütze bei einer Bemessung für den Brandfall sollte grundsätzlich wie bei einer Bemessung für Normaltemperatur bestimmt werden. Bei gegen seitlicher Verschiebung ausgesteiften Rahmen sollte die Knicklänge  $l_{fi}$  unter der Berücksichtigung der seitlichen Halterungen der Stütze, die als steif oder verformbar ausgebildete Anschlüsse die Stütze mit den oberen und unteren Brandabschnitten verbinden, bestimmt werden. Dies gilt jedoch nur, wenn die Bauteile, die die einzelnen Brandabschnitte voneinander trennen, mindestens den gleichen Feuerwiderstand aufweisen wie die Stütze.

Bei einem gegen seitliche Verschiebung ausgesteiften Rahmen, bei dem jedes Stockwerk einen eigenen Brandabschnitt mit ausreichendem Feuerwiderstand darstellt, wird die Knicklänge einer Stütze in innenliegenden Stockwerken mit  $l_{fi} = 0,5L$  und in dem jeweils obersten Stockwerk mit  $l_{fi} = 0,7L$  ermittelt, wobei  $L$  die Systemhöhe des entsprechenden Stockwerks ist, siehe Abbildung 8.1.



**Abbildung 8.1** Knicklängen  $l_{fi}$  von Stützen in seitlich ausgesteiften Rahmen

### 8.3.5 Seitlich gehaltene Träger

Der Bemessungswert der Momententragfähigkeit  $M_{fi,\theta,Rd}$  eines auf Biegung beanspruchten seitlich gehaltenen Trägers bei einer gleichmäßigen Temperatur  $\theta$  sollte wie folgt ermittelt werden:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left[ \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (8.15)$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{p0,2,\theta} M_{Rd} \left[ \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (8.16)$$

Dabei gilt:

$M_{Rd}$  Bemessungswert entweder der plastischen Momententragfähigkeit des Bruttoquerschnitts  $M_{pl,Rd}$  (bei Querschnitten der Klasse 1 oder 2), der elastischen Momententragfähigkeit des Bruttoquerschnitts  $M_{el,Rd}$  (Klasse 3) oder der wirksamen Momententragfähigkeit des wirksamen Querschnitts  $M_{eff,Rd}$  (Klasse 4) jeweils für eine Bemessung bei Normaltemperatur,

$k_{2,\theta}$  bzw.  $k_{p0,2,\theta}$  Abminderungsfaktor, siehe Kapitel 8.2.

Müssen zusätzlich die Einflüsse aus Schubbeanspruchungen berücksichtigt werden, sollte die abgeminderte Momententragfähigkeit für eine Bemessung bei Normaltemperatur gemäß Kapitel 5.7.6 verwendet werden.

Der Bemessungswert der Momententragfähigkeit  $M_{fi,t,Rd}$  zum Zeitpunkt  $t$  eines auf Biegung beanspruchten seitlich gehaltenen Trägers bei einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung kann konservativ wie folgt ermittelt werden:

$$M_{fi,t,Rd} = \left[ \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} \right] \quad (8.17)$$

Dabei gilt:

$M_{fi,\theta,Rd}$  Bemessungswert der Momententragfähigkeit des Querschnitts (oder des wirksamen Querschnitts bei Querschnitten der Klasse 4) bei einer gleichmäßigen Temperatur  $\theta$  entsprechend dem Maximalwert der ungleichmäßigen Temperaturverteilung im Querschnitt,

$\kappa_1$  Anpassungsfaktor für eine ungleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt, siehe Tabelle 8.2,

$\kappa_2$  Anpassungsfaktor für eine ungleichmäßige Temperaturverteilung entlang des Trägers, siehe Tabelle 8.2.

**Tabelle 8.2 Anpassungsfaktoren**

Bedingungen der Brandbeanspruchung	$\kappa_1$
für einen Träger, der von allen vier Seiten brandbeansprucht wird	1,0
für einen ungeschützten Träger mit einer Stahlbeton- oder Stahlbetonverbundplatte auf der einen Seite und Brandbeanspruchung auf den drei anderen Seiten	0,70
für einen brandgeschützten Träger mit einer Stahlbeton- oder Stahlbetonverbundplatte auf der einen Seite und Brandbeanspruchung auf den drei anderen Seiten	0,85
	$\kappa_2$
an den Auflagern statisch unbestimmt gelagerter Träger	0,85
in allen anderen Fällen	1,0

Der Bemessungswert der Querkraftbeanspruchbarkeit  $V_{fi,t,Rd}$  zum Zeitpunkt  $t$  eines seitlich gehaltenen Trägers bei einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung sollte wie folgt ermittelt werden:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{2,\theta_{web}} V_{Rd} \left[ \frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} \right] \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3} \quad (8.18)$$

$$V_{fi,t,Rd} = k_{p0,2,\theta_{web}} V_{Rd} \left[ \frac{Y_{M0}}{Y_{M,fi}} \right] \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (8.19)$$

Dabei gilt:

$V_{Rd}$  Bemessungswert der Querkraftbeanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts für eine Bemessung bei Normaltemperatur gemäß Kapitel 5.7.5 (für Temperaturen über 400 °C sollte  $\eta$  mit 1,0 angesetzt werden),

$\theta_{web}$  Temperatur im Steg des Querschnitts.

### 8.3.6 Seitlich nicht gehaltene Träger

Der Bemessungswert der Momententragfähigkeit  $M_{b,fi,t,Rd}$  zum Zeitpunkt  $t$  eines seitlich nicht gehaltenen Trägers sollte wie folgt ermittelt werden:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{pl,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{Y_{M,fi}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 1 oder 2} \quad (8.20)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{Y_{M,fi}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 3} \quad (8.21)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{p0,2,\theta} f_y}{Y_{M,fi}} \quad \text{bei Querschnitten der Klasse 4} \quad (8.22)$$

Dabei gilt:

$\chi_{LT,fi}$  Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken bei einer Bemessung für den Brandfall mit:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{\phi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad \text{jedoch } \chi_{LT,fi} \leq 1 \quad (8.23)$$

$$\phi_{LT,\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right] \quad (8.24)$$

Dabei gilt:

$\alpha_{LT}$  Imperfektionsbeiwert für Raumtemperatur gemäß Kapitel 6.4.2,

$k_{p0,2,\theta}$  Abminderungsfaktor gemäß Kapitel 8.2 bei einer maximalen Temperatur  $\theta$  des Querschnitts.

Die dimensionslose bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$  bei einer Temperatur  $\theta$  wird wie folgt bestimmt:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[ \frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{bei Querschnitten jeder Klasse} \quad (8.25)$$

Dabei gilt:

$k_{E,\theta}$  Abminderungsfaktor gemäß Kapitel 8.2 bei einer Temperatur  $\theta$ .

### 8.3.7 Bauteile unter kombinierter Beanspruchung aus Biegung und Drucknormalkraft

Die kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Drucknormalkraft sollte mit den folgenden Gleichungen untersucht werden, um vorzeitiges Knicken um die starke bzw. schwache Hauptachse sowie Biegedrillknicken zu vermeiden:

a) bei Querschnitten der Klasse 1, 2 oder 3:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.26)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min1,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.27)$$

Dabei gilt:

$N_{fi,Ed}$ , $M_{y,fi,Ed}$ bzw. $M_{z,fi,Ed}$	Bemessungswert der Drucknormalkraft bzw. des Biegemomentes bei einer Bemessung für den Brandfall,
$M_{y,fi,\theta,Rd}$ bzw. $M_{z,fi,\theta,Rd}$	Bemessungswert der Momententragfähigkeit gemäß Kapitel 8.3.5,
$\chi_{min,fi}$	kleinster Abminderungsfaktor für Biegeknicken, Drillknicken bzw. Biegedrillknicken bei einer Temperatur $\theta$ gemäß Kapitel 8.3.4,
$\chi_{min1,fi}$	kleinster Abminderungsfaktor für Biegeknicken um die z-Achse, Drillknicken bzw. Biegedrillknicken bei einer Temperatur $\theta$ gemäß Kapitel 8.3.4,
$\chi_{LT,fi}$	Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken bei einer Temperatur $\theta$ gemäß Kapitel 8.3.6.

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (8.28)$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (8.29)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (8.30)$$

$$\mu_y = (2,0 \beta_{M,y} - 5) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \beta_{M,y} + 0,29 \leq 0,8 \quad \text{mit } \bar{\lambda}_{y,\theta} \leq 1,1 \quad (8.31)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (8.32)$$

$$\mu_z = (1,2 \beta_{M,z} - 3) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,71 \beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \quad \text{mit } \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1 \quad (8.33)$$

Dabei ist  $\beta_M$  ein Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs gemäß Tabelle 8.3.

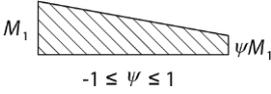
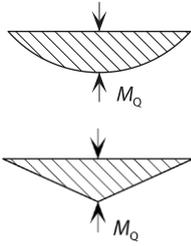
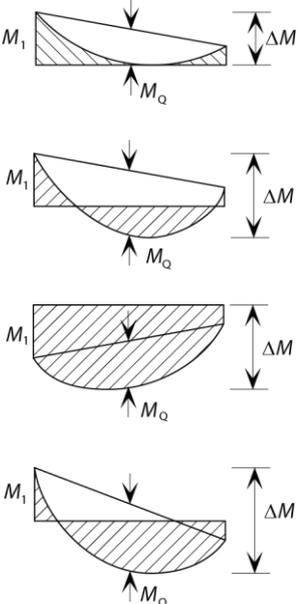
b) bei Querschnitten der Klasse 4:

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.34)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min1,fi} A_{eff} k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (8.35)$$

Die Parameter sind (a) zu entnehmen, außer dass bei der Berechnung von  $k_y$ ,  $k_z$  bzw.  $k_{LT}$  die Querschnittsfläche  $A$  durch die wirksame Querschnittsfläche  $A_{eff}$  ersetzt werden muss.

**Tabelle 8.3** Anpassungsfaktoren  $\beta_M$  zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs

Momentenverlauf	Anpassungsfaktor $\beta_M$
<p>Endmoment</p> 	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
<p>Momente aus Querlasten in Tragwerksebene</p> 	$\beta_{M,Q} = 1,3$  $\beta_{M,Q} = 1,4$
<p>Momente aus Querlasten in Tragwerksebene mit zusätzlichen Endmomenten</p> 	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ $M_Q =  \max M $ nur aus Querlast  Bei Momentenverläufen ohne Vorzeichenwechsel: $\Delta M =  \max M $  Bei Momentenverläufen mit Vorzeichenwechsel: $\Delta M =  \max M  +  \min M $

## 8.4 Thermische Werkstoffeigenschaften bei erhöhten Temperaturen

### 8.4.1 Thermische Dehnung

Die thermische Dehnung (Wärmeausdehnung)  $\Delta l/l$  von austenitischen nichtrostenden Stählen wird wie folgt bestimmt:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(16 + 4,79 \times 10^{-3}\theta - 1,243 \times 10^{-6}\theta^2) \times (\theta - 20)}{10^6} \quad (8.36)$$

Dabei gilt:

- $l$  Länge bei einer Temperatur von 20°C,
- $\Delta l$  Verlängerung infolge der Temperaturbeanspruchung,
- $\theta$  Temperatur des Stahls (in °C).

Werte für den mittleren Wärmeausdehnungskoeffizienten für austenitische, ferritische sowie für Duplex-Stähle über verschiedene Temperaturbereiche sind in Tabelle 8.4 angegeben.

**Tabelle 8.4** Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient

Temperaturbereich des Stahls (°C)	Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient (10 <sup>-6</sup> /K)		
	Austenit	Duplex	Ferrit
20 - 100	16,7	13,2	10,3
20 - 200	17,2	13,9	10,7
20 - 300	17,7	14,3	11,1
20 - 400	18,1	14,7	11,5
20 - 500	18,4	15,1	11,8
20 - 600	18,8	15,4	12,0
20 - 700	19,1	15,9	12,4
20 - 800	19,4	16,3	12,9
20 - 900	19,4	16,7	13,4
20 - 1000	19,7	17,1	14,0
20 - 1100	20	17,5	-

### 8.4.2 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  von nichtrostendem Stahl wird wie folgt ermittelt:

für austenitische und Duplex-Stähle:

$$c = 450 + 0,28 \times \theta - 2,91 \times 10^{-4}\theta^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta^3 \quad \text{J/kgK} \quad (8.37)$$

für ferritische nichtrostende Stähle:

$$c = 430 + 0,26 \times \theta \quad \text{J/kgK} \quad (8.38)$$

In der aktuellen Version von EN 1993-1-2 wird ausschließlich Gleichung (8.37) angegeben. Es wird erwartet, dass auch Gleichung (8.38) in die nächste Überarbeitung von EN 1993-1-2 eingearbeitet wird.

### 8.4.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von nichtrostendem Stahl wird wie folgt ermittelt:

für austenitische und Duplex-Stähle:

$$\lambda = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2}\theta \quad \text{W/mK} \quad (8.39)$$

für ferritische nichtrostende Stähle:

$$\lambda = 20,4 + 2,28 \times 10^{-2}\theta - 1,54 \times 10^{-5}\theta^2 \quad \text{W/mK} \quad (8.40)$$

In der aktuellen Version von EN 1993-1-2 wird ausschließlich Gleichung (8.39) angegeben. Es wird erwartet, dass auch Gleichung (8.40) in die nächste Überarbeitung von EN 1993-1-2 eingearbeitet wird.

### 8.4.4 Berechnung des Temperaturanstiegs bei nichtrostendem Stahl

Das Verfahren zur Berechnung des Temperaturanstiegs bei Baustahl kann auch bei nichtrostendem Stahl angewendet werden.

Der Temperaturanstieg  $\Delta\theta_t$  während des Zeitintervalls  $\Delta t$  in einem ungeschützten Bauteil aus nichtrostendem Stahl bei einer gleichmäßigen Temperatur  $\theta$  wird wie folgt ermittelt:

$$\Delta\theta_t = \frac{A_m/V}{c \rho} \dot{h}_{\text{net,d}} \Delta t \quad (8.41)$$

Dabei gilt:

$c$  spezifische Wärmekapazität von nichtrostendem Stahl, (J/kgK), siehe Kapitel 8.4.2,

$\rho$  Rohdichte von nichtrostendem Stahl ( $\text{kg/m}^3$ ) gemäß Tabelle 2.7 (üblicherweise als temperaturunabhängig betrachtet),

$A_m/V$  Profilmassfaktor des ungeschützten Bauteils,

$A_m$  dem Brand ausgesetzte Oberfläche des Bauteils pro Längeneinheit,

$V$  Volumen des Bauteils pro Längeneinheit,

$\dot{h}_{\text{net,d}}$  flächenbezogener Bemessungswert des Nettowärmestroms:

$$\dot{h}_{\text{net,d}} = \dot{h}_{\text{net,c}} + \dot{h}_{\text{net,r}} \quad (8.42)$$

mit:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c(\theta_g - \theta) \quad (8.43)$$

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \phi \varepsilon_{\text{res}} 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4] \quad (8.44)$$

Dabei gilt:

$\alpha_c$  Wärmeübertragungskoeffizient für Konvektion (üblicherweise mit  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$  angenommen),

$\theta_g$  Gastemperatur in der Umgebung des brandbeanspruchten Bauteils ( $^{\circ}\text{C}$ ) gemäß der nominellen Temperaturzeitkurven,

$\theta$  Oberflächentemperatur des Bauteils als gleichmäßig zum Zeitpunkt  $t$  angenommen ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$\phi$  Konfigurationsfaktor,

$\varepsilon_{\text{res}}$  resultierende Emissivität (Wärmestrahlung).

Der Wert  $\varepsilon_{\text{res}}$  gibt die Wärmestrahlung an, die zwischen dem Feuer und der Oberfläche des Bauteils aus nichtrostendem Stahl übertragen wird. Seine Größe hängt vom Grad der Brandbeanspruchung des Bauteils ab. Bauteile, die teilweise vor der Wärmestrahlung des Feuers geschützt sind, haben üblicherweise einen geringeren Wert von  $\varepsilon_{\text{res}}$ . Für nichtrostende Stähle gibt EN 1993-1-2 einen Wert von  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,4$  an.

Die Gleichung zur Berechnung des Temperaturanstiegs kann verwendet werden, um die Temperatur des Stahls mittels schrittweiser Integration zu bestimmen, wenn die Änderung der Brandtemperatur über die Zeit bekannt ist. In EN 1991-1-2 ist die nominelle Temperaturzeitkurve wie folgt angegeben:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (8.45)$$

Dabei gilt:

$t$  vergangene Zeit (min).

## 8.5 Materialverhalten bei erhöhten Temperaturen

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven für nichtrostende Stähle bei erhöhten Temperaturen können mit den folgenden Gleichungen bestimmt werden. Entsprechende Gleichungen zur Berechnung der Spannungs-Dehnungs-Kurven von nichtrostenden Stählen bei Raumtemperatur sind in ANHANG C zu finden.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_{\theta}} + 0,002 \left[ \frac{\sigma}{f_{p0,2,\theta}} \right]^{n_{\theta}} \quad \text{für } \sigma \leq f_{p0,2,\theta} \quad (8.46)$$

Der zweite Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurven kann entweder anhand einer Spannung  $f_{2,\theta}$  mit Gleichung (8.47) oder anhand der Zugfestigkeit  $f_{u,\theta}$  mit Gleichung (8.48) bestimmt werden:

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \left( 0,02 - \varepsilon_{p0,2,\theta} - \frac{(f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta})}{E_{p0,2,\theta}} \right) \times \left[ \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{2,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right]^{m_{\theta,2}} + \varepsilon_{p0,2,\theta} \quad \text{für } f_{p0,2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta} \quad (8.47)$$

oder

$$\varepsilon = \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{E_{p0,2,\theta}} + \varepsilon_{u,\theta} \left( \frac{\sigma - f_{p0,2,\theta}}{f_{u,\theta} - f_{p0,2,\theta}} \right)^{m_{\theta}} + \varepsilon_{p0,2,\theta} \quad \text{für } f_{p0,2,\theta} < \sigma \leq f_{u,\theta} \quad (8.48)$$

Dabei gilt:

$\sigma$	technische Spannung,
$\varepsilon$	technische Dehnung,
$f_{2,\theta}$	Spannung bei 2 % der gesamten Dehnung bei einer Temperatur $\theta$ ,
$\varepsilon_{p0,2,\theta}$	gesamte Dehnung bei einer Spannung $f_{p0,2,\theta}$ ,
$E_{p0,2,\theta}$	Tangentenmodul bei einer Spannung $f_{p0,2,\theta}$ ,
$\varepsilon_{u,\theta}$	Maximaldehnung zugehörig zur Zugfestigkeit $f_{u,\theta}$ ( $\varepsilon_{u,\theta} \leq \varepsilon_u$ ),
$n_{\theta}, m_{\theta}$ bzw. $m_{\theta,2}$	Exponent, welcher den Grad der Nichtlinearität des Werkstoffs bei einer Temperatur $\theta$ definiert.

$\varepsilon_{u,\theta}$  kann anhand der Gleichung in ANHANG C für die Dehnung  $\varepsilon_u$  zugehörig zur Zugfestigkeit bei Raumtemperatur ermittelt werden, wobei für die Festigkeit die Werte bei erhöhten Temperaturen verwendet werden sollten.

Für  $n_\theta$  können die Werte von  $n$  bei Raumtemperatur verwendet werden.  $m_\theta$  bzw.  $m_{\theta,2}$  können anhand der Gleichungen für  $m$  bei Raumtemperatur ermittelt werden, allerdings sollten die Werte für  $f_{p0,2,\theta}$  bzw.  $f_{u,\theta}$  bei erhöhten Temperaturen verwendet werden.

In EN 1993-1-2 wird das Materialverhalten für nichtrostende Stähle zurzeit auf andere Weise als in diesem Kapitel beschrieben definiert. Allerdings wird erwartet, dass die Definitionen des Materialverhaltens gemäß den Gleichungen (8.46), (8.47) bzw. (8.48) in die nächste Überarbeitung von EN 1993-1-2 einfließen, da sie als eine modifizierte, kombinierte Ramberg-Osgood-Gleichung mit den weitverbreiteten Gleichungen für das Materialverhalten bei Raumtemperatur, dargestellt in ANHANG C dieser Bemessungshilfen, übereinstimmen. Die neue Definition des Materialverhaltens für nichtrostende Stähle ist außerdem genauer und dabei weniger komplex und es werden Parameter verwendet, die eine klare physikalische Bedeutung aufweisen.



## 9 ERMÜDUNG

Bei Bauwerken oder einzelnen Teilen von Bauwerken, die durch erhebliche Spannungsschwankungen beansprucht werden, sollte die Ermüdung von Metallen berücksichtigt werden. Im Allgemeinen wird für Bauwerke kein Ermüdungsnachweis gefordert, außer bei Bauteilen, die Hebevorrichtungen, Verkehrslasten oder schwingungserzeugende Maschinen tragen bzw. die durch Wind hervorgerufenen Schwingungen ausgesetzt sind.

Genau wie bei Baustahl führt auch bei nichtrostendem Stahl die Kombination aus Spannungsspitzen und Fehlstellen an geschweißten Anschlüssen dazu, dass diese Bereiche i. d. R. stets anfälliger für ein Versagen aufgrund von Ermüdungsbeanspruchungen sind als andere Teile eines Bauwerks. Das Vorgehen zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit bei Bauwerken aus Baustahl ist ebenso bei Bauwerken aus austenitischem und Duplex-Stahl anwendbar (siehe EN 1993-1-9).

Durch geeignete Bemessungskonzepte kann die Anfälligkeit eines Bauwerks für ein Versagen aufgrund von Ermüdungsbeanspruchungen deutlich verringert werden. Das schließt eine sorgfältige Planung des gesamten Bauwerks sowie der konstruktiven Detaillösungen unter Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit mit ein. Eine sinnvolle und frühzeitige Beachtung von möglichen Ermüdungserscheinungen bei der Bemessung kann die Beanspruchbarkeit gegen Ermüdung deutlich verbessern. Eine Betrachtung der möglichen Ermüdungserscheinungen erst nachdem bereits andere Bemessungskriterien erfüllt wurden, kann zu unzureichenden und kostenintensiven Lösungen führen. Außerdem sollten auch die Anforderungen der Hersteller sowie der Bauunternehmer berücksichtigt werden. Daher wird empfohlen, eine sorgfältige und frühzeitige Planung unter Einbeziehung aller Beteiligten durchzuführen, um die Bereiche des Bauwerks mit einem hohen Risiko für Ermüdungsschäden zu erkennen, entsprechende Vorsichtsmaßnahmen zu treffen und um Herstellungs- sowie Montagefehler zu vermeiden. Besonders Durchbrüche sowie Hebevorrichtungen, die zur Vereinfachung der Fertigung bzw. der Montage dienen, sollten bei der Betrachtung der Ermüdungsbeanspruchungen berücksichtigt werden.

Mögliche problematische Ermüdungserscheinungen können ausgeschlossen werden, indem folgende konstruktive Details sorgfältig vermieden werden:

- überganglose Querschnittsänderungen und Spannungsspitzen im Allgemeinen,
- Schiefstellungen und Exzentrizitäten,
- kleine Fehlstellen wie Kratzer und Schleifspuren,
- unnötiges Schweißen von sekundären Halterungen, z. B. Traghaken,
- teilweise durchgeschweißte Schweißnähte, Kehlnähte, unterbrochenes Schweißen und Schweißbadsicherungen,
- Zündstellen.

Obwohl Methoden zur Nachbehandlung von Schweißnähten wie z. B. die Schweißnahtkontrolle, das Schleifen der Schweißnahtwurzel oder das Kugelstrahlen die Ermüdungsfestigkeit einer geschweißten Verbindung erhöhen können, existieren bisher nur unzureichende Informationen, um die möglichen Vorteile für nichtrostenden Stahl zu bestimmen. Außerdem sollte beachtet werden, dass alle diese Methoden arbeitsintensiv sind und handwerkliches Können sowie Erfahrung des Ausführenden erfordern, damit ein größtmöglicher Vorteil erreicht wird. Sie sollten außer in speziellen Fällen nicht bei der Bemessung berücksichtigt werden.



# 10 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

## 10.1 Allgemeines

Experimentelle Untersuchungen an nichtrostenden Stählen sowie an Bauteilen aus diesen kann aus einer Vielzahl an Gründen erforderlich sein:

- wenn ein Vorteil aus der Festigkeitssteigerung in den kaltumgeformten Ecken von Bauteilen gewonnen werden soll (siehe Kapitel 2.2.1),
- wenn die Geometrie eines Bauteils nicht den anwendbaren Regeln entspricht (siehe Kapitel 5.2),
- wenn eine Reihe von Konstruktionen bzw. Bauteilen auf Prüfungen im Einzelfall beruhen oder
- wenn eine Überprüfung der Produktionsangaben erforderlich ist.

Die üblichen Vorsichtsmaßnahmen und Anforderungen an die Prüfverfahren und an die Auswertung von Ergebnissen bei Untersuchungen an Baustählen gelten ebenfalls bei Untersuchungen an nichtrostenden Stählen. Daher wird grundsätzlich empfohlen, diesen Anforderungen zu entsprechen, siehe z. B. Kapitel 5.2 sowie Anhang D der EN 1990 sowie Kapitel 9 und Anhang A in EN 1993-1-3. Allerdings gibt es einige Besonderheiten beim Materialverhalten von nichtrostenden Stählen, die bei der Planung von experimentellen Untersuchungen mehr berücksichtigt werden müssen als es bei Baustählen der Fall wäre. Im Folgenden wird eine kurze Vorgehensweise dargestellt.

## 10.2 Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven

Bei Zugversuchen an Prüfkörpern aus nichtrostendem Stahl wird empfohlen, dass die Last mit Hilfe von Bolzen aufgebracht wird, die eine ausreichende Querschnittsfläche aufweisen, um Querkräfte aufzunehmen und die durch entsprechende Löcher an den Enden der Prüfkörper gesteckt werden. Damit wird sichergestellt, dass der Prüfkörper nur durch Normalkräfte beansprucht wird und somit die tatsächliche Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve ohne störende Einflüsse durch frühzeitiges Plastizieren aufgrund von Lastexzentrizitäten ermittelt wird. Die zentrische Ausrichtung der Last kann anhand von elastischen Versuchen mit Dehnungsmessgeräten, die die Verformungen des Prüfkörpers an mehreren Stellen und in verschiedenen Richtungen messen, überprüft werden. Da nichtrostende Stähle Anisotropien (unterschiedliches Spannungs-Dehnungs-Verhalten parallel und senkrecht zur Walzrichtung) in Form von höheren Festigkeiten senkrecht zur Walzrichtung aufweisen können, sollte die Ausrichtung der Prüfkörper ebenfalls berücksichtigt werden. Die Eigenschaften nichtrostender Stähle hängen stark von der Dehnungsgeschwindigkeit ab; zur Bestimmung der Eigenschaften unter Zug wird empfohlen dieselbe Dehnungsgeschwindigkeit zu verwenden wie im Herstellerzeugnis angegeben.

### 10.3 Bauteilversuche

Bauteilversuche sollten abhängig von der Prüfeinrichtung möglichst mit den tatsächlichen Abmessungen oder zumindest mit Größenverhältnissen, die diesen so gut wie möglich entsprechen, durchgeführt werden. Die Bauteile dafür sollten auf dieselbe Weise hergestellt werden wie für eine spätere Montage im Bauwerk. Wenn Bauteile bei der Montage verschweißt werden sollen, sollte das zu untersuchende Bauteil auf dieselbe Weise geschweißt werden.

Aufgrund der Anisotropie von nichtrostendem Stahl sollten die zu prüfenden Bauteile unter Berücksichtigung der gleichen Ausrichtung (d. h. senkrecht oder parallel zur Walzrichtung) der Bleche hergestellt werden wie sie auch beim tatsächlichen Bauwerk geplant sind. Falls die tatsächlich geplante Ausrichtung nicht bekannt ist oder nicht garantiert werden kann, sollten Versuchen für beide Ausrichtungen durchgeführt werden und das ungünstigste Ergebnis sollte verwendet werden. Bei kaltverfestigten Werkstoffen sollte sowohl die Zug- als auch die Druckfestigkeit für die jeweilige Ausrichtung der Bauteile zur Walzrichtung bestimmt werden. Die Auswertung der Ergebnisse sollte dann mit der maßgebenden Festigkeit als Referenzwert durchgeführt werden.

Nichtrostende Stähle weisen eine höhere Duktilität und eine stärkere Verfestigung auf als Baustähle, weshalb die Leistungsfähigkeit des Versuchsstandes größer sein muss als für Bauteilversuche aus Baustählen mit vergleichbaren Streckgrenzen. Dies gilt jedoch nicht nur für die Belastungskapazität des Versuchsstandes, sondern auch für die Möglichkeit größere Verformungen des Bauteils aufzunehmen.

Bei höheren Belastungen des Bauteils werden die Einflüsse aus Kriechen stärker, wodurch Kraft- oder Verformungsaufzeichnungen keine eindeutigen Verläufe innerhalb eines üblichen Zeitraums anzeigen könnten.

# 11 ASPEKTE DER HERSTELLUNG

## 11.1 Einführung

In diesem Kapitel werden die maßgebenden Aspekte für Tragwerksplaner bezogen auf die Herstellung von nichtrostendem Stahl einschließlich Empfehlungen für bewährte Verfahren dargestellt. Außerdem wird eine erste Einschätzung hinsichtlich der Eignung eines Herstellers zur Ausführung der Arbeiten ermöglicht.

Nichtrostender Stahl ist kein schwer zu verarbeitender Werkstoff. Allerdings unterscheidet er sich in mancher Hinsicht von Baustahl und sollte dementsprechend auch anders behandelt werden. Viele Herstellungs- und Verbindungsverfahren sind ähnlich wie bei Baustahl, allerdings erfordert das unterschiedliche Materialverhalten bei bestimmten Aspekten besondere Beachtung. Daher ist es wichtig, dass frühzeitig in der Planungsphase eines Projektes ein sinnvoller Austausch zwischen Konstrukteur und Hersteller erfolgt, um sicherzustellen, dass geeignete Herstellungsverfahren zur Verfügung stehen und auch angewendet werden.

Ein Hauptziel dabei ist es, die Korrosionsbeständigkeit des Stahls zu erhalten. Dafür ist es wichtig, dass zu jeder Zeit Vorkehrungen bei der Lagerung, der Verarbeitung und der Umformung getroffen werden, um schädliche Einflüsse, die die Bildung der selbstregulierenden Passivschicht gefährden, zu vermeiden. Besondere Beachtung sollte dabei die Wiederherstellung der vollständigen Korrosionsbeständigkeit von geschweißten Bereichen erhalten. Die entsprechenden Vorkehrungen sind trotz ihrer Relevanz vergleichsweise einfach und gehören grundsätzlich zur bewährten Ingenieurpraxis.

Weiterhin ist es wichtig, das gute Erscheinungsbild der Oberfläche von nichtrostendem Stahl während der Herstellung zu bewahren. Nicht nur weil Oberflächenschäden das Erscheinungsbild vermindern, sondern auch weil sie vom Kunden üblicherweise nicht toleriert werden und eine Beseitigung zeitintensiv und teuer ist. Während Oberflächenschäden bei Bauwerken aus Baustahl üblicherweise durch eine Beschichtung verdeckt werden, ist dies bei Bauwerken aus nichtrostendem Stahl nur selten der Fall.

Die Gestaltung eines Bauwerks kann auch durch die Verfügbarkeit der Materialien beeinflusst werden. Dabei sollte beachtet werden, dass das verfügbare Sortiment an warmgewalzten Bauteilen aus nichtrostendem Stahl wesentlich geringer ist als das aus Baustahl. Dementsprechend werden häufiger kaltumgeformte und geschweißte Bauteile aus nichtrostendem Stahl verwendet als es üblicherweise bei Bauteilen aus Baustahl der Fall ist. Außerdem können aufgrund der Längenbegrenzungen bei den Biegepressen nur vergleichsweise kurze Bauteillängen gefertigt werden, wodurch es zu einer vermehrten Verwendung von Stößen kommt. Bei der Konstruktion von Anschlüssen sollten Abstände von Schrauben zu Biegeradien und mögliche Montageprobleme durch Schweißverzug berücksichtigt werden.

## 11.2 EN 1090 Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken

Die Herstellung und Montage von Bauwerken aus nichtrostendem Stahl sollte in Übereinstimmung mit der harmonisierten Norm EN 1090 durchgeführt werden. Bauprodukte, die in Übereinstimmung mit EN 1090 hergestellt wurden, müssen eine CE-Kennzeichnung aufweisen, wenn sie im Europäischen Wirtschaftsraum verwendet werden sollen. EN 1090 gilt für kaltumgeformte und warmgefertigte Produkte aus austenitischem, ferritischem und Duplex-Stahl.

Teil 1 der EN 1090 lautet *Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile*. Dieser Teil beschreibt, wie Hersteller nachweisen können, dass ihre produzierten Bauteile die angegebenen Leistungsmerkmale erfüllen (die technischen Eigenschaften, wodurch sie für einen besonderen Einsatz oder eine bestimmte Funktion geeignet sind).

Teil 2 der EN 1090 lautet *Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken*. Dieser Teil legt die Anforderungen für die Ausführung von Stahltragwerken fest, um sicherzustellen, dass ein angemessenes Maß an Tragfähigkeit und Stabilität sowie Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit eingehalten wird. Es werden die Leistungsmerkmale für Bauteile festgelegt, die Hersteller gemäß den Anforderungen aus Teil 1 erreichen und nachweisen müssen. Außerdem beinhaltet dieser Teil die technischen Anforderungen für eine große Auswahl an Bauwerken aus Baustahl bzw. aus nichtrostendem Stahl mit sowohl warmgewalzten als auch kaltgeformten Produkten. Teil 2 gilt für tragende Bauteile in Bauwerken und in anderen ähnlichen Tragwerken.

### **11.3 Ausführungsklasse**

Eine Ausführungsklasse muss in Übereinstimmung mit dem (normativen) Anhang C der EN 1993-1-1 angegeben werden. Dort sind insgesamt vier Ausführungsklassen von EXC4 (höchste Anforderungen) bis EXC1 (geringste Anforderungen) definiert. Der Hauptgrund für die Einführung der vier Ausführungsklassen war, ein bestimmtes Maß an Sicherheit gegen das Versagen eines Tragwerkes zu schaffen, wodurch sowohl die Auswirkungen des Versagens der Stahlkonstruktion als Ganzes, eines einzelnen Bauteils oder eines Details als auch die Anforderungen an die Ausführung berücksichtigt werden. Jede Klasse bezieht sich dabei auf eine Reihe von Anforderungen an die Herstellung bzw. die Vor-Ort-Konstruktion, welche in Anhang A.3 der EN 1090-2 angegeben sind. Die Ausführungsklassen werden von Stahlbauunternehmen verwendet, um eine Reihe von Kontrollen der Herstellungsverfahren einzuführen, die Teil eines zertifizierten Systems zur werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) von mit einer CE-Kennzeichnung ausgestatteten Stahlprodukten sind. Dadurch werden die Unternehmen der Stahlindustrie entsprechend den Ausführungsklassen in vier Gruppen mit unterschiedlichen Verfahren zur Qualitätskontrolle eingeteilt. Demzufolge werden die Bauwerke, die ein Stahlbauunternehmen herstellen kann, begrenzt, d. h. ein Stahlbauunternehmen mit einem der Ausführungsklasse EXC2 entsprechenden System zur werkseigenen Produktionskontrolle kann nur Bauwerke gemäß der Ausführungsklassen EXC1 und EXC2 herstellen. Kunden, Bauplaner und Generalunternehmer können demnach die Ausführungsklassen verwenden, um Stahlbauunternehmen auszuwählen, die geeignete Qualitäts- und Sicherheitskontrollen vorweisen können. Die Ausführungsklassen werden von Konstrukteuren/Bauplanern auch dazu verwendet, um geeignete Qualitäts- und Sicherheitskontrollen zu bestimmen, die während der Herstellung erforderlich werden, um die entsprechenden Voraussetzungen für die Konstruktion einzuhalten.

Die Ausführungsklassen gelten für die Stahlkonstruktion als Ganzes, für einzelne Bauteile und für Details eines Bauteils. In manchen Fällen resultierte eine gemeinsame Ausführungsklasse für das Bauwerk, die Bauteile und die Details, während sich in anderen Fällen durchaus auch unterschiedliche Ausführungsklassen für die Bauteile und Details sowie das Bauwerk als Ganzes ergeben können.

Die Auswahl der Ausführungsklasse sollte auf den folgenden drei Aspekten beruhen:

- geforderte Zuverlässigkeit (entweder anhand der geforderten Schadensfolgeklasse, der geforderten Zuverlässigkeitsklasse oder anhand von beiden, gemäß EN 1990),
- Art des Tragwerks, Bauteils oder Details,
- Art der Belastung für die das Tragwerk, das Bauteil oder das Detail bemessen wird (statische, quasi-statische, Ermüdungs- oder seismische Einwirkungen).

Obwohl jedes Bauwerk einer gesonderten Betrachtung bedarf, ist die Ausführungsklasse EXC2 für die Mehrheit aller Bauwerke geeignet, die nicht in Erdbebenzonen gebaut werden. Ausführungsklasse EXC4 gilt für Bauwerke, bei denen im Falle eines Versagens des Tragwerks mit schwerwiegenden Folgen zu rechnen ist. Der Nationale Anhang zu EN 1993-1-1 kann Angaben zur Auswahl der Ausführungsklasse machen.

Eine Überklassifizierung sollte nach Möglichkeit vermieden werden, um unnötige Kosten zu vermeiden. Wenn z. B. EXC2 grundsätzlich die geeignete Ausführungsklasse für ein Bauwerk ist aber anstelle der Anforderungen für EXC2 für eine teilweise Rückverfolgbarkeit (oder für eine Chargenrückverfolgbarkeit) eine vollständige Rückverfolgbarkeit (entspricht EXC3) gefordert wird, sollte weiterhin EXC2 und zusätzlich eine vollständige Rückverfolgbarkeit festgelegt werden, anstelle dass EXC3 nur aufgrund dieser Anforderung gewählt wird.

## **11.4 Lagerung und Verarbeitung**

Im Vergleich zu Baustahl ist bei der Lagerung und Verarbeitung von nichtrostendem Stahl grundsätzlich größere Vorsicht geboten, damit Beschädigungen der Oberflächenbeschaffenheit (besonders bei blankgeglühten oder polierten Oberflächen) verhindert werden. Außerdem sollten Verunreinigungen durch Baustahl oder Eisen, wodurch es zu einem erhöhten Risiko für Oberflächenkorrosion kommen kann, vermieden werden. Die Lagerungs- und Verarbeitungsverfahren sollten schon im Voraus der Herstellung zwischen den zuständigen Vertragsparteien und mit den entsprechenden Details vereinbart werden, um alle eventuellen Anforderungen einzuhalten. Dabei sollten u. a. folgende Punkte beachtet werden:

- Die Oberflächen des Stahls sind unmittelbar nach der Anlieferung auf jegliche Beschädigungen hin zu untersuchen.
- Der Stahl ist durch Kunststoffabdeckungen oder Beschichtungen zu schützen, welche solange wie möglich beibehalten und erst unmittelbar vor der Verarbeitung entfernt werden sollten. Wenn erforderlich, sind diese Schutzmaßnahmen auch im Lieferschein anzugeben (z. B. bei blankgeglühten Oberflächen).
- Für den Fall, dass anstelle einer lose verpackten Kunststoffolie eine abziehbare Kunststoffklebefolie verwendet wird, muss diese UV-beständig sein, um eine vorzeitige Alterung und Oberflächenverunreinigungen durch Klebstoffreste zu verhindern. Außerdem muss diese Folie kontrolliert werden, damit sie innerhalb der vom Hersteller angegebenen Gebrauchsdauer, die üblicherweise bis zu 6 Monate dauern kann, entfernt wird.
- Eine Lagerung in salzhaltigen, feuchten Umgebungen soll vermieden werden. Für den Fall, dass dies nicht möglich ist, sollte der Kontakt mit Salz durch geeignete Schutzverpackungen verhindert werden. Abziehbare Folien sollten jedoch niemals beibehalten werden, wenn ein Kontakt mit Salz möglich ist, da diese sowohl für Salz als auch für Feuchtigkeit durchlässig sind und somit ideale Bedingungen für Spaltkorrosion bieten.

- Es dürfen keine Reibflächen zwischen Lagerregalen, die möglicherweise aus Baustahl gefertigt sind und gelagertem nichtrostendem Stahl entstehen, weshalb solche Regale durch Lattungen oder Ummantelungen aus Holz, Gummi oder Kunststoff geschützt werden sollten. Bleche sollten möglichst vertikal gelagert werden; bei horizontal gelagerten Bleche besteht die Gefahr, dass Personen darüber laufen und dadurch Verunreinigungen durch Eisen oder Beschädigungen der Oberfläche entstehen.
- Hebevorrichtungen aus Baustahl, wie z. B. Ketten, Haken und Knaggen sind grundsätzlich zu vermeiden. Auch hierbei kann der Kontakt mit Eisen durch den Einsatz von isolierenden Materialien oder von Saugnäpfen verhindert werden. Die Gabeln bei Gabelstaplern sollten ebenfalls abgedeckt sein.
- Der Kontakt mit Chemikalien einschließlich Säuren, alkalischen Produkten, Ölen oder Fetten (wodurch einige Oberflächen angegriffen werden können) ist grundsätzlich zu verhindern.
- Im Idealfall sind getrennte Herstellungsbereiche für Baustahl und nichtrostenden Stahl zu verwenden. Es sollten nur Werkzeuge zum Einsatz kommen, die auch vorher nur bei nichtrostendem Stahl verwendet wurden (dies gilt insbesondere für Schleifscheiben und Drahtbürsten). Drahtbürsten und Stahlwolle sollten ebenfalls aus nichtrostendem Stahl sein und grundsätzlich aus einer Sorte, die eine mindestens gleichwertige Korrosionsbeständigkeit aufweist wie das zu bearbeitende Material (beispielsweise sollten keine ferritischen oder geringer legierten austenitischen Stahlbürsten für einen nichtrostenden Stahl mit einer höheren Korrosionsbeständigkeit verwendet werden).
- Als Vorsichtsmaßnahme für die Herstellung und Montage ist es empfehlenswert alle scharfen Grate, die bei Schneidarbeiten entstehen können, zu entfernen.
- Jegliche Anforderungen an den Schutz der verarbeiteten Bauprodukte während des Transportes sind zu beachten.

Hilfestellungen zur Beseitigung von Verunreinigungen sind in ASTM A380 gegeben.

## 11.5 Formgebung

Austenitische nichtrostende Stähle weisen eine deutliche Verfestigung beim Kaltumformen auf. Dies kann sowohl ein Vorteil sein, da große Verformungen beim Streckformen ohne das Risiko für einen vorzeitigen Bruch erreicht werden können, als auch ein Nachteil, wenn speziell bei der Bearbeitung von Stahlteilen besondere Aufmerksamkeit bei Schneidvorschüben und -geschwindigkeiten erforderlich wird. Der Grad der Kaltverfestigung variiert bei verschiedenen Stahlsorten, die Sorte 1.4318 beispielsweise verfestigt sich stärker als anderen Sorten, die im Bauwesen verwendet werden. Grundsätzlich ist es allerdings einfacher, ferritische nichtrostende Stähle in Form oder plan zu walzen als austenitische Stähle.

### 11.5.1 Schneiden

Nichtrostender Stahl ist im Vergleich zu anderen Metallen vergleichsweise teuer und beim Anreißen von Blechen sollte daher darauf geachtet werden, dass unnötiger Verschnitt vermieden wird. Zu beachten ist, dass mehr Verschnitt entstehen kann, wenn der Werkstoff eine ausgerichtete polierte Oberfläche (oder ein nur in eine Richtung verlaufendes Schleifbild) hat, welche bei der Verarbeitung beibehalten werden muss. Bestimmte Markierstifte/Markierkreiden können schwer zu entfernen sein bzw. Verfärbungen verursachen, wenn sie direkt auf der Stahloberfläche (anstelle auf einer Schutzfolie) verwendet werden, weshalb diese vor dem Gebrauch geprüft werden sollten, genau wie eventuelle Lösungsmittel, um die Markierungen wieder zu entfernen.

Nichtrostender Stahl kann mit den üblichen Verfahren geschnitten werden, beispielsweise durch Scherschneiden oder Sägen, wobei jedoch die Anforderungen an die Maschinenleistung aufgrund der Kaltverfestigung höher sind als bei Baustählen mit vergleichbaren Dicken. Falls möglich sollte nichtrostender Stahl im (weich-) geglühten Zustand geschnitten (und grundsätzlich auch bearbeitet) werden, um die Kaltverfestigung und damit den Werkzeugverschleiß zu minimieren.

Schneidverfahren mit Plasmalichtbögen sind besonders geeignet, um dicke Bleche sowie Profile bis zu einer Dicke von 125 mm zu schneiden bzw. wenn Schnittkanten bearbeitet werden sollen, z. B. zur Schweißnahtvorbereitung. Wasserstrahl-schneiden, bei dem weder eine Wärmeentwicklung noch Verformungen oder eine Beeinflussung der Materialeigenschaften auftreten, ist für nichtrostenden Stahl bis zu einer Dicke von 200 mm geeignet. Laserstrahlschneiden ist ebenfalls für nichtrostenden Stahl geeignet, insbesondere wenn geringere Toleranzen gefordert werden oder wenn unregelmäßige Formen oder Muster geschnitten werden sollen: beim Schneiden von Ecken kann eine gute Qualität erzielt werden, wobei das Risiko für Verformungen im Stahl gering bleibt. Für gerade Kanten werden üblicherweise Schneidmaschinen verwendet. Mit Schneidmaschinen, die an den Seiten offen sind, können Schnitte realisiert werden, die die tatsächliche Breite der Maschine überschreiten (durch Nachführen z. B. des Bleches), wobei jedoch das Risiko besteht, dass die Schnittkanten nicht exakt in einer Flucht liegen. Das Brennschneiden ist für nichtrostenden Stahl nicht geeignet, außer es wird ein Verfahren mit Flussmittelpulver angewandt.

### 11.5.2 Kaltumformen

Nichtrostender Stahl kann mit den üblichen Verfahren der Kaltumformung, wie z. B. Biegen, Drücken, Pressen oder Tiefziehen, relativ einfach in Form gebracht werden. Im Bauwesen ist das Abkanten das gebräuchlichste Verfahren zur Kaltumformung, obwohl ein Walzprofilieren von großen, dünnen Werkstücken wirtschaftlicher wäre.

Auch beim Biegen von nichtrostendem Stahl sind die Anforderungen an die Maschinenleistungen aufgrund der Kaltverfestigung höher als bei Baustahl (bei austenitischen Stählen ca. 50 % höher und bei Duplex-Stählen noch mehr). Außerdem muss nichtrostender Stahl um ein gewisses Maß weiter gebogen werden als das bei Baustahl der Fall ist, um die Rückverformungseigenschaften zu berücksichtigen. Ferritische nichtrostende Stähle verfestigen sich nicht maßgeblich beim Kaltumformen. Bei aufwendigen Bauteilen sollte der Hersteller so früh wie möglich in die Planung mit einbezogen werden.

Die hohe Duktilität von nichtrostendem Stahl erlaubt kleine Biegeradien, bei geglühten Werkstoffen können diese ungefähr die Hälfte der Werkstoffdicke betragen. Grundsätzlich wird empfohlen, die folgenden Mindestwerte für Innenradien zu verwenden:

$t$  bei austenitischen nichtrostenden Stählen,

$2t$  bei nichtrostenden Duplex-Stählen und

wobei  $t$  die Dicke des Materials ist.

Ähnlich wie bei Baustahl kann das Kaltumformen von nichtrostendem Stahl zu einer Verringerung der Festigkeit führen. Für den Fall, dass die Festigkeit entscheidend wird, sollte der Konstrukteur die Auswirkungen der Kaltumformung auf die Festigkeit des Materials berücksichtigen, beispielsweise durch Versuche an Probestücken. Bei austenitischen nichtrostenden Stählen ist die Verringerung der Festigkeit infolge des Kaltumformens nicht maßgebend.

Beim Biegen von kreisförmigen Hohlprofilen sollten grundsätzlich die folgenden Bedingungen eingehalten werden:

- das Verhältnis des Außendurchmessers zur Wanddicke  $d/t$  sollte einen Wert von 15 nicht überschreiten (um den Einsatz kostspieliger Werkzeuge zu vermeiden),
- der Biegeradius (bezogen auf die Mittelachse des Hohlprofils) sollte mindestens so groß sei, wie der Größere der beiden folgenden Werte:  
 $1,5d$  oder  $d + 100$  mm,
- alle Schweißwülste sollten in der Nähe der Schwerachse liegen, um die Biegespannungen in den Schweißnähten zu minimieren.

Der Rat einer bei Biegearbeiten fachkundigen Firma sollte einbezogen werden, wenn eventuell ein größeres  $d/t$ -Verhältnis oder kleinere Biegeradien verwendet werden sollen. Alternativ sollten geeignete Probeversuche durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass durch das Biegen keine Materialschäden entstehen und die Maßtoleranzen akzeptabel sind. Bei Hohlprofilen mit Durchmessern von  $d < 100$  mm können größere Biegeradien, z. B. mindestens  $2,5d$ , erlaubt werden. Es ist anzumerken, dass der Konstrukteur die Auswirkungen des Biegens auf den Beulwiderstand berücksichtigen sollte.

### 11.5.3 Löcher

Löcher können gebohrt, gestanzt oder durch Laserstrahlschneiden gefertigt werden. Beim Bohren sollte darauf geachtet werden, dass formschlüssig geschnitten wird, um eine Kaltverfestigung zu vermeiden, weshalb spitze Bohrköpfe mit geeigneten Spanwinkeln und passende Bohrgeschwindigkeiten gewählt werden sollten. Der Einsatz von runden, abgewinkelten Körnern wird nicht empfohlen, da hierbei die Oberfläche kaltverfestigt wird, stattdessen sollte ein Zentrierbohrer verwendet werden. Falls dennoch ein Körner verwendet werden muss, sollte dieser eine dreieckige Spitze haben. In austenitischem nichtrostenden Stahl können Löcher bis zu einer Dicke von ca. 20 mm gestanzt werden. Die höhere Festigkeit von nichtrostenden Duplex-Stählen führt hierbei zu kleineren maximalen Stanzdicken. Der Durchmesser für ein gestanztes Loch muss dabei mindestens 2 mm größer sein als die Dicke des Bleches.

## 11.6 Schweißen

### 11.6.1 Einführung

Dieses Kapitel gibt eine kurze Übersicht zum Schweißen von nichtrostenden Stählen. Die maßgebende Norm zum Schweißen von nichtrostendem Stahl ist EN 1011-3 *Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 3: Lichtbogenschweißen von nichtrostenden Stählen*.

Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich grundsätzlich gut mit den üblichen Verfahren schweißen solange geeignete Schweißzusätze verwendet werden. Bei nichtrostenden Duplex-Stählen muss die minimale bzw. maximale Wärmezufuhr beim Schweißen stärker überwacht werden und eventuell ist eine Wärmenachbehandlung der Schweißnaht bzw. sind spezielle Schweißzusätze erforderlich.

Eine grundsätzliche Sauberkeit ohne Verschmutzungen ist entscheidend, um eine gute Schweißqualität zu erzielen. Öle sowie Kohlenwasserstoffe, Schmutz und andere Fremdkörper, abziehbare Kunststofffolien und Wachskreidemarkierungen sollten entfernt werden, um zu verhindern, dass durch deren Zersetzung das Risiko für eine Kohlenstoffaufnahme bzw. für eine Verschmutzung der Schweißnaht-

oberfläche steigt. Die Schweißnaht sollte generell von Zink befreit werden einschließlich dem, welches beim Verzinken entsteht, sowie frei von Kupfer und dessen Legierungen sein. (Besondere Vorsicht sollte bei Schweißbadauflagen aus Kupfer gelten; an möglichen Kontaktstellen sollten Aussparungen in den Auflagen vorgesehen werden.)

Bei nichtrostenden Stählen ist es noch wichtiger als bei Baustählen, dass Situationen vermieden werden, in denen Spaltkorrosion entstehen kann (siehe Kapitel 3.2.2). Schweißfehler wie z. B. Einbrandkerben, fehlerhafte Durchschweißungen, Schweißspritzer, Schlacke oder Zündstellen sind grundsätzlich gefährdete Stellen für Spaltkorrosion und sollten daher möglichst vermieden werden. Zündstellen oder Funkenschläge durch fehlende Erdung können ebenfalls die Passivschicht beschädigen und daher das Risiko für Spaltkorrosion erhöhen, wodurch auch das Aussehen der Werkstücke gemindert wird.

Wenn das Aussehen der Schweißnaht relevant ist, sollte der Konstrukteur den erforderlichen Schweißzustand und die Oberflächenbeschaffenheit für das Werkstück angeben, da diese die Wahl des Schweißverfahrens sowie die Schweißnahtnachbehandlung beeinflussen können. Außerdem sind die Stellen, an denen geschweißt werden soll, zu berücksichtigen; es gilt zu überprüfen, ob eine geeignete Schweißnahtnachbehandlung grundsätzlich möglich ist.

Der Konstrukteur sollte beachten, dass der Schweißverzug bei nichtrostenden Stählen grundsätzlich größer ist als bei Baustählen (siehe Kapitel 11.6.4). Die Wärmezufuhr und die Zwischenlagentemperaturen sollten überwacht werden, um den Schweißverzug zu minimieren und um mögliche metallurgische Fehler zu vermeiden (siehe Kapitel 11.6.5).

Grundsätzlich sollte nur mit geeigneten Verfahren und immer mit einer Schweißanweisung (WPS) in Übereinstimmung mit dem maßgebenden Teil von entweder EN ISO 15609, EN ISO 14555 oder EN ISO 15620 geschweißt werden. Schweißer sollten gemäß EN ISO 9606-1 und Schweißpersonal zum automatischen Schweißen in Übereinstimmung mit EN ISO 14732 qualifiziert sein. EN 1090-2 gibt die erforderlichen technischen Kenntnisse für Schweißaufsichtspersonal an, welche von der Ausführungsklasse, der nichtrostenden Stahlsorte und der zu schweißenden Materialdicke abhängen.

Bei Schweißverfahren werden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Nachweis des Schweißverfahrens anhand detaillierter Angaben über die Regelungen und Prüfungsanforderungen für das gewählte Schweißverfahren,
- Qualifizierung der Schweißer,
- Kontrolle von Schweißvorgängen während der Vorbereitung, dem eigentlichen Schweißvorgang und der Schweißnahtnachbehandlung,
- erforderliche Anzahl an Überprüfungen und zerstörungsfreien Prüfverfahren,
- zulässige Grenze für die Anzahl bzw. den Schweregrad möglicher Schweißfehler.

Muttern sollten niemals mit Schrauben verschweißt werden, da die Werkstoffe aufgrund ihrer Festigkeit ausgewählt, jedoch nicht für ein Schmelzschweißen ausgelegt werden. Das Stauchen des Schraubengewindes (d. h. ein Verbreitern des Schraubenendes) ist eine geeignete Alternative für den Fall, dass die Mutter in Position gehalten werden soll.

## 11.6.2 Verfahren

Wie bereits erwähnt können die üblichen Schweißverfahren bei nichtrostenden Stählen angewendet werden. In Tabelle 11.1 sind verschiedene Verfahren und ihre Eignung für z. B. unterschiedliche Materialdicken usw. angegeben.

**Tabelle 11.1** Schweißverfahren und ihre Eignung

Schweißverfahren (EN ISO 4063)	Produktformen	Arten der Schweißverbindung	Grenzen der Materialdicke	Schweißlagen	Werkstatt-/Baustellenbedingungen
111 Lichtbogenhandschweißen (mit abgedeckter Elektrode)	Jede außer Bleche	Jede	3 mm <sup>1</sup> oder größer	Jede	Jede
121/122 Unterpulverschweißen	Jede außer Bleche	Jede	6 mm <sup>1</sup> oder größer	eben	Jede
131 Metall-Inertgasschweißen (MIG)	Jede	Jede	2 mm <sup>1</sup> oder größer	Jede	Jede <sup>2</sup>
136 Metall-Aktivgasschweißen mit Fülldrahtelektrode	Jede	Jede	2 mm <sup>1</sup> oder größer	Jede	Jede
141 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	Jede	Jede	Bis ca. 10 mm	Jede	Jede <sup>2</sup>
2 Widerstandsschweißen	nur Bleche	Jede	Bis ca. 3 mm	Jede	Jede
521/522 Festkörper-/Gas-Laserstrahlschweißen	Jede	Jede	abhängig vom Bauteil, bis 25 mm möglich	Jede	Nur Werkstatt
Anmerkungen:					
<sup>1</sup> Hängt von der gewählten Art der Schweißverbindung ab.					
<sup>2</sup> Witterungsempfindlicher als andere Verfahren, weshalb ein besserer Schutz gegen Umwelteinflüsse erforderlich ist.					

Austenitische und Duplex-Stähle werden grundsätzlich nicht vorgewärmt außer um Kondenswasser auf der Oberfläche verdampfen zu lassen.

Ferritische Sorten sind bei Temperaturen über 950°C anfällig gegenüber Grobkornbildung im Gefüge, wodurch es zu einer verringerten Festigkeit kommt. Um dem entgegenzuwirken, sollte die Wärmezufuhr gering bleiben, indem das Schmelzbad klein gehalten und mit hohen Geschwindigkeiten geschweißt wird. Mit einer geeigneten Regelung der Wärmezufuhr können widerstandsfähige Schweißnähte bei geringen Dicken bis ca. 2-3 mm erreicht werden. Grundsätzlich ist jedoch die Festigkeit des Materials bei geringeren Dicken größer.

## 11.6.3 Schweißzusätze

Die gängigen Schweißzusätze wurden entwickelt, um dem Schweißgut die gleiche Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu verleihen wie dem Grundwerkstoff und um das Risiko für Verfestigungsrisse zu minimieren. Bei speziellen Anwendungsfällen, wie z. B. ungewöhnlich aggressiven Umgebungsbedingungen oder wenn nichtmagnetische Eigenschaften erforderlich sind, sollten Stahlhersteller bzw. Hersteller von Schweißzusätzen um Rat gefragt werden. Alle Schweißzusätze sollten den Anforderungen der EN 1090-2 entsprechen. Es ist wichtig, dass Schweißzusätze frei von Verunreinigungen bleiben und gemäß den Angaben des

Herstellers gelagert werden. Jedes Schweißverfahren, beim dem ein Flussmittel verwendet wird (z. B. Lichtbogenhandschweißen (mit abgedeckter Elektrode), Unterpulverschweißen oder Metall-Aktivgasschweißen mit Fülldrahtelektrode), ist anfällig gegen Kondensationsnässe, wodurch die Schweißnaht porös werden kann. Für manche Schweißprozesse, wie das Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) oder das Laserstrahlschweißen, werden jedoch keine Schweißzusatzwerkstoffe benötigt.

Bei einer Verwendung von austenitischen Schweißzusatzwerkstoffen beim Schweißen von ferritischen Stählen entstehen Schweißnähte mit deutlich besseren Festigkeiten als bei einer Verwendung von ferritischen Schweißzusatzwerkstoffen. Das Schweißen von ferritischen nichtrostenden Stählen ohne Schweißzusatzwerkstoffe ist grundsätzlich möglich, obwohl dadurch eine geringere Korrosionsbeständigkeit, Duktilität sowie Festigkeit erzielt wird, weshalb dies nur mit Vorsicht durchgeführt werden sollte.

#### **11.6.4 Schweißverzug**

Genau wie andere Metalle leiden nichtrostende Stähle unter Schweißverzug. Die Arten des Verzugs (Winkel-, Wölbungs-, Schrumpfverzug usw.) sind grundsätzlich ähnlich wie bei Bauteilen aus Baustahl. Allerdings ist der Verzug bei nichtrostendem Stahl und besonders bei austenitischen Sorten aufgrund der größeren thermischen Dehnung und der geringeren Wärmeleitfähigkeit (wodurch es zu stärkeren Temperaturgefällen kommt) größer als bei Baustahl, siehe Kapitel 2.4. Nachdem sie erwärmt wurden, weisen ferritische Stähle einen geringeren Verzug auf als beispielsweise austenitische Stähle. Der Grad des Schweißverzuges bei nichtrostenden Duplex-Stählen liegt zwischen dem von austenitischen und ferritischen Stählen.

Da Schweißverzug nicht vollständig vermieden werden kann, sollte er durch die folgenden Maßnahmen begrenzt werden:

##### ***Maßnahmen durch den Konstrukteur***

- Schweißverbindungen möglichst vermeiden, beispielsweise durch - wenn möglich - die Wahl von warmgewalzten Profilen, Hohlprofilen oder lasergeschnittenen Profilen (Laserschneiden führt zu geringerem Verzug).
- Die Anzahl der Schweißverbindungen verringern.
- Die Größe der Schweißnähte reduzieren. Bei dicken Bauteilen z. B. indem Doppel V-Nähte, U-Nähte oder Doppel U-Nähte anstelle von einfachen V-Nähten verwendet werden.
- Symmetrische Verbindungen verwenden.
- Mit größeren Maßtoleranzen konstruieren.

##### ***Maßnahmen durch den Hersteller***

- Wirksame Spannvorrichtungen verwenden. Die Spannvorrichtungen sollten möglichst Kupfer- oder Aluminiumunterlegstangen besitzen, damit Wärme aus dem Schweißbereich abgeleitet werden kann.
- Falls wirksame Spannvorrichtungen nicht verfügbar sind, sollten nah beieinanderliegende Heftscheidungen mit gleichmäßiger Abfolge verwendet werden.
- Sicherstellen, dass vor dem Schweißen eine geeignete Bauteilmontage sowie Bauteilausrichtung durchgeführt wurde.

- Die geringste zulässige Wärmezufuhr für die gewählte Kombination aus Schweißverfahren, Material und Werkstückdicke verwenden.
- Gleichmäßiges Schweißen und geeignete Schweißfolgen anwenden (z. B. Schweißen mit dem Pilgerschrittverfahren oder abschnittsweises Schweißen).

### **11.6.5 Metallurgische Betrachtungen**

Im Nachfolgenden werden nicht die vollständigen metallurgischen Eigenschaften von nichtrostendem Stahl betrachtet, sondern nur einige besondere Merkmale.

#### ***Ausscheidungen im Gefüge von austenitischen nichtrostenden Stählen***

Die Wärmeeinflusszone bei austenitischen nichtrostenden Stählen ist verhältnismäßig widerstandsfähig gegenüber Grobkornbildung im Gefüge und gegenüber dem Ausscheiden von spröden, intermetallischen Phasen. Schweißverfahren sind üblicherweise so ausgelegt, dass die Zeit im kritischen Temperaturbereich, in dem Karbide ausgeschieden werden (450 – 900°C), begrenzt wird. Übermäßiges Nachschweißen verlängert erwartungsgemäß die Zeit im kritischen Temperaturbereich. Daher sollte i. d. R. nicht mehr als dreimal nachgeschweißt werden.

Die Bildung von Chromkarbid-Ausscheidungen und die daraus resultierende Verringerung der Korrosionsbeständigkeit wird in Kapitel 3.2.6 (*Interkristalline Korrosion (Sensibilisierung) und Schweißnahtversprödung*) beschrieben, wo ebenfalls angemerkt wird, dass dieses Phänomen üblicherweise nicht bei austenitischen nichtrostenden Stählen mit geringem Kohlenstoffanteil (z. B. 1.4307 oder 1.4404) auftritt. Versprödungserscheinungen der Schweißnaht können allerdings in geschweißten Verbindungen mit nichtrostenden Stählen, die einen durchschnittlichen oder hohen Kohlenstoffanteil besitzen, auftreten.

#### ***Verfestigungsrisse bei austenitischen nichtrostenden Stählen***

Verfestigungsrisse bei Schweißnähten können vermieden werden, wenn die Schweißnaht mindestens ca. 5 % Ferritanteil enthält. Stahlhersteller achten bei den üblichen austenitischen nichtrostenden Stählen auf eine ausgeglichene chemische Zusammensetzung sowie Wärmebehandlung, um sicherzustellen, dass wenig bis kein Ferrit enthalten ist, wenn die Stähle ausgeliefert werden, aber dass dennoch genügend Ferrit bei autogenen Schweißverfahren (d. h. beim Schweißen ohne Schweißzusatzwerkstoffe) gebildet werden kann. Um die Wahrscheinlichkeit für Rissbildung weiter zu verringern, ist es außerdem sinnvoll, den Wärmezufluss, die Zwischenlagentemperaturen und Zwänge bei autogenen Schweißverfahren zu minimieren. Bei dicken Bauteilen werden Schweißzusatzwerkstoffe verwendet. Der Einsatz von qualitativ hochwertigen Schweißzusätzen kann zusätzlich sicherstellen, dass eine ausreichende Menge an Ferrit gebildet werden kann. Üblicherweise ist es nicht notwendig die exakte Menge des entstandenen Ferrits zu bestimmen; geeignete Schweißverfahren und Schweißzusätze garantieren grundsätzlich, dass Verfestigungsrisse nicht auftreten.

#### ***Versprödung von nichtrostenden Duplex-Stählen***

Nichtrostende Duplex-Stähle sind anfällig für die 475°C-Versprödung und die  $\sigma$ -Phasen-Versprödung. Die 475°C-Versprödung entsteht, wenn Stahl in einem Temperaturbereich von ca. 400°C bis 550°C gehalten oder langsam innerhalb dieses Bereiches heruntergekühlt wird, wodurch die Zugfestigkeit und die Härte steigen, aber die Duktilität unter Zugbeanspruchung sowie die Kerbschlagfestigkeit sinken. Die  $\sigma$ -Phasen-Versprödung kann nach längerem Verbleib des Stahls in einem Temperaturbereich von ca. 565°C bis 900°C unter den entsprechenden Bedingungen auch bereits nach weniger als einer halben Stunde auftreten (abhängig von der

chemischen Zusammensetzung und den thermomechanischen Eigenschaften des Stahls). Die Auswirkungen der  $\sigma$ -Phasen-Versprödung sind bei Raumtemperatur oder bei Temperaturen unterhalb dieser am größten. Diese Art der Versprödung wirkt sich unter anderem negativ auf die Korrosionsbeständigkeit aus.

Sowohl die 475°C- als auch die  $\sigma$ -Phasen-Versprödung können mit geeigneten Schweißverfahren auf ein Minimum beschränkt werden; i. d. R. wird dabei eine maximale Zwischenlagentemperatur von 200°C empfohlen. Besondere Vorsicht sollte beim Schweißen von schweren Bauteilen gelten.

Um Versprödung grundsätzlich zu vermeiden, sollte nichtrostender Stahl nicht für längere Zeit Temperaturen von über 300°C ausgesetzt sein.

### **11.6.6 Nachbehandlung von Schweißnähten**

Die Wärmenachbehandlung von Schweißnähten bei nichtrostenden Stählen wird selten außerhalb von Werkstätten durchgeführt. Unter gewissen Umständen kann jedoch Spannungsarmglühen erforderlich sein. Allerdings kann jede Wärmebehandlung auch Risiken mit sich bringen, weshalb fachmännischer Rat zu Hilfe genommen werden sollte.

Die nachfolgend dargestellte Nachbearbeitung von Schweißnähten ist grundsätzlich notwendig, besonders wenn Lichtbogenschweißverfahren verwendet wurden. Dabei ist es wichtig, eine geeignete Nachbehandlungsmethode zu bestimmen, um unnötige Mehrkosten und einen möglicherweise gestörten Betrieb zu vermeiden. Nachbearbeitungsmethoden, die für alle Oberflächenbeschaffenheiten üblich sind, werden in Kapitel 11.8 angegeben.

Übliche Methoden zur Nachbearbeitung von Schweißnähten sind das Abbürsten und das Abschleifen. Das erforderliche Ausmaß der Nachbearbeitung sollte bereits durch den Hersteller auf ein Minimum reduziert werden. Leichtes Abschleifen mit einer feinen Scheibe ist dabei am sinnvollsten; zu viel Druck beim Abschleifen kann zum Erhitzen führen, wodurch die Korrosionsbeständigkeit negativ beeinflusst werden kann. Drahtbürsten sollten aus geeignetem nichtrostendem Stahl bestehen (siehe Kapitel 11.4). Intensives Abbürsten von Schweißnähten kann zu einer Verkrustung von Verunreinigungen auf der Oberfläche führen, wodurch das Korrosionsrisiko steigen kann.

Es ist übliche Praxis, alle Spuren von Anlauffarben zu beseitigen. Allerdings können gelbe Anlauffarben akzeptiert werden, wenn der nichtrostende Stahl eine für die Umgebungsbedingungen geeignete Widerstandsfähigkeit aufweist. Falls dies nicht der Fall ist oder wenn die Verfärbungen aus ästhetischen Gründen nicht akzeptiert werden können, sollten diese durch Beizen oder Glasperlenstrahlen entfernt werden. Beizen kann durch Eintauchen in ein Bad (siehe Kapitel 11.8) oder durch den Einsatz von Pasten in Übereinstimmung mit den Anweisungen des Herstellers durchgeführt werden.

Das Strahlen der Schweißnahtoberfläche ist eine vorteilhafte Nachbehandlungsmethode. Es sorgt für Druckspannungen in der Oberfläche, wodurch der Widerstand gegen Ermüdungs- und Spannungsrisskorrosion sowie das äußere Erscheinungsbild verbessert werden kann. Allerdings kann durch das Strahlen keine vorteilhafte Änderung im Ermüdungsnachweis gerechtfertigt werden.

Durch das Abtragen von Metall bei einer spannenden Bearbeitung werden Spannungen abgebaut, wodurch sich das Bauteil im geschweißten Zustand verformt. Falls diese Verformungen die Grenzen der Maßtoleranzen überschreiten, kann eine Wärmebehandlung erforderlich sein.

### 11.6.7 Schweißnahtprüfung

Ein Vergleich der üblicherweise angewandten Methoden zur Prüfung von Schweißnähten bei nichtrostenden Stählen und bei Baustählen ist in Tabelle 11.2 dargestellt.

Diese Methoden werden je nach Bedarf eingesetzt abhängig von der erforderlichen Tragfähigkeit bzw. Korrosionsbeständigkeit für die betrachteten Umgebungsbedingungen. Allerdings sollten während des gesamten Schweißprozesses visuelle Prüfungen stattfinden, da somit bereits viele Fehler verhindert werden können, die im weiteren Verlauf der Bearbeitung unangenehme Folgen hätten. Die Überprüfung der Oberflächen ist bei nichtrostenden Stählen wesentlich bedeutender als bei Baustählen, da nichtrostender Stahl in erster Linie wegen seiner Korrosionsbeständigkeit eingesetzt wird und weil selbst kleinste Oberflächenbeschädigungen das Risiko für Korrosion deutlich erhöhen können.

**Tabelle 11.2** Methoden zur Prüfung von Schweißnähten

Interaktionsraum der ZfP	austenitischer nichtrostender Stahl	nichtrostender Duplex-Stahl	ferritischer nichtrostender Stahl	Baustahl
Oberfläche	optische Prüfung Farbeindringprüfung	optische Prüfung Farbeindringprüfung Magnetpulverprüfung (MT)	optische Prüfung Farbeindringprüfung Magnetpulverprüfung (MT)	optische Prüfung Farbeindringprüfung Magnetpulverprüfung (MT)
Volumen	Durchstrahlungsprüfung (RT) (Röntgen-, Gammastrahlung)	Durchstrahlungsprüfung (RT) (Röntgen-, Gammastrahlung)	Durchstrahlungsprüfung (RT) (Röntgen-, Gammastrahlung)	Durchstrahlungsprüfung (RT) (Röntgen-, Gammastrahlung) Ultraschallprüfung (UT)
ANMERKUNG: ZfP: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung				

Die Magnetpulverprüfung ist keine geeignete Methode für nichtrostende austenitische Stähle, da diese nicht magnetisch sind. Die Ultraschallprüfung ist bei Schweißnähten aufgrund der problematischen Auswertung der Ergebnisse nur bedingt anwendbar; allerdings kann sie für den Grundwerkstoff angewendet werden. Die Durchstrahlungsprüfung mit Gammastrahlung eignet sich nicht zum Nachweis von Rissen oder Bindefehlern in Bauteilen aus nichtrostendem Stahl mit einer Dicke von weniger als 10 mm.

### 11.7 Fressen und Kaltverschweißen

Wenn Oberflächen unter Belastung aufeinander bewegt werden, kann es bei Verbindungsmitteln aufgrund lokaler Haftreibung und Brüchen an den Kontaktflächen mit nichtrostendem Stahl, Aluminium, Titan und anderen Legierungen, die von sich aus eine korrosionsbeständige Oxidschicht bilden, zum Fressen in den gepaarten Gewinden oder zu einer Kaltverfestigung kommen. Dies kann in einigen Fällen auch zum sogenannten Kaltverschweißen führen. Bei bestimmten Anwendungsfällen, bei denen keine Demontage vorgesehen und das Lösen von Verbindungsmitteln bautechnisch nicht erwünscht ist, kann dies ein Vorteil sein.

In bestimmten Situationen, in denen ein einfaches Entfernen der Verbindungsmittel für mögliche Reparaturen entscheidend ist, sollte das Fressen vermieden werden. Im Folgenden sind mögliche Maßnahmen angegeben, um die oben genannten Probleme bei nichtrostenden Stählen zu reduzieren:

- Niedrige Drehzahlen während der Montage verwenden.
- Darauf achten, dass Gewinde möglichst leichtgängig sind.
- Innere und äußere Gewinde mit Schmiermitteln bearbeiten, die Molybdändisulfid, Glimmer, Graphit, Talk oder eine geeignete handelsübliche Montagepaste enthalten. (Allerdings sollte darauf geachtet werden, dass ein handelsübliches Produkt zur Vermeidung des Fressens für den jeweiligen Anwendungsfall geeignet ist.)
- Unterschiedliche nichtrostende Stahlsorten verwenden (d. h. unterschiedliche chemische Zusammensetzungen, Kaltverfestigungsgeschwindigkeiten bzw. Härtegrade). Beispielsweise können A2-C2, A4-C4 oder A2-A4 Kombinationen aus Schrauben und Muttern gemäß EN ISO 3506 verwendet werden.
- In schwerwiegenden Fällen handelsübliche, stark kaltverfestigte Legierungen von nichtrostenden Stählen für eine oder sogar beide Kontaktflächen (z. B. S21800 auch bekannt als Nitronic© 60) verwenden oder eine feste Oberflächenbeschichtung aufbringen.

Es wird empfohlen, dass der Schraubenwerkstoff kaltverfestigt ist und mindestens der Festigkeitsklasse 70 entspricht (siehe Tabelle 2.6). Weichgeglühte Schraubenwerkstoffe sollten aufgrund ihres Risikos bzgl. Fressen nicht verwendet werden. Durch den Einsatz von gedrehten anstelle von geschnittenen Gewinden und durch das Vermeiden von Feingewinden sowie passgenauen Gewindeformen kann das Risiko bzgl. Fressen reduziert werden.

## 11.8 Oberflächenbearbeitung

Die Oberflächenbearbeitung von nichtrostenden Stählen ist ein wichtiges Bemessungskriterium und sollte entsprechend den architektonischen oder funktionellen Anforderungen klar definiert werden. Dabei empfiehlt es sich bereits frühzeitig, die entsprechenden Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit zu berücksichtigen. Alle Vorsichtsmaßnahmen, die bereits im Vorfeld während der Bearbeitung und beim Schweißen getroffen werden, zahlen sich später aus, denn mit steigender Oberflächenqualität erhöhen sich auch die entsprechenden Kosten. Beispielsweise kann eine Schweißnaht für den Fall, dass zwei Rohre eines Handlaufs oder Geländers miteinander verschweißt werden sollen, in einem Pfosten versteckt werden, sodass die Kosten für die Oberflächenbearbeitung reduziert werden und eine erhebliche Verbesserung des Erscheinungsbildes erreicht wird. Wenn Oberflächenbearbeitungen wie Polieren, Schleifen oder andere, außer Werkstattbearbeitungen und Strahlen, erforderlich sind, ist es grundsätzlich für entsprechende Bearbeitungsbetriebe am kostengünstigsten, die Oberflächenbearbeitung vor einer Weiterverarbeitung der Bauteile durchzuführen. Beispielsweise können warmgewalzte Winkel- und U-Profile, Hohlprofile, Rohre und Bleche poliert werden, bevor sie geschweißt oder mit anderen Bauteilen verbunden werden.

Die Oberflächen von nichtrostenden Stählen sollten von allen Schweißrückständen und Verunreinigungen befreit werden, um die ursprüngliche Korrosionsbeständigkeit wiederherzustellen. Beim Beizen im Säurebad lösen sich alle Schweißrückstände, sodass diese mit einer herkömmlichen Bürste entfernt werden können, allerdings kann durch das Beizen die Oberflächenbeschaffenheit matter werden. Zusätzlich werden beim Beizen auch alle an der Oberfläche eingelagerten Eisen- oder Baustahlpartikel aufgelöst die, wenn sie nicht vorher entfernt wurden, Rostflecken auf der Oberfläche von nichtrostendem Stahl hinterlassen.

Spanende Bearbeitungen wie Schleifen, Polieren und Aufrauen erzeugen einseitig gerichtete Oberflächenstrukturen, wodurch das optische Anpassen von Schweißnähten auf Blechen mit gewalzten Oberflächen problematisch werden kann. Um eine entsprechende Methode für die jeweils geeignete Oberflächenbearbeitung zu bestimmen, können Versuche erforderlich werden. Laserstrahlschweißen ist bei ästhetischen Komponenten grundsätzlich besser geeignet, da hierbei die Schweißnähte weniger zu erkennen sind.

Elektrolytisches Polieren erzeugt eine blanke, glänzende Oberfläche ähnlich wie bei stark aufgerauten Oberflächen. Dabei wird eine dünne Schicht der Oberfläche zusammen mit vorhandenen schwachen Oxiden entfernt. Starke Oxide müssen jedoch vorher durch Beizen oder Schleifen entfernt werden, um sicherzustellen, dass nach dem elektrolytischen Polieren ein einheitliches Aussehen erzeugt wird. Wenn die Bauteilabmessungen es zulassen, erfolgt das elektrolytische Polieren durch Eintauchen in einen mit einem Elektrolyt gefüllten und mit elektrischen Anschlüssen versehenen Tank. Tragbare Geräte können verwendet werden, um einzelne Stellen mit Anlauffarben in geschweißten Bereichen zu entfernen oder um nur bestimmte Bereiche zu polieren. Es gibt noch weitere Methoden zur Oberflächenbearbeitung (Elektroplattieren (Galvanisieren), Trommellackieren, Ätzen, Einfärben und Schwarzfärben (Brünieren bei Baustahl)), aber diese kommen für nichtrostenden Stahl im Bauwesen eher nur selten zum Einsatz und werden daher hier nicht weiter beschrieben.

Aufgrund der Bedeutung wird nochmals darauf hingewiesen, dass Oberflächen im montierten Zustand frei von Verunreinigungen sein sollten. Besonders die Möglichkeit für Verunreinigungen durch die Bearbeitung von benachbarten Baustahlkomponenten, insbesondere durch Schleifstaub oder durch Funken beim Trennschleifen, sollte berücksichtigt werden. Dementsprechend sollte entweder der nichtrostende Stahl mit einer abziehbaren Kunststoffolie geschützt werden oder in den Vertragsunterlagen sollte eine abschließende Reinigung nach Fertigstellung des Bauwerks festgelegt sein.

# ANHANG A Zuordnung der Bezeichnungen von nichtrostenden Stählen

Die Bezeichnungen von nichtrostenden Stählen gemäß EN 10088 sowie amerikanische Bezeichnungen (ASTM und UNS) sind in Tabelle A.1 dargestellt.

**Tabelle A.1** *Bezeichnungen von nichtrostenden Stählen – Zuordnung europäischer und amerikanischer Bezeichnungen*

Stahlsortenbezeichnung gemäß EN 10088		Amerikanische Bezeichnungen	
Werkstoffnummer	Bezeichnung	Bezeichnung gemäß ASTM	Bezeichnung nach UNS
<b>Austenit</b>			
1.4301	X5CrNi18-10	304	S30400
1.4306	X2CrNi19-11	304L	S30403
1.4307	X2CrNi18-9	304L	S30403
1.4311	X2CrNi18-10	304LN	S30453
1.4318	X2CrNi18-7	301LN	S30153
1.4401	X5CrNi Mo17-12-2	316	S31600
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	S31603
1.4406	X2CrNiMoN17-11-2	316LN	S31653
1.4429	X2CrNiMoN17-13-3	316LN	S31653
1.4432	X2CrNiMo17-12-3	316L	S31603
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	316L	-
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	317LMN	S31726
1.4529	X1NiCrMoCuN25-20-7	-	N08926
1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5	904 L	N08904
1.4541	X6CrNiTi18-10	321	S32100
1.4547	X1CrNiMoCuN20-18-7	-	S31254
1.4565	X2CrNiMnMoN25-18-6-5	-	S34565
1.4567 *	X3CrNiCu18-9-4		S30430
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316Ti	S31635
1.4578 *	X3CrNiCuMo17-11-3-2	-	-
<b>Duplex</b>			
1.4062 *	X2CrNiN22-2--		S32202
1.4162	X2CrMnNiN21-5-1		S32101
1.4362	X2CrNiN23-4	2304#	S32304
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	2507#	S32750
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	2205#	S32205
1.4482 *	X2CrMnNiMoN21-5-3		-
1.4501 *	X2CrNiMoCuWN25-7-4		S32760
1.4507 *	X2CrNiMoCuWN25-7-4		S32520
1.4662 *	X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2		S82441
<b>Ferrit</b>			
1.4003	X2CrNi12	-	S41003
1.4016	X6Cr17	430	S43000
1.4509	X2CrTiNb18	441+	S43940
1.4512	X2CrTi12	409	S40900
1.4521	X2CrMoTi18-2	444	S44400
1.4621 *	X2CrNbCu21	-	S44500
Die angegebenen Stahlsorten entsprechen EN 10088-4/-5 nur die mit * markierten entsprechen zurzeit EN 10088-2/-3. #: Übliche Handelsnamen. +: 441 ist ein üblicher Handelsname für diese Sorte aber keine Sorte gemäß ASTM.			



## ANHANG B Festigkeitssteigerung von kaltumgeformten Bauteilen

Die folgenden Gleichungen können grundsätzlich bei allen kaltumgeformten Bauteiltypen angewendet werden.

Die Kaltverfestigung, die beim Kaltumformen von Bauteilen entsteht, kann bei der Querschnitts- und Bauteilbemessung ausgenutzt werden, indem die Streckgrenze  $f_y$  durch eine erhöhte mittlere Streckgrenze  $f_{ya}$  ersetzt wird. Für den Knicknachweis bei Stützen sollte  $f_{ya}$  in Verbindung mit den Werten aus Tabelle 6.1 gemäß den Knicklinien für Biegeknicken verwendet werden. Die Verfahren in diesem Anhang sollten nur in Übereinstimmung mit den Bestimmungen in den Nationalen Anhängen zu EN 1993-1-4 angewendet werden. Sie basieren auf weitreichenden, grundlegenden Untersuchungsergebnissen und decken eine große Anzahl an Querschnittstypen ab.

Die zusätzliche Festigkeitssteigerung, die durch die Kaltverfestigung während der Nutzung entsteht, kann ebenfalls bei der Bemessung berücksichtigt werden, indem die „Continuous Strength Method“ (CSM) wie in 0 beschrieben angewendet wird.

a) Bei Bauteilen aus nichtrostendem Stahl, die mit einer Biegepresse hergestellt wurden, kann eine erhöhte mittlere Streckgrenze  $f_{ya}$  angesetzt werden, um die Kaltverfestigung in rechtwinkligen Ecken ( $90^\circ$ ) zu berücksichtigen:

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,pb} + f_y (A - A_{c,pb})}{A} \quad (\text{B.1})$$

b) Bei kaltgewalzten Rechteckhohlprofilen (RHS) aus nichtrostendem Stahl kann eine erhöhte mittlere Streckgrenze  $f_{ya}$  angesetzt werden, um die Kaltverfestigung in den ebenen Querschnittsteilen und in den erweiterten Eckbereichen zu berücksichtigen:

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf} (A - A_{c,rolled})}{A} \quad (\text{B.2})$$

c) Bei kaltgewalzten kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) aus nichtrostendem Stahl kann eine erhöhte mittlere Streckgrenze  $f_{ya}$  angesetzt werden, um die Kaltverfestigung während der Herstellung zu berücksichtigen:

$$f_{ya} = f_{yCHS} \quad (\text{B.3})$$

Dabei gilt:

- $f_y$  Streckgrenze des unverformten Materials (d. h. das ebene Blech oder Band aus dem die Bauteile durch Kaltumformung hergestellt werden, siehe Tabelle 2.2),
- $f_{yc}$  zu erwartende erhöhte Streckgrenze in den Eckbereichen,
- $f_{yf}$  zu erwartende erhöhte Streckgrenze in den ebenen Querschnittsteilen,
- $f_{yCHS}$  zu erwartende erhöhte Streckgrenze eines kreisförmigen Hohlprofiles (CHS),

- $A$  Bruttoquerschnittsfläche des Bauteils,
- $A_{c,pb}$  gesamte Querschnittsfläche der Eckbereiche bei einem mit einer Biegepresse hergestellten Bauteil,
- $A_{c,rolled}$  gesamte Querschnittsfläche der Eckbereiche eines kaltgewalzten Rechteckhohlprofiles (RHS) einschließlich zusätzlicher Bereiche der Länge  $2t$  jeweils an beiden Seiten des Eckbereiches.

(i) Ermittlung von  $f_{yc}$ ,  $f_{yf}$  und  $f_{yCHS}$

$$f_{yc} = 0,85K (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{mit} \quad f_y \leq f_{yc} \leq f_u \quad (\text{B.4})$$

$$f_{yf} = 0,85K (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{mit} \quad f_y \leq f_{yf} \leq f_u \quad (\text{B.5})$$

$$f_{yCHS} = 0,85K (\varepsilon_{CHS} + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{mit} \quad f_y \leq f_{yCHS} \leq f_u \quad (\text{B.6})$$

Dabei gilt:

- $\varepsilon_c$  Dehnung, die beim Kaltumformen in den Eckbereichen entsteht,
- $\varepsilon_f$  Dehnung, die beim Kaltumformen in den ebenen Querschnittsteilen eines Rechteckhohlprofiles (RHS) entsteht,
- $\varepsilon_{CHS}$  Dehnung, die beim Kaltumformen in einem kreisförmigen Hohlprofil (CHS) entsteht.

Die genannten Dehnungen lassen sich wie folgt bestimmen:

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2(2r_i + t)} \quad (\text{B.7})$$

$$\varepsilon_f = \left[ \frac{t}{900} \right] + \left[ \frac{\pi t}{2(b + h - 2t)} \right] \quad (\text{B.8})$$

$$\varepsilon_{CHS} = \frac{t}{2(d - t)} \quad (\text{B.9})$$

$$\varepsilon_{p0,2} = 0,002 + \frac{f_y}{E} \quad (\text{B.10})$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}} \quad (\text{B.11})$$

$$n_p = \frac{\ln(f_y/f_u)}{\ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)} \quad (\text{B.12})$$

Dabei gilt:

- $f_u$  Zugfestigkeit des unverformten Materials (d. h. das ebene Blech oder Band aus dem die Bauteile durch Kaltumformung hergestellt werden, siehe Tabelle 2.2),
- $\varepsilon_u$  Maximaldehnung zugehörig zur Zugfestigkeit  $f_u$  gemäß Gleichung (C.6) und Gleichung (C.7),
- $r_i$  innerer Eckradius, der - falls nicht bekannt - mit  $2t$  angesetzt werden darf.

(ii) Ermittlung der gesamten Querschnittsflächen der Eckbereiche  $A_{c,pb}$  und  $A_{c,rolled}$

$$A_{c,pb} = \left( n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) \quad (\text{B.13})$$

$$A_{c,rolled} = \left( n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) + 4n_c t^2 \quad (\text{B.14})$$

wobei  $n_c$  die Anzahl der rechtwinkligen Ecken ( $90^\circ$ ) in einem Bauteil ist.



## ANHANG C Beschreibung des Materialverhaltens

Die Spannungs-Dehnungs-Kurve unter Berücksichtigung der Kaltverfestigung kann mit Hilfe der folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left[ \frac{\sigma}{f_y} \right]^n \quad \text{für } \sigma \leq f_y \quad (\text{C.1})$$

$$\varepsilon = 0,002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u \left[ \frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right]^m \quad \text{für } f_y < \sigma \leq f_u \quad (\text{C.2})$$

Dabei gilt:

$\sigma$  technische Spannung,

$\varepsilon$  technische Dehnung,

$E, f_y$  bzw.  $f_u$  angegeben in Kapitel 2.3.1 oder EN 10088,

$n$  Beiwert der entweder aus Tabelle 6.4 entnommen oder wie nachfolgend dargestellt anhand von gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien bestimmt werden darf:

$$n = \frac{\ln(4)}{\ln \left[ \frac{f_y}{R_{p0,05}} \right]} \quad (\text{C.3})$$

Dabei gilt:

$R_{p0,05}$  0,05 %-Dehngrenze.

Aktuell wird in EN 1993-1-4 eine weniger zutreffende Formel (Gleichung (C.4)) für  $n$  verwendet, die auf der 0,01 %-Dehngrenze  $R_{p0,01}$  basiert. Es wird daher erwartet, dass diese in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 durch Gleichung (C.3) ersetzt wird.

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln \left[ \frac{f_y}{R_{p0,01}} \right]} \quad (\text{C.4})$$

$E_y$  Tangentenmodul der Spannungs-Dehnungs-Kurve bei Erreichen der Streckgrenze ermittelt mit:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002n \left[ \frac{E}{f_y} \right]} \quad (\text{C.5})$$

$\varepsilon_u$  Maximaldehnung zugehörig zur Zugfestigkeit  $f_u$ , welche mit folgender Näherung ermittelt werden kann:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u} \quad \text{für austenitische und Duplex-Stähle,} \quad (\text{C.6})$$

$$\varepsilon_u = 0,6 \left[ 1 - \frac{f_y}{f_u} \right] \quad \text{für ferritische Stähle,} \quad (\text{C.7})$$

jedoch mit  $\varepsilon_u \leq A$ , wobei  $A$  die Bruchdehnung nach EN 10088 ist.

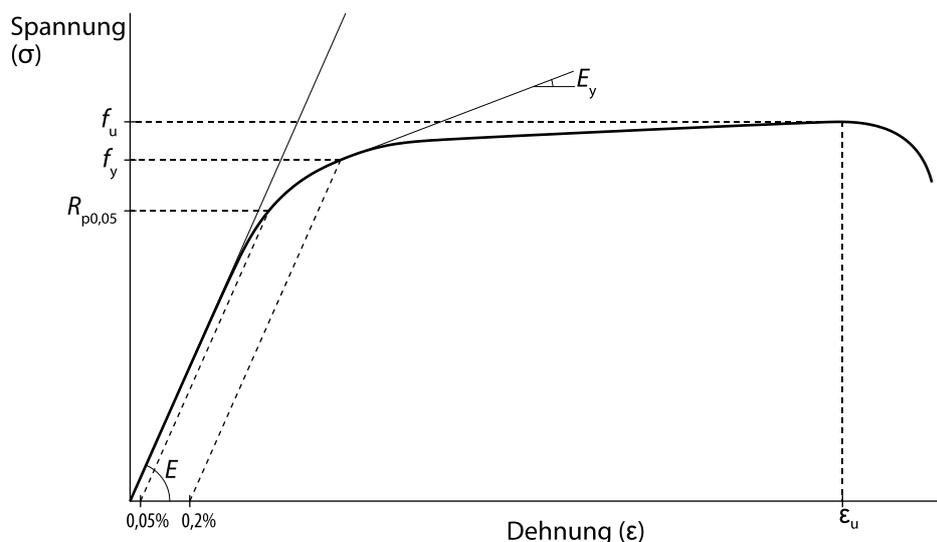
Aktuell enthält EN 1993-1-4 ausschließlich Gleichung (C.6). Allerdings zeigen aktuelle Forschungen, dass diese Formel für ferritische nichtrostende Stähle unzutreffend ist. Es wird daher erwartet, dass in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 Gleichung (C.7) hinzugefügt wird.

$$m = 1 + 2,8 \frac{f_y}{f_u} \quad \text{für jede nichtrostende Stahlsorte} \quad (C.8)$$

EN 1993-1-4 enthält aktuell die folgende weniger zutreffende Formel für den Beiwert  $m$  (Gleichung (C.9)). Es wird daher erwartet, dass diese in der nächsten Überarbeitung von EN 1993-1-4 durch Gleichung (C.8) ersetzt wird.

$$m = 1 + 3,5 \frac{f_y}{f_u} \quad (C.9)$$

Abbildung C.1 zeigt die maßgebenden Werte zur Beschreibung des Materialverhaltens.



**Abbildung C.1** Maßgebende Werte zur Beschreibung des Materialverhaltens

Wenn Werte für  $f_y$  anhand von gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien verfügbar sind, kann  $f_u$  mit den folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\frac{f_y}{f_u} = 0,2 + 185 \frac{f_y}{E} \quad \text{für austenitische und Duplex-Stähle,} \quad (C.10)$$

$$\frac{f_y}{f_u} = 0,46 + 145 \frac{f_y}{E} \quad \text{für ferritische Stähle.} \quad (C.11)$$

Grundsätzlich sollten die Nennwerte der Materialeigenschaften für eine FEM basierte Bemessung verwendet werden (Fall 1 in Tabelle C.1). Bei einer solchen Bemessung mit Materialeigenschaften, die anhand von Versuchen ermittelt wurden, kann entsprechend der Fälle 2 bis 4 in Tabelle C.1 verfahren werden, abhängig davon welche Werte gemessen wurden.

**Tabelle C.1** Möglichkeiten zur Definition der Spannungs-Dehnungs-Kurven

Art der FEM basierten Berechnung	$E$	$f_y$	$f_u$	$\varepsilon_u$	$n$	$m$
Fall 1. Bemessung anhand von Nennwerten	Kapitel 2.3.1	Kapitel 2.3.1	Kapitel 2.3.1	Gl. (C.6) oder (C.7)	Tabelle 6.4	Gl. (C.8)
Fall 2. Bemessung nur mit gemessener Streckgrenze $f_y$	Kapitel 2.3.1	gemessen	Gl. (C.10) oder (C.11)	Gl. (C.6) oder (C.7)	Tabelle 6.4	Gl. (C.8)
Fall 3. Bemessung mit gemessenen Werten für $E$ , $f_y$ und $f_u$	gemessen	gemessen	gemessen	Gl. (C.6) oder (C.7)	Tabelle 6.4	Gl. (C.8)
Fall 4. Bemessung/ Modellbeschreibung mit vollständig gemessener Spannungs-Dehnungs-Kurve, z. B. zur Bestätigung eines FEM Modells	gemessen	gemessen	gemessen	gemessen	gemessen oder geeignet durch eine Regressionsanalyse oder Gl. (C.3)	gemessen oder geeignet durch eine Regressionsanalyse

Die folgenden Formeln können verwendet werden, um eine wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve anhand einer technischen Spannungs-Dehnungs-Kurve zu ermitteln:

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (C.12)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (C.13)$$

Einige kommerzielle FEM Berechnungsprogramme benötigen Materialdefinitionen, die auf dem plastischen Bereich des Materialmodells basieren. In diesem Fall sollten Spannungen und Dehnungen, die an der Proportionalitätsgrenze des Materials beginnen, verwendet werden. Die plastische Dehnung bei einem entsprechenden Spannungsniveau kann mit Hilfe von Gleichung (C.14) ermittelt werden, und die Proportionalitätsgrenze kann als die Spannung angenommen werden, die bei einer plastischen Dehnung von  $\varepsilon_{pl} = 1 \times 10^{-4}$  erreicht wird.

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon - \frac{f_y}{E} \quad (C.14)$$



# ANHANG D „Continuous Strength Method“

## D.1 Allgemeines

Die „Continuous Strength Method“ (CSM) ist ein auf Verformungen basierender Bemessungsansatz, bei dem die Vorteile der Verfestigung und der Bauteilinteraktion zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit berücksichtigt werden. Ein elastisch, linear verfestigtes Materialmodell für die CSM ist in Kapitel D.2 definiert, während die Basiskurven der CSM zur Ermittlung der Grenzdehnung eines Querschnitts unter definierten Beanspruchungen in Kapitel D.3 dargestellt sind. In den Kapiteln D.4, D.5 und D.6 werden die Bemessungsformeln zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit angegeben.

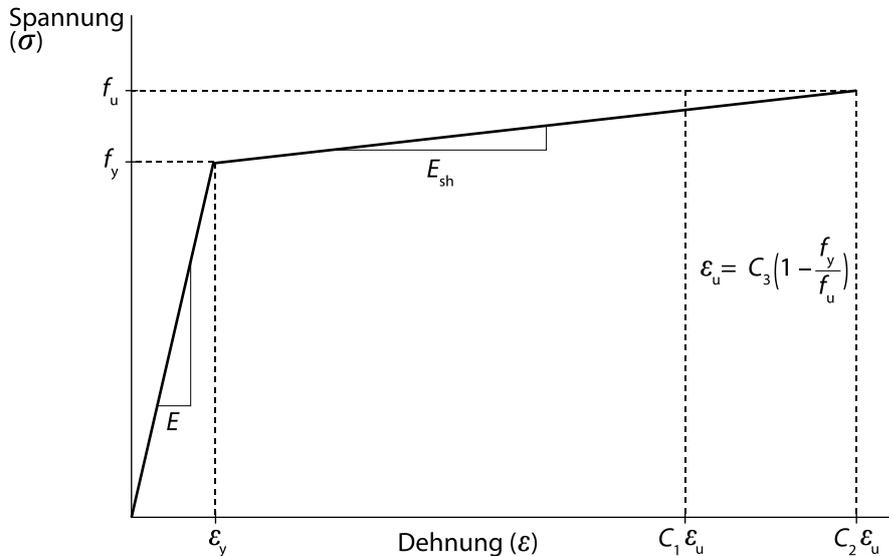
In diesem Anhang werden die Tragfähigkeiten von Querschnitten mit ebenen Abschnitten (z. B. doppelsymmetrische I-Profile, Rechteckhohlprofile (RHS), einfachsymmetrische U- und T-Profile und unsymmetrische Winkelprofile) und kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) unter sowohl einzelnen als auch unter kombinierten Beanspruchungen angegeben. Bei symmetrischen Querschnitten mit geringen bezogenen Schlankheiten bietet die CSM deutliche Vorteile gegenüber den Regeln zur Querschnittsbemessung in Kapitel 5. Im Gegensatz dazu sind allerdings die Vorteile bei Querschnitten mit ebenen Abschnitten und bezogenen Schlankheiten größer als 0,68 und bei kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) mit bezogenen Schlankheiten größer als 0,30 eher gering. Bei unsymmetrischen Querschnitten können unabhängig von der bezogenen Schlankheit deutliche Vorteile erreicht werden.

Bei kaltgeformten Querschnitten kann in diesem Anhang die erhöhte mittlere Streckgrenze  $f_{ya}$  des Querschnitts gemäß 0 anstelle der Streckgrenze  $f_y$  verwendet werden.

Die Angaben in diesem Anhang gelten nur für die statische Bemessung bei Raumtemperatur. Kriterien der Gebrauchstauglichkeit können bei der Bemessung ebenfalls maßgebend werden und sollten demnach zusätzlich betrachtet werden.

## D.2 Definition des Materials

Das elastisch, linear verfestigte Materialmodell für die „Continuous Strength Method“ basierend auf drei materialabhängigen Konstanten ( $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$ ) ist in Abbildung D.1 dargestellt. Die materialabhängigen Konstanten sind in Tabelle D.1 angegeben.



**Abbildung D.1** Elastisch, linear verfestigtes Materialmodell für die CSM

Die Parameter sind wie folgt definiert:

$f_y$  Streckgrenze,

$\varepsilon_y$  Dehnung zugehörig zur Streckgrenze mit  $\varepsilon_y = f_y/E$ ,

$E$  Elastizitätsmodul,

$E_{sh}$  Neigung des linearen Verfestigungsbereichs,

$f_u$  Zugfestigkeit,

$\varepsilon_u$  Maximaldehnung zugehörig zur Zugfestigkeit  $f_u$  mit  $\varepsilon_u = C_3(1 - f_y/f_u)$ .

**Tabelle D.1** Materialabhängige Konstanten für das CSM-Materialmodell

Nichtrostende Stahlsorte	$C_1$	$C_2$	$C_3$
Austenit	0,10	0,16	1,00
Duplex	0,10	0,16	1,00
Ferrit	0,40	0,45	0,60

Die Neigung des linearen Verfestigungsbereichs wird wie folgt ermittelt:

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \varepsilon_u - \varepsilon_y} \quad (D.1)$$

## D.3 Grenzdehnung eines Querschnitts

### D.3.1 Basiskurve

Die Basiskurve stellt das Verhältnis der bezogenen Grenzdehnung eines Querschnitts  $\varepsilon_{\text{csm}}/\varepsilon_y$ , die zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit erforderlich ist, und der bezogenen Schlankheit des Querschnitts dar. Die Basiskurve wird für Querschnitte mit ebenen Abschnitten durch Gleichung (D.2) und für kreisförmige Hohlprofile (CHS) durch Gleichung (D.3) beschrieben.

$$\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,68 \\ \left(1 - \frac{0,222}{\bar{\lambda}_p^{1,050}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_p^{1,050}} & \text{für } \bar{\lambda}_p > 0,68 \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

$$\frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} = \begin{cases} \frac{4,44 \times 10^{-3}}{\bar{\lambda}_c^{4,5}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \varepsilon_u}{\varepsilon_y}\right) & \text{für } \bar{\lambda}_c \leq 0,30 \\ \left(1 - \frac{0,224}{\bar{\lambda}_c^{0,342}}\right) \frac{1}{\bar{\lambda}_c^{0,342}} & \text{für } \bar{\lambda}_c > 0,30 \end{cases} \quad (\text{D.3})$$

Dabei gilt:

- $\bar{\lambda}_p$  bezogene Schlankheit für Querschnitte mit ebenen Abschnitten,
- $\bar{\lambda}_c$  bezogene Schlankheit für kreisförmige Hohlprofile (CHS).

### D.3.2 Bezogene Schlankheit eines Querschnitts

Die bezogene Schlankheit eines Querschnitts wird wie folgt ermittelt:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{f_y / f_{\text{cr},p}} \quad \text{für Querschnitte mit ebenen Abschnitten,}$$

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{f_y / f_{\text{cr},c}} \quad \text{für kreisförmige Hohlprofile (CHS).}$$

Bei Querschnitten mit ebenen Abschnitten kann die elastische Beulspannung des kompletten Querschnitts unter definierten Beanspruchungen numerisch ermittelt werden (z. B. mit Hilfe der Software CUFSM, welche auf finiten Streifenelementen basiert und unter [www.ce.jhu.edu/bschaffer/cufsm](http://www.ce.jhu.edu/bschaffer/cufsm) verfügbar ist). Alternativ kann die elastische Beulspannung auch, wie im Folgenden dargestellt, konservativ als die Beulspannung des ebenen Abschnitts des Querschnitts mit der größten bezogenen Schlankheit berechnet werden:

$$f_{\text{cr},p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} \quad (\text{D.4})$$

Dabei gilt:

- $\bar{b}$  ebene Breite des Querschnittsteils,
- $t$  Dicke des ebenen Querschnittsteils,
- $\nu$  Querdehnzahl (Poissonzahl),
- $k_\sigma$  Beulwert entsprechend dem Spannungsverhältnis  $\psi$  und den Randbedingungen gemäß Tabelle 5.3 für beidseitig bzw. Tabelle 5.4 für einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile.

Bei kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) kann die elastische Beulspannung des kompletten Querschnitts unter Druck-, Biegebeanspruchung oder einer Kombination der beiden wie folgt ermittelt werden:

$$f_{cr,c} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{2t}{D} \quad (D.5)$$

Dabei gilt:

- $D$  Durchmesser des kreisförmigen Hohlprofils (CHS),
- $t$  Dicke des kreisförmigen Hohlprofils (CHS).

## D.4 Querschnittstragfähigkeit unter Druckbeanspruchung

Bei Querschnitten mit ebenen Abschnitten und einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_p \leq 0,68$  und bei kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) mit einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_c \leq 0,30$ , was einer bezogenen Grenzdehnung des Querschnitts von  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y \geq 1,0$  entspricht, wird der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit eines druckbeanspruchten Querschnitts wie folgt ermittelt:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} \quad (D.6)$$

Dabei gilt:

- $A$  Querschnittsfläche,
- $f_{csm}$  Bemessungswert der Spannung zugehörig zur Verformungsgrenze  $\varepsilon_{csm}$  mit:

$$f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y (\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y - 1) \quad (D.7)$$

Bei Querschnitten mit ebenen Abschnitten und einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_p > 0,68$  und bei kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) mit einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_c > 0,30$ , was einer bezogenen Grenzdehnung des Querschnitts von  $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y < 1,0$  entspricht, wird der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit eines druckbeanspruchten Querschnitts wie folgt ermittelt:

$$N_{c,Rd} = N_{csm,Rd} = \frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (D.8)$$

## D.5 Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung

### D.5.1 Biegung um eine Symmetrieachse

Bei doppelsymmetrischen (z. B. I-Profile, Rechteck- (RHS) und kreisförmige Hohlprofile (CHS)) sowie einfachsymmetrischen Querschnitten (U- und T-Profile) unter Biegebeanspruchung um eine Symmetrieachse wird die Grenzdehnung  $\varepsilon_{\text{csm}}$  mit Gleichung (D.2) oder Gleichung (D.3) ermittelt.

Bei Querschnitten mit einer bezogenen Grenzdehnung von  $\varepsilon_{\text{csm}}/\varepsilon_y \geq 1,0$  wird der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Querschnitts unter Biegung um eine Symmetrieachse wie folgt ermittelt:

$$M_{\text{c,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}} = \frac{W_{\text{pl}} f_y}{\gamma_{\text{M0}}} \left[ 1 + \frac{E_{\text{sh}}}{E} \frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{pl}}} \left( \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{pl}}} \right) / \left( \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \right)^\alpha \right] \quad (\text{D.9})$$

Dabei gilt:

$W_{\text{el}}$  elastisches Widerstandsmoment des Querschnitts,

$W_{\text{pl}}$  plastisches Widerstandsmoment des Querschnitts,

$\alpha$  Beulbeiwert für die „Continuous Strength Method“ gemäß Tabelle D.2.

Bei Querschnitten mit einer bezogenen Grenzdehnung von  $\varepsilon_{\text{csm}}/\varepsilon_y < 1,0$  wird der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Querschnitts unter Biegung um eine Symmetrieachse wie folgt ermittelt:

$$M_{\text{c,Rd}} = M_{\text{csm,Rd}} = \frac{\varepsilon_{\text{csm}}}{\varepsilon_y} \frac{W_{\text{el}} f_y}{\gamma_{\text{M0}}} \quad (\text{D.10})$$

### D.5.2 Biegung um eine Querschnittsachse ohne Symmetrie

Bei unsymmetrischen (Winkel) und einfachsymmetrischen Querschnitten (U-Profile) unter Biegebeanspruchung um eine Querschnittsachse ohne Symmetrie wird die maximale Stauchung  $\varepsilon_{\text{csm,c}}$  mit Gleichung (D.2) (d. h.  $\varepsilon_{\text{csm,c}} = \varepsilon_{\text{csm}}$ ) ermittelt. Die zugehörige Dehnung der äußeren Zugfaser  $\varepsilon_{\text{csm,t}}$  wird basierend auf der Annahme ermittelt, dass die Dehnung über die Bauteildicke linear veränderlich und die Schwereachse für die Bemessung mit der elastischen Schwereachse identisch ist. Die maximale Bemessungsdehnung  $\varepsilon_{\text{csm,max}}$  ist dabei der Maximalwert aus entweder der Stauchung  $\varepsilon_{\text{csm,c}}$  bzw. der Dehnung der Zugfaser  $\varepsilon_{\text{csm,t}}$ .

Für den Fall, dass die maximale Bemessungsdehnung  $\varepsilon_{\text{csm,max}}$  kleiner ist als die zur Streckgrenze zugehörige Dehnung  $\varepsilon_y$ , kann mit der elastischen Schwereachse gerechnet werden, und der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Querschnitts unter Biegung um eine Querschnittsachse ohne Symmetrie kann mit Gleichung (D.10) ermittelt werden, wobei  $\varepsilon_{\text{csm}} = \varepsilon_{\text{csm,max}}$  ist.

Falls  $\varepsilon_{\text{csm,max}}$  größer als  $\varepsilon_y$  ist, verschiebt sich die Schwereachse für die Bemessung von der vorher angenommenen elastischen Schwereachse zu der Achse, über die das Gleichgewicht des Querschnitts entsteht. Alternativ kann die Schwereachse auch näherungsweise anhand der Achse in der Mitte zwischen elastischer und plastischer Schwereachse bestimmt werden;  $\varepsilon_{\text{csm,t}}$  und  $\varepsilon_{\text{csm,max}}$  sollten dann erneut berechnet werden. Der zugehörige Bemessungswert der Beanspruchbarkeit des Querschnitts unter Biegung um eine Querschnittsachse ohne Symmetrie wird dann mit Gleichung

(D.9) ermittelt. Dabei ist  $\varepsilon_{\text{csm}} = \varepsilon_{\text{csm,max}}$ , und der Wert des Beulbeiwertes  $\alpha$  für jeden nicht doppelsymmetrischen Querschnittstyp unter Biegebeanspruchung um eine Querschnittsachse ohne Symmetrie kann aus Tabelle D.2 entnommen werden.

**Tabelle D.2** Beulbeiwert  $\alpha$  für die „Continuous Strength Method“

Querschnittstyp	Biegeachse	Seitenverhältnis	$\alpha$
Rechteckhohlprofile (RHS)	Jede	Jedes	2,0
Kreisförmige Hohlprofile (CHS)	Jede	–	2,0
I-Profile	y-y	Jedes	2,0
	z-z	Jedes	1,2
U-Profile	y-y	Jedes	2,0
	z-z	$h/b \leq 2$	1,5
		$h/b > 2$	1,0
T-Profile	y-y	$h/b < 1$	1,0
		$h/b \geq 1$	1,5
	z-z	Jedes	1,2
Winkel	y-y	Jedes	1,5
	z-z	Jedes	1,0

## D.6 Querschnittstragfähigkeit unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung

### D.6.1 Rechteckhohlprofile (RHS) unter kombinierter Beanspruchung

Bei Rechteckhohlprofilen (RHS) mit einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_p \leq 0,60$  sind die Bemessungsformeln unter Berücksichtigung der Interaktion für Querschnitte unter Biegebeanspruchung um die Haupt- oder Nebenachse sowie unter zweiachsiger Biegebeanspruchung mit zusätzlicher Druckbeanspruchung anhand der Gleichungen (D.11) bis (D.13) wie folgt gegeben:

$$M_{y,Ed} \leq M_{R,csm,y,Rd} = M_{csm,y,Rd} \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5a_w)} \leq M_{csm,y,Rd} \quad (D.11)$$

$$M_{z,Ed} \leq M_{R,csm,z,Rd} = M_{csm,z,Rd} \frac{(1 - n_{csm})}{(1 - 0,5a_f)} \leq M_{csm,z,Rd} \quad (D.12)$$

$$\left[ \frac{M_{y,Ed}}{M_{R,csm,y,Rd}} \right]^{\alpha_{csm}} + \left[ \frac{M_{z,Ed}}{M_{R,csm,z,Rd}} \right]^{\beta_{csm}} \leq 1 \quad (D.13)$$

Dabei gilt:

- $M_{y,Ed}$  Bemessungswert der Biegebeanspruchung um die Hauptachse (y-y),
- $M_{z,Ed}$  Bemessungswert der Biegebeanspruchung um die Nebenachse (z-z),
- $M_{R,csm,y,Rd}$  anhand der CSM abgeminderter Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit um die Hauptachse (y-y),

$M_{R,csm,z,Rd}$	anhand der CSM abgeminderter Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit um die Nebenachse (z-z),
$a_w$	Verhältnis der Stegfläche zur Bruttoquerschnittsfläche,
$a_f$	Verhältnis der Flanschfläche zur Bruttoquerschnittsfläche,
$n_{csm}$	Verhältnis der Bemessungswerte aus der einwirkenden Drucknormalkraft $N_{Ed}$ zur Druckbeanspruchbarkeit des Querschnitts $N_{csm,Rd}$ anhand der CSM,
$\alpha_{csm}$ bzw. $\beta_{csm}$	Interaktionsbeiwert für die zweiachsige Biegung mit $\alpha_{csm} = \beta_{csm} = 1,66/(1 - 1,13n_{csm}^2)$ .

Bei Rechteckhohlprofilen (RHS) mit einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_p > 0,60$  lautet die Bemessungsformel unter Berücksichtigung der Interaktion wie folgt:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{csm,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{csm,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{csm,z,Rd}} \leq 1 \quad (D.14)$$

## D.6.2 Kreisförmige Hohlprofile (CHS) unter kombinierter Beanspruchung

Bei kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) mit einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_c \leq 0,27$  lautet die Bemessungsformel unter Berücksichtigung der Interaktion für Querschnitte unter einer Kombination aus Druck- und Biegebeanspruchung wie folgt:

$$M_{Ed} \leq M_{R,csm,Rd} = M_{csm,Rd}(1 - n_{csm}^{1,7}) \quad (D.15)$$

Bei kreisförmigen Hohlprofilen (CHS) mit einer bezogenen Schlankheit von  $\bar{\lambda}_c > 0,27$  ergibt sich die Bemessungsformel unter Berücksichtigung der Interaktion zu:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{csm,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{csm,Rd}} \leq 1 \quad (D.16)$$



# ANHANG E Elastisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken

## E.1 Allgemeines

Bei Querschnitten, die über die Biegeebene symmetrisch sind, kann das elastische Verzweigungsmoment  $M_{cr}$  mit Hilfe der Methode aus Kapitel E.2 ermittelt werden. Bei Querschnitten, auf die dies nicht zutrifft, kann  $M_{cr}$  anhand einer Knickberechnung für den Träger ermittelt werden, vorausgesetzt, dass diese Berechnung alle folgenden Aspekte berücksichtigt, die den Wert von  $M_{cr}$  beeinflussen können:

- Geometrie des Querschnitts,
- Wölbsteifigkeit,
- Lage der Querbelastung in Bezug auf den Schubmittelpunkt,
- Randbedingungen.

Eine Software zur Berechnung des elastischen Verzweigungsmomentes  $M_{cr}$  kann kostenlos auf den folgenden Seiten bezogen werden: [www.cticm.com](http://www.cticm.com) und [www.steelconstruction.info/Design\\_software\\_and\\_tools](http://www.steelconstruction.info/Design_software_and_tools).

## E.2 Über die Biegeebene symmetrische Querschnitte

Diese Methode gilt nur für Bauteile, deren Querschnitt über die Länge konstant und symmetrisch über die Biegeebene ist. Die erforderlichen Randbedingungen an jedem Ende lauten wie folgt:

- gegen seitliches Verschieben gesichert und
- gegen Verdrehung um die Längsachse gesichert.

Das elastische Verzweigungsmoment  $M_{cr}$  kann anhand der folgenden aus der Knicktheorie abgeleiteten Formel berechnet werden:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (\text{E.1})$$

Dabei gilt:

- $I_t$  Torsionswiderstand (St. Venant'sches Trägheitsmoment),
- $I_w$  Wölbwiderstand,
- $I_z$  Flächenträgheitsmoment 2. Grades um die Nebenachse,
- $k$  bzw.  $k_w$  Beiwert für die wirksame Länge,
- $L$  Länge des Trägers zwischen Stellen, die gegen seitliches Verschieben gesichert sind,
- $z_g$  Abstand zwischen dem Angriffspunkt der Belastung und dem Schubmittelpunkt. Anmerkung: Bei doppelsymmetrischen Querschnitten fällt der Schubmittelpunkt mit dem Schwerpunkt zusammen.
- $C_1$  äquivalenter konstanter Momentenbeiwert, welcher die Form des Biegemomentenverlaufes berücksichtigt,
- $C_2$  Beiwert, der abhängig von der Höhe der Belastung ist und welcher die Form des Biegemomentenverlaufes berücksichtigt.

Der Beiwert  $k$  berücksichtigt die Verdrehung der Trägerenden in der Ebene. Er gibt das Verhältnis der Knicklänge zur Systemlänge bei einem druckbeanspruchten Bauteil an. Ohne ausreichende Begründung sollte der Beiwert  $k$  nicht kleiner als 1,0 angesetzt werden.

Der Beiwert  $k_w$  berücksichtigt die Verwölbung der Trägerenden. Ohne eine besondere Regelung für die Sicherung gegen Verwölben sollte der Beiwert  $k_w$  mit 1,0 angesetzt werden.

Bei dem üblichen Fall der standardmäßigen Randbedingung an den Trägerenden (Gabellagerung) werden  $k$  und  $k_w$  jeweils mit 1,0 angesetzt.

Grundsätzlich ist der Abstand  $z_g$  bei Belastungen, die in Richtung des Schubmittelpunktes gerichtet sind, positiv definiert.

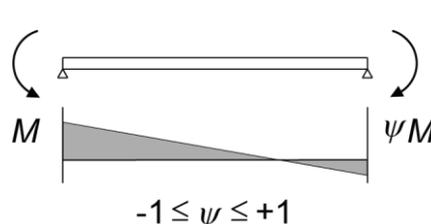
### E.3 Beiwerte $C_1$ und $C_2$

Die Momentenverteilung über die Länge eines Trägers beeinflusst den Wert des elastischen Verzweigungsmomentes  $M_{cr}$ . Die Auswirkungen der Veränderung des Biegemomentes auf das elastische Verzweigungsmoment  $M_{cr}$  eines Trägers können anhand des äquivalenten konstanten Momentenbeiwertes  $C_1$  berücksichtigt werden. Ein konstantes Biegemoment ist der ungünstigste Fall bei dem  $C_1 = 1,0$  ist. Auch für andere Formen der Momentenverteilung liegt  $C_1 = 1,0$  auf der sicheren Seite, kann allerdings bei von der konstanten Verteilung sehr stark abweichenden Momentenverteilungen zu deutlich konservativen Ergebnissen führen.

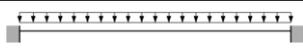
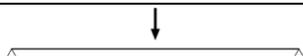
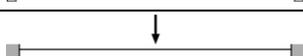
Der Beiwert  $C_2$  wird maßgebend, wenn ein Träger durch destabilisierende Belastungen beansprucht wird. Lasten, die oberhalb des Schubmittelpunktes angreifen, haben eine „destabilisierende“ Wirkung, woraus kleinere Werte für  $M_{cr}$  resultieren, während Lasten, die unterhalb des Schubmittelpunktes angreifen, eine „stabilisierende“ Wirkung und dadurch größere Werte für  $M_{cr}$  zur Folge haben.

Die entsprechenden Werte für den äquivalenten konstanten Momentenbeiwert  $C_1$  sind in Tabelle E.1 bzw. Tabelle E.2 und für den Beiwert  $C_2$  in Tabelle E.2 angegeben.

**Tabelle E.1** Werte des äquivalenten konstanten Momentenbeiwertes  $C_1$  bei Momenten an den Trägerenden (mit  $k = 1,0$ )

Endmomente und Auflagerbedingungen	$\psi$	$C_1$
 <p style="text-align: center;"><math>-1 \leq \psi \leq +1</math></p>	+1,00	1,00
	+0,75	1,17
	+0,50	1,36
	+0,25	1,56
	0,00	1,77
	-0,25	2,00
	-0,5	2,24
	-0,75	2,49
	-1,00	2,76

**Tabelle E.2** Werte für die Beiwerte  $C_1$  und  $C_2$  bei Querbeltungen (mit  $k = 1,0$ )

Belastung und Auflagerbedingungen	Momentenverteilung	$C_1$	$C_2$
		1,13	0,454
		2,60	1,55
		1,35	0,630
		1,69	1,65

## TEIL 2 - BEMESSUNGSBEISPIELE

Dieser Abschnitt enthält 15 Bemessungsbeispiele, die die Anwendung der Bemessungsregeln veranschaulichen sollen. Die Beispiele sind:

### **Bemessungsbeispiel 1**

Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung

### **Bemessungsbeispiel 2**

Geschweißtes I-Profil der Querschnittsklasse 4 unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung

### **Bemessungsbeispiel 3**

Stahltrapezprofil als Dacheindeckung der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung

### **Bemessungsbeispiel 4**

Geschweißte Hohlprofilverbindung unter Ermüdungsbeanspruchung

### **Bemessungsbeispiel 5**

Geschweißter Anschluss

### **Bemessungsbeispiel 6**

Geschraubter Anschluss

### **Bemessungsbeispiel 7**

Stahlträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung mit Schubbeulen als maßgebendes Versagen

### **Bemessungsbeispiel 8**

Stahlträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung mit Querkraft als maßgebende Bemessungsgröße

### **Bemessungsbeispiel 9**

Kaltgeformtes U-Profil unter Biegebeanspruchung mit in Abständen angeordneten seitlichen Halterungen des Druckflanschs; Biegedrillknicken zwischen den seitlichen Halterungen wird maßgebend

### **Bemessungsbeispiel 10**

Rechteckiges Hohlprofil unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung mit 30 Minuten Feuerwiderstand

### **Bemessungsbeispiel 11**

Stahltrapezprofil als Dacheindeckung der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung - Vergleich der Bemessung für kaltverfestigtes und geglühtes Material

### **Bemessungsbeispiel 12**

Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Material in einem offenen Geschoss unter Biegebeanspruchung

### **Bemessungsbeispiel 13**

Fachwerkträger aus kaltverfestigtem Material unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung mit 30 Minuten Feuerwiderstand

### **Bemessungsbeispiel 14**

Bestimmung der erhöhten Streckgrenze eines kaltgewalzten quadratischen Hohlprofils nach Anhang B der „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“

### **Bemessungsbeispiel 15**

Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung eines kaltgewalzten quadratischen Hohlprofils nach der „*Continuous Strength Method*“ gemäß Anhang D der „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“

Das Stahltrapezprofil in Bemessungsbeispiel 3 ist aus nichtrostendem ferritischem Stahl 1.4003.

Die Stahlträger in den Bemessungsbeispielen 7 und 8 sind aus nichtrostendem Duplex-Stahl 1.4462.

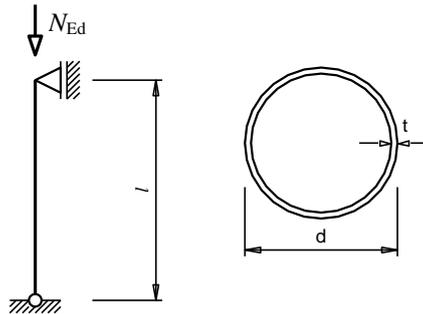
Die Bauteile in den übrigen Bemessungsbeispielen sind aus nichtrostendem austenitischem Stahl 1.4301 oder 1.4401.

Die Verweise in den Bemessungsbeispielen beziehen sich – soweit nicht anderweitig angegeben – auf die Abschnitte und Formeln/Gleichungen in dieser Bemessungshilfe.

<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 2		
	Titel Bemessungsbeispiel 1 – Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung		
	Auftraggeber Research Fund for Coal and Steel	Erstellt	HS
Bearbeitet		JBL	Datum 03/06
Bearbeitet		FW	Datum 05/17

**BEMESSUNGSBEISPIEL 1 – Kreisförmiges Hohlprofil unter zentrischer Druckbeanspruchung**

Eine Innenstütze eines mehrstöckigen Gebäudes soll aus einem kreisförmigen Hohlprofil konstruiert werden. Die Stütze ist an beiden Enden gelenkig gelagert. Die Geschosshöhe beträgt 3,50 m.



**Statisches System**

Gelenkig gelagerte Stütze mit einer Stützweite von:

$$l = 3,50 \text{ m}$$

**Einwirkungen**

Als Bemessungslast aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen wirkt eine vertikale Drucknormalkraft von:

$$N_{Ed} = 250 \text{ kN}$$

**Querschnittswerte**

Für die Stütze wird ein kaltgefertigtes kreisförmiges Hohlprofil KHP 159 × 4 mit der austenitischen Stahlsorte 1.4307 und den folgenden geometrischen Werten gewählt:

$d = 159 \text{ mm}$	$t = 4,0 \text{ mm}$
$A = 19,5 \text{ cm}^2$	$I = 585,3 \text{ cm}^4$
$W_{el} = 73,6 \text{ cm}^3$	$W_{pl} = 96,1 \text{ cm}^3$

**Materialeigenschaften**

$f_y = 220 \text{ N/mm}^2$  (für kaltgewalztes Band)  
 $E = 200000 \text{ N/mm}^2$  und  $G = 76900 \text{ N/mm}^2$

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon = 1,01$$

Querschnitt unter Druckbeanspruchung:  $d/t = 159/4 = 39,8$

Der Querschnitt wird Querschnittsklasse 1 mit  $d/t \leq 50\varepsilon^2$  zugeordnet.

Tabelle 2.2  
 Kapitel 2.3.1

Tabelle 5.2

**Bemessungswert der Beanspruchbarkeit auf Druck**

Kapitel 5.7.3

Für Querschnitte der Klasse 1:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$$

Gl. 5.27

$$N_{c,Rd} = \frac{19,5 \times 220 \times 10^{-1}}{1,1} = 390 \text{ kN}$$

**Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit**

Kapitel 6.3.3

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$$

Gl. 6.2

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$$

Gl. 6.4

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$$

Gl. 6.5

Berechnung der idealen Knicknormalkraft:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 585,3 \times 10^4}{(3,50 \times 10^3)^2} \times 10^{-3} = 943,1 \text{ kN}$$

Berechnung des bezogenen Schlankheitsgrades für Biegeknicken:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{19,5 \times 10^2 \times 220}{943,1 \times 10^3}} = 0,67$$

Gl. 6.6

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit gegen Biegeknicken bestimmt sich für das kaltgefertigte kreisförmige Hohlprofil aus austenitischem nichtrostendem Stahl mit einem Imperfektionsbeiwert  $\alpha = 0,49$  und einer bezogenen Schlankheit  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$  wie folgt:

Tabelle 6.1

$$\phi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,67 - 0,2) + 0,67^2) = 0,84$$

$$\chi = \frac{1}{0,84 + [0,84^2 - 0,67^2]^{0,5}} = 0,74$$

$$N_{b,Rd} = 0,74 \times 19,5 \times 220 \times \frac{10^{-1}}{1,1} = 288,6 \text{ kN}$$

Es wirkt die zentrische Drucknormalkraft  $N_{Ed} = 250 \text{ kN}$ .

Das Bauteil weist somit eine ausreichende Biegeknicksicherheit auf.

**„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)**

**BERECHNUNGSVORLAGE**

**Titel**

Bemessungsbeispiel 2 – Geschweißtes I-Profil der Querschnittsklasse 4 unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung

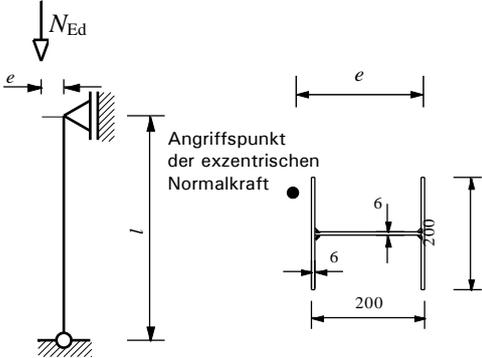
**Auftraggeber**

Research Fund for Coal and Steel

Erstellt	HS	Datum 07/02
Bearbeitet	JBL	Datum 03/06
Bearbeitet	FW	Datum 06/17

**BEMESSUNGSBEISPIEL 2 – Geschweißtes I-Profil der Querschnittsklasse 4 unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung**

Eine an beiden Enden gelenkig gelagerte Stütze aus einem geschweißten I-Profil soll bemessen werden. Knicken um die schwache Achse wird durch eine seitliche Stützung verhindert. Die Geschosshöhe beträgt 3,50 m. Die Stütze wird exzentrisch zur Hauptachse durch eine vertikale Normalkraft belastet.



**Statisches System**

Gelenkig gelagerte Stütze mit einer Stützweite von:

$l = 3,50 \text{ m}$

Exzentrizität des Lastangriffs:

$e = 200 \text{ mm}$

**Einwirkungen**

Als Bemessungslast aus ständigen und veränderlichen Einwirkungen wirkt eine exzentrisch, vertikale Drucknormalkraft von :

$N_{Ed} = 120 \text{ kN}$

Aus einer statischen Berechnung ergibt sich am oberen Ende der Stütze ein maximales Biegemoment von:

$M_{y,max Ed} = 120 \times 0,20 = 24 \text{ kNm}$

**Querschnittswerte**

Für die Stütze wird ein doppelsymmetrisches, geschweißtes I-Profil 200 x 200 (Blechdicke 6,0 mm) mit der austenitischen Stahlsorte 1.4401 und den folgenden geometrischen Werten gewählt:

$b = 200 \text{ mm}$	$t_f = 6,0 \text{ mm}$	$W_{el,y} = 259,1 \text{ cm}^3$
$h_w = 188 \text{ mm}$	$t_w = 6,0 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 285,8 \text{ cm}^3$
$a = 3,0 \text{ mm}$ (Schweißnahtdicke)	$I_y = 2591,1 \text{ cm}^4$	
$A_g = 35,3 \text{ cm}^2$	$i_y = 8,6 \text{ cm}$	

Bemessungsbeispiel 2	Blatt 2 von 4
<p><b>Materialeigenschaften</b></p> <p><math>f_y = 220 \text{ N/mm}^2</math> (für warmgefertigtes Band)</p> <p><math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math> und <math>G = 76900 \text{ N/mm}^2</math></p> <p><b>Querschnittsklassifizierung</b></p> <p><math>\varepsilon = 1,01</math></p> <p>Steg unter Druckspannungen: <math>c/t = \frac{(188-3-3)}{6} = 30,3</math></p> <p>Der Steg wird Querschnittsklasse 1 mit <math>c/t \leq 33,0\varepsilon</math> zugeordnet.</p> <p>Einseitig gestützter druckbeanspruchter Flansch: <math>c/t = \frac{(200/2-6/2-3)}{6} = 94/6 = 15,7</math></p> <p>Der Flansch wird Querschnittsklasse 4 mit <math>c/t \leq 14,0\varepsilon</math> zugeordnet.</p> <p>Demzufolge wird der gesamte Querschnitt der Querschnittsklasse 4 zugeordnet.</p> <p><b>Wirksame Querschnittswerte</b></p> <p>Die komplette Querschnittsfläche des Steges kann als wirksam angesetzt werden; der Abminderungsfaktor <math>\rho</math> für die einseitig gestützten Flansche wird wie folgt ermittelt:</p> <p><math>\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2}</math> aber <math>\leq 1</math></p> <p><math>\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}</math> mit <math>\bar{b} = c = 94 \text{ mm}</math></p> <p>Es wird eine konstante Spannungsverteilung im druckbeanspruchten Flansch angenommen:</p> <p><math>\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1</math></p> <p><math>\Rightarrow k_\sigma = 0,43</math></p> <p><math>\bar{\lambda}_p = \frac{94/6}{28,4 \times 1,01 \times \sqrt{0,43}} = 0,833</math></p> <p><math>\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1}{0,833} - \frac{0,188}{0,833^2} = 0,93</math></p> <p><math>b_{\text{eff}} = 0,93 \times 94 = 87,4 \text{ mm}</math></p> <p>Berechnung des wirksamen Querschnitts unter reiner Druckbeanspruchung:</p> <p><math>A_{\text{eff}} = A_g - 4(1 - \rho)ct = 35,3 - 4 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 33,7 \text{ cm}^2</math></p> <p>Berechnung des wirksamen Querschnitts unter Biegebeanspruchung um die starke Achse:</p> <p><math>A_{\text{eff}} = A_g - 2(1 - \rho)ct = 35,3 - 2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 34,5 \text{ cm}^2</math></p> <p>Berechnung der Exzentrizität zur neutralen Achse anhand des Flächenträgheitsmoments bezüglich der neutralen Achse des Bruttoquerschnitts:</p> <p><math display="block">\bar{z}' = \frac{2 \times (1 - \rho)ct \times (h_w + t_f)/2}{A_{\text{eff}}} = \frac{2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times (188 + 6)/2}{34,5 \times 10^{-2}}</math> <p><math>= 2,2 \text{ mm}</math> (in Richtung des Zugflansches)</p> </p>	<p>Tabelle 2.2</p> <p>Kapitel 2.3</p> <p>Tabelle 5.2</p> <p>Gl. 5.2</p> <p>Gl. 5.3</p> <p>Tabelle 5.4</p>

Berechnung des wirksamen Flächenträgheitsmoments um die starke Achse:

$$I_{\text{eff},y} = I_y - 2(1 - \rho)ct \left[ \frac{t^2}{12} + \frac{(h_w + t_f)^2}{4} \right] - \bar{z}'^2 A_{\text{eff}}$$

$$I_{\text{eff},y} = 2591,1 - 2 \times (1 - 0,93) \times 94 \times 6 \times \left[ \frac{6^2}{12} + \frac{(188 + 6)^2}{4} \right] \times 10^{-4} - (2,2)^2 \times 34,5 \times 10^{-2}$$

$$I_{\text{eff},y} = 2515,1 \text{ cm}^4$$

$$W_{\text{eff},y} = \frac{I_{\text{eff},y}}{\frac{h_w}{2} + t_f + \bar{z}'} = \frac{2515,1}{\frac{18,8}{2} + 0,6 + 0,22} = 246,1 \text{ cm}^3$$

**Bemessungswiderstand gegen Biegeknicken um die starke Achse**

$$N_{b,Rd} = \chi A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{M1}$$

Gl. 6.3

$$A_{\text{eff}} = 33,7 \text{ cm}^2 \quad \text{für druckbeanspruchte Querschnitte der Klasse 4}$$

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

Gl. 6.4

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

Gl. 6.5

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr}}}$$

Gl. 6.7

$$L_{cr} = 350 \text{ cm (die Knicklänge entspricht der Trägerlänge)}$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2591,1 \times 10^4}{350^2 \times 10^2} \times 10^{-3} = 4175,2 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{33,7 \times 10^2 \times 220}{4175,2 \times 10^3}} = 0,421$$

Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit gegen Biegeknicken um die starke Achse bestimmt sich für das geschweißte I-Profil aus austenitischem nichtrostendem Stahl mit einem Imperfektionsbeiwert  $\alpha = 0,49$  und einer bezogenen Schlankheit  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$  wie folgt:

Tabelle 6.1

$$\varphi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,421 - 0,2) + 0,421^2) = 0,643$$

$$\chi = \frac{1}{0,643 + [0,643^2 - 0,421^2]^{0,5}} = 0,886$$

$$N_{b,Rd,y} = 0,886 \times 33,7 \times 10^2 \times 220 \times 10^{-3} / 1,1 = 597,23 \text{ kN}$$

**Bemessungswiderstand gegen axiale Druckbeanspruchung und einachsige Biegung um die starke Achse**

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

Gl. 6.56

$$\beta_{W,y} = W_{\text{eff}} / W_{pl,y} \quad \text{für Querschnittsklasse 4}$$

$$= 246,1 / 285,8 = 0,861$$

Aufgrund des symmetrischen Querschnitts ist  $e_{Ny} = 0$ .

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,0 + 2 \times (0,421 - 0,5) \times \frac{120,0}{597,23} = 0,968$$

$$1,2 + \frac{2N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,2 + \frac{2 \times 120}{597,23} = 1,60$$

aber  $1,2 \leq k_y \leq 1,60$

gewählt:  $k_y = 1,2$

$$\frac{120,0}{597,23} + 1,2 \times \frac{24,0 \times 10^6}{0,861 \times 285,8 \times 10^3 \times 220/1,1} = 0,786 \leq 1$$

Das Bauteil weist somit eine ausreichende Biegeknicksicherheit auf.

Gl. 6.61

**„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)**

**BERECHNUNGSVORLAGE**

Titel

Bemessungsbeispiel 3 – Stahltrapezprofil als Dacheindeckung der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung

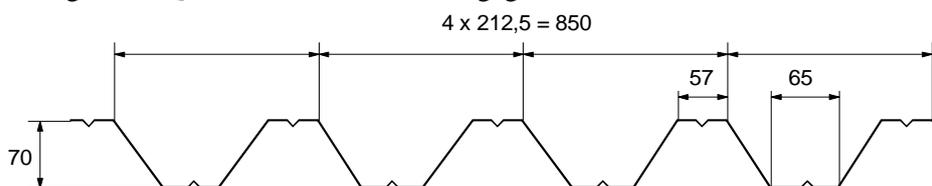
Auftraggeber

Research Fund for Coal and Steel

Erstellt	AAT	Datum	06/02
Bearbeitet	JBL	Datum	04/06
Bearbeitet	SJ	Datum	04/17

**BEMESSUNGSBEISPIEL 3 – Stahltrapezprofil als Dacheindeckung der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung**

Ein Trapezprofil aus ferritischem nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4003 mit einer Blechdicke von 0,6 mm wird als Zweifeldträger in einem Dach bemessen. Die Abmessungen des Querschnitts sind unten angegeben.



Das Beispiel beinhaltet die folgenden Bemessungsaspekte:

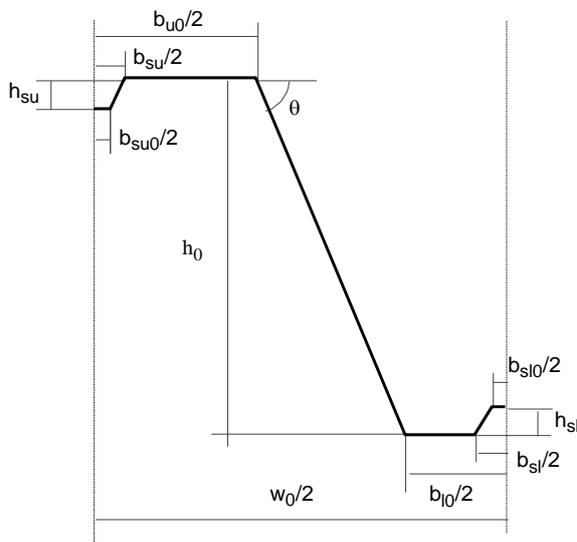
- Bestimmung der wirksamen Querschnittswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit,
- Bestimmung der Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts,
- Bestimmung der Tragfähigkeit am mittleren Auflager,
- Bestimmung der Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

**Systemangaben**

Spannweite:	$L = 2900 \text{ mm}$
Auflagerbreite:	$s_s = 100 \text{ mm}$
Bemessungsflächenlast:	$Q = 1,4 \text{ kN/m}^2$
Eigengewicht:	$G = 0,07 \text{ kN/m}^2$
Profildicke:	$t = 0,6 \text{ mm}$
Streckgrenze:	$f_y = 280 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul:	$E = 200000 \text{ N/mm}^2$
Teilsicherheitsbeiwerte:	$\gamma_{M0} = 1,1$
	$\gamma_{M1} = 1,1$
	$\gamma_G = 1,35$ (ständige Lasten)
	$\gamma_Q = 1,5$ (veränderliche Lasten)

Tabelle 2.2  
Kapitel 2.3.1  
Tabelle 4.1  
Tabelle 4.1  
Kapitel 4.3  
Kapitel 4.3

Die relevanten Bezeichnungen und Abmessungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Der Querschnitt ist so gelagert, dass der obere Flansch am Auflager aufgrund der Biegung auf Druck beansprucht wird.



Achsmaße:

- $h_0 = 70 \text{ mm,}$
- $w_0 = 212,5 \text{ mm,}$
- $b_{u0} = 65 \text{ mm,}$
- $b_{l0} = 57 \text{ mm,}$
- $b_{su} = 20 \text{ mm,}$
- $b_{su0} = 8 \text{ mm,}$
- $h_{su} = 6 \text{ mm,}$
- $b_{sl} = 20 \text{ mm,}$
- $b_{sl0} = 8 \text{ mm,}$
- $h_{sl} = 6 \text{ mm,}$
- $r = 2 \text{ mm}$  (Innenradius der Ecken).

Winkel des Steges:

$$\theta = \arctan \left| \frac{h_0}{0,5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = \arctan \left| \frac{70}{0,5 \times (212,5 - 65 - 57)} \right| = 57,1^\circ$$

**Wirksame Querschnittswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GzT)**

Breite-zu-Dicke-Verhältnis:

$$h_0/t = 70/0,6 = 117 \leq 400 \sin \theta = 336$$

$$\max(b_{l0}/t; b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0,6 = 108 \leq 400$$

Winkel des Steges und Eckenradius:

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

Der Einfluss runder Ecken auf die Tragfähigkeit von Querschnitten kann vernachlässigt werden, wenn der Innenradius die Bedingungen  $r \leq 5t$  sowie  $r \leq 0,1b_p$  erfüllt.

$$r = 2 \text{ mm} \leq \min(5t; 0,1b_p) = \min(5 \times 0,6; 0,1 \times 22,5) = 2,25 \text{ mm}$$

Der Einfluss runder Ecken auf die Tragfähigkeit des Querschnitts kann vernachlässigt werden.

**Lage der Schwerachse für den vollständig wirksamen Steg**

Der Abminderungsfaktor  $\rho$  wird für den beidseitig gestützten druckbeanspruchten Flansch ermittelt:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ jedoch } \leq 1$$

Dabei ist:  $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$

$$\bar{b} = b_p = 22,5 \text{ mm}$$

Kapitel 5.2

Tabelle 5.1

Tabelle 5.1

Kapitel 5.6.2

Kapitel 5.4.1

Gl. 5.1

Gl. 5.3

$$\psi = 1 \Rightarrow k_{\sigma} = 4$$

Tabelle 5.3

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{280} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,894$$

Tabelle 5.2

$$\bar{\lambda}_p = \frac{22,5/0,6}{28,4 \times 0,894 \times \sqrt{4}} = 0,738$$

Gl. 5.3

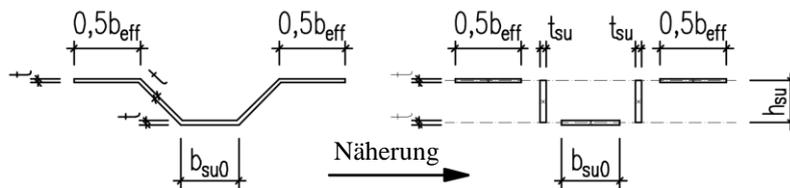
$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,738} - \frac{0,079}{0,738^2} = 0,901 \leq 1$$

$$b_{\text{eff},u} = \rho \bar{b} = 0,901 \times 22,5 = 20,3 \text{ mm}$$

Tabelle 5.3

**Wirksame Querschnittswerte der Aussteifungen (Sicken)**

Kapitel 5.5.3



$$t_{\text{su}} = \frac{\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2}}{h_{\text{su}}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{\text{eff},u} + b_{\text{su}0})t + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}} = (20,3 + 8) \times 0,6 + 2 \times 6 \times 0,849 = 27,2 \text{ mm}^2$$

Abb. 5.3

$$e_s = \frac{b_{\text{su}0}h_{\text{su}}t + 2h_{\text{su}}\frac{h_{\text{su}}}{2}t_{\text{su}}}{A_s} = \frac{8 \times 6 \times 0,6 + 2 \times 6 \times \frac{6}{2} \times 0,849}{27,2} = 2,18 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^2) + b_{\text{su}0}t(h_{\text{su}} - e_s)^2 + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}}\left(\frac{h_{\text{su}}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{\text{su}0}t^3}{12} + 2\frac{t_{\text{su}}h_{\text{su}}^3}{12}$$

Abb. 5.3

$$I_s = 2 \times (15 \times 0,6^2 \times 2,18^2) + 8 \times 0,6 \times (6 - 2,18)^2 + 2 \times 6 \times 0,849 \times \left(\frac{6}{2} - 2,18\right)^2 + 2 \times \left(\frac{15 \times 0,6^4}{12}\right) + \frac{8 \times 0,6^3}{12} + 2 \times \frac{0,849 \times 6^3}{12} = 159,25 \text{ mm}^4$$

$$b_s = 2\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su}0}}{2}\right)^2} + b_{\text{su}0} = 2 \times \sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2} + 8 = 25,0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07 \left[ I_s b_p^2 \left( \frac{2b_p + 3b_s}{t^3} \right) \right]^{1/4}$$

Gl. 5.10

$$l_b = 3,07 \times \left[ 159,25 \times 22,5^2 \times \left( \frac{2 \times 22,5 + 3 \times 25}{0,6^3} \right) \right]^{1/4} = 251 \text{ mm}$$

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = \sqrt{\left(\frac{212,5 - 65 - 57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83,4 \text{ mm}$$

Abb. 5.5

$$b_d = 2b_p + b_s = 2 \times 22,5 + 25 = 70 \text{ mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = \sqrt{\frac{83,4 + 2 \times 70}{83,4 + 0,5 \times 70}} = 1,37$$

Gl. 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83,4} = 3,01 \geq 2 \Rightarrow k_w = k_{w0} = 1,37$$

Gl. 5.8

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

Gl. 5.4

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \times 1,37 \times 200 \times 10^3}{27,2} \times \sqrt{\frac{159,25 \times 0,6^3}{4 \times 22,5^2 \times (2 \times 22,5 + 3 \times 25)}} = 503,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{280}{503,4}} = 0,746$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,746 < 1,38 \Rightarrow$$

Gl. 5.17

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 0,746 = 0,93$$

$$t_{red,u} = \chi_d t = 0,93 \times 0,6 = 0,558 \text{ mm}$$

Der Abstand der Schwerachse zum druckbeanspruchten Flansch:

$$t_{sl} = \frac{\sqrt{h_{sl}^2 + \left(\frac{b_{sl} - b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{sl}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$t_w = t / \sin\theta = 0,6 / \sin(57,1^\circ) = 0,714 \text{ mm}$$

$e_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]
0	$0,5b_{eff,u} t = 6,1$
0	$0,5b_{eff,u} \chi_d t = 5,66$
$0,5h_{su} = 3$	$h_{su} \chi_d t_{su} = 4,74$
$h_{su} = 6$	$0,5b_{su0} \chi_d t = 2,23$
$0,5h_0 = 35$	$h_0 t_w = 49,98$
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$
$h_0 - 0,5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5,09$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0,5b_{sl0} t = 2,4$

$$A_{tot} = \sum A_i = 87,3 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 34,9 \text{ mm}$$

Wirksame Querschnittswerte des druckbeanspruchten Bereiches vom Steg

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \times 0,6 \times \sqrt{\frac{200}{1,1 \times 280 \times 10^{-3}}} = 11,6 \text{ mm}$$

EN 1993-1-3  
Kapitel  
5.5.3.4.3  
(4-5)

$$s_{eff,n} = 1,5s_{eff,0} = 1,5 \times 11,6 = 17,4 \text{ mm}$$

Bemessungsbeispiel 3			Blatt 5 von 7
<b>Wirksamer Querschnittswerte für die halbe Aussteifung (Sicke)</b> $h_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},1} \sin \theta = 11,6 \times \sin(57,1^\circ) = 9,74 \text{ mm}$ $h_{\text{eff},n} = s_{\text{eff},n} \sin \theta = 17,4 \times \sin(57,1^\circ) = 14,61 \text{ mm}$			
$e_{\text{eff},i} [\text{mm}]$	$A_{\text{eff},i} [\text{mm}^2]$	$I_{\text{eff},i} [\text{mm}^4]$	
0	$0,5b_{\text{eff},u}t = 6,1$	$\approx 0$	
0	$0,5b_{\text{eff},u} \chi_d t = 5,7$	$\approx 0$	
$0,5h_{\text{su}} = 3$	$h_{\text{su}} \chi_d t_{\text{su}} = 4,7$	$\chi_d t_{\text{su}} h_{\text{su}}^3 / 12 = 14,2$	
$h_{\text{su}} = 6$	$0,5b_{\text{su}0} \chi_d t = 2,2$	$\approx 0$	
$0,5h_{\text{eff},1} = 4,9$	$h_{\text{eff},1} t_w = 7,0$	$t_w h_{\text{eff},1}^3 / 12 = 55,0$	
$h_0 - 0,5(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) = 45,1$	$(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) t_w = 35,5$	$t_w \frac{(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})^3}{12} = 7308,8$	
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$	$\approx 0$	
$h_0 - 0,5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5,1$	$t_{sl} h_{sl}^3 / 12 = 15,3$	
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0,5b_{sl0} t = 2,4$	$\approx 0$	
$A_{\text{tot}} = \sum A_{\text{eff},i} = 79,8 \text{ mm}^2$ $e_c = \frac{\sum A_{\text{eff},i} e_{\text{eff},i}}{A_{\text{tot}}} = 36,8 \text{ mm}$ $I_{\text{tot}} = \sum I_{\text{eff},i} + \sum A_{\text{eff},i} (e_c - e_{\text{eff},i})^2 = 7\,393,3 + 51\,667,2 = 59\,060,5 \text{ mm}^2$			
Alternativ können die wirksamen Querschnittswerte auch iterativ bezogen auf die Lage der Schwerachse des wirksamen Querschnitts ermittelt werden.			EN 1993-1-3
<b>Momententragfähigkeit je m Breite (1 m)</b>			Kapitel 5.7.4
$I = \frac{1000}{0,5w_0} I_{\text{tot}} = \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 59\,060,5 = 555\,863,5 \text{ mm}^4$			
$W_u = \frac{I}{e_c} = \frac{555\,863,5}{36,8} = 15\,105,0 \text{ mm}^3$			
$W_1 = \frac{I}{h_0 - e_c} = \frac{555\,863,5}{70 - 36,8} = 16\,742,9 \text{ mm}^3$			
da $W_u < W_1 \Rightarrow W_{\text{eff},\text{min}} = W_u = 15\,105,0 \text{ mm}^3$			
$M_{\text{c,Rd}} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} f_y}{\gamma_{M0}} = 15\,105,0 \times 280 \times \frac{10^{-6}}{1,1} = 3,84 \text{ kNm}$			Gl. 5.31
<b>Ermittlung der Tragfähigkeit am mittleren Auflager</b> <b>Bemessungswiderstand des Steges gegen Krüppeln</b>			Kapitel 6.4.4
$c \geq 40 \text{ mm}$			
$r/t = 2/0,6 = 3,33 \leq 10$			EN 1993-1-3
$h_w/t = 70/0,6 = 117 \leq 200 \sin \theta = 200 \sin(57,1^\circ) = 168$			Kapitel 6.1.7
$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$			

Bemessungsbeispiel 3	Blatt 6 von 7
<p><math>\beta_V = 0 \leq 0,2 \Rightarrow l_a = s_s = 100 \text{ mm}</math>  <math>\alpha = 0,15</math> (Kategorie 2)</p> $R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_y E} \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{r}{t}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \frac{l_a}{t}}\right) \left[2,4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right] \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1000}{0,5 w_0}$ $R_{w,Rd} = 0,15 \times 0,6^2 \sqrt{280 \times 200\,000} \times \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{2}{0,6}}\right) \left(0,5 + \sqrt{0,02 \times \frac{100}{0,6}}\right) \times \left[2,4 + \left(\frac{57,1}{90}\right)^2\right] \times \frac{1}{1,1} \times \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 10^{-3} = 18,4 \text{ kN}$ <p><b>Kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Auflagerreaktion</b>  Einwirkung je m Breite (1 m):  <math>q = \gamma_G G + \gamma_Q Q = 1,35 \times 0,07 + 1,5 \times 1,4 = 2,19 \text{ kN/m}</math></p> $M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2,19 \times 2,9^2}{8} = 2,30 \text{ kNm}$ $F_{Ed} = \frac{5}{4} qL = \frac{5}{4} \times 2,19 \times 2,9 = 7,94 \text{ kN}$ $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{2,30}{3,84} = 0,599 \leq 1,0 \qquad \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{7,94}{18,4} = 0,432 \leq 1,0$ $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0,599 + 0,432 = 1,031 \leq 1,25$ <p>Die Querschnittstragfähigkeit erfüllt die Bedingungen.</p> <p><b>Bestimmung der Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</b>  Wirksame Querschnittswerte</p> <p>Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sollte die wirksame Breite des druckbeanspruchten Bauteils ebenfalls mit der Druckspannungsverteilung im Bauteil aus Lasten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt werden.</p> <p>Eine konservative Annäherung für die maximale Druckspannung des wirksamen Querschnitts im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird mit <math>W_u</math> erreicht, welches zuvor im Grenzzustand der Tragfähigkeit bestimmt wurde.</p> $M_{y,Ed,ser} = \frac{(G + Q)L^2}{8} = \frac{(0,07 + 1,4) \times 2,9^2}{8} = 1,55 \text{ kNm}$ $\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = \frac{1,55 \times 10^6}{15\,105} = 102,6 \text{ N/mm}^2$ <p>Die wirksamen Querschnittswerte werden wie im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelt mit der Ausnahme, dass <math>f_y</math> durch <math>\sigma_{com,Ed,ser}</math> ersetzt wird und dass die Dicke der Flanschsteifen nicht abgemindert wird. Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:  Effektive Breite des druckbeanspruchten Flansch: Der Flansch ist vollständig wirksam.  Lage der Schwerachse, wenn der Steg vollständig wirksam <math>e_c = 34,48 \text{ mm}</math>  ist:</p> <p>Wirksamer Querschnitt der druckbeanspruchten Bereiche des Steges: Der Steg ist vollständig wirksam.  Wirksame Querschnittswerte für die halbe Aussteifung (Sicke): -</p>	<p>EN 1993-1-3  Gl. 6.18</p> <p>EN 1993-1-3  Gl. 6.28a-c</p> <p>EN 1993-1-3  Absatz 5.5.1</p>

Wirksame Querschnittswerte je m Breite (1 m):

$$\begin{aligned}
 A_{\text{tot}} &= 88,41 \text{ mm}^2, \\
 e_c &= 34,48 \text{ mm}, \\
 I_{\text{tot}} &= 63759,0 \text{ mm}^4, \\
 I &= 600084,7 \text{ mm}^4, \\
 W_u &= 17403,8 \text{ mm}^3, \\
 W_l &= 16894,3 \text{ mm}^3.
 \end{aligned}$$

**Bestimmung der Verformungen**

Der Sekantenmodul entspricht dem maximalen Biegemoment:

$$\sigma_{1,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_u} = \frac{1,55 \times 10^6}{17403,8} = 89,06 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_l} = \frac{1,55 \times 10^6}{16894,3} = 91,75 \text{ N/mm}^2$$

 $n = 14$  (für die ferritische nichtrostende Stahlsorte 1.4003)

$$E_{S,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,089} \left( \frac{0,089}{0,28} \right)^{14}} = 200,0 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_{S,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,092} \left( \frac{0,092}{0,28} \right)^{14}} = 200,0 \text{ kN/mm}^2$$

$$E_S = \frac{E_{S,1} + E_{S,2}}{2} = \frac{200 + 200}{2} = 200 \text{ kN/mm}^2$$

Die materielle Nichtlinearität der verwendeten Stahlsorte sowie das vorhandene Spannungsniveau wirken sich nicht auf die Verformungen aus.

**Überprüfung der Verformungen:**

Für die Querschnittssteifigkeiten sollte der Einfluss der ausgerundeten Ecken beachtet werden. Der Einfluss wird über die folgende Näherung berücksichtigt:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{2 \times \frac{294,2^\circ}{90^\circ}}{149,3} = 0,019$$

$$I_{y,r} = I (1 - 2\delta) = 600084,7 (1 - 2 \times 0,019) = 577281,5 \text{ mm}^4$$

Lage der maximalen Verformung:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 2,9 = 1,22 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48E_S I_{y,r}} \left( \frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right)$$

$$\delta = \frac{(0,07 + 1,4) \times 10^3 \times 2,9^4}{48 \times 200 \times 10^6 \times 577281,5 \times 10^{-12}} \times \left( \frac{1,48}{2,9} - 3 \times \frac{1,48^3}{2,9^3} + 2 \times \frac{1,48^4}{2,9^4} \right)$$

$$\delta = 4,64 \text{ mm}$$

Die zulässige Verformung beträgt  $L/200 = 2900/200 = 14,5 \text{ mm} > 4,64 \text{ mm}$ . Somit ist die berechnete Verformung zulässig.

Tabelle 6.4

Gl. 6.53

Gl. 6.53

Gl. 6.52

Gl. 5.22

Gl. 5.20



<p><b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b></p> <p><b>BERECHNUNGSVORLAGE</b></p>	Blatt 1 von 2				
	<p><b>Titel</b> Bemessungsbeispiel 4 – Geschweißte Hohlprofilverbindung unter Ermüdungsbeanspruchung</p>				
	<p><b>Auftraggeber</b> Research Fund for Coal and Steel</p>	Erstellt	AAAT	Datum	06/02
		Bearbeitet	MEB	Datum	04/06
Bearbeitet		UDE	Datum	01/17	

<p><b>BEMESSUNGSBEISPIEL 4 – Geschweißte Hohlprofilverbindung unter Ermüdungsbeanspruchung</b></p> <p>In diesem Bemessungsbeispiel wird die Ermüdungsfestigkeit des Gurtes eines geschweißten Anschlusses aus Rechteckhohlprofilen ermittelt. Die Ermüdung sollte bei der Bemessung von Konstruktionen aus nichtrostendem Stahl, die durch wechselnde Spannungen beansprucht werden, berücksichtigt werden, wie z. B. bei Ölplattformen, Masten, Schornsteinen, Brücken, Kränen und Transportvorrichtungen.</p> <p>EN 1993-1-9 ist zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Konstruktionen aus austenitischen und Duplex-Stahl anzuwenden.</p> <p>Dieses Beispiel beinhaltet die folgenden Aspekte einer Ermüdungsbemessung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestimmung der Ermüdungsfestigkeitskurve,</li> <li>- Bestimmung sekundärer Anschlussmomente in der Verbindung,</li> <li>- Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwertes für die Ermüdungsfestigkeit,</li> <li>- Ermüdungsnachweis für unterschiedliche Spannungsamplituden.</li> </ul> <p>Die Gurte des Anschlusses bestehen aus Rechteckhohlprofilen RHP 50×50×4 und die Diagonalen aus RHP 30×30×2. Als Material wird ein nichtrostender austenitischer Stahl der Sorte 1.4301 mit einer 0,2 %-Dehngrenze von 210 N/mm<sup>2</sup> verwendet.</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p><b>Einwirkungen</b></p> <p>Die Gurte sind über die erforderliche Lebensdauer durch die folgenden Ermüdungsspannungsschwingbreiten beansprucht:</p> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">Spannungsschwingbreite:</td> <td>Anzahl der Lastwechsel:</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2</math></td> <td><math>n_1 = 10 \times 10^3</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2</math></td> <td><math>n_2 = 100 \times 10^3</math></td> </tr> <tr> <td><math>\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2</math></td> <td><math>n_3 = 1000 \times 10^3</math></td> </tr> </table> <p><b>Bemessung</b></p> <p>Die Kerbfallkategorie des Knotens ist von den Abmessungen des Gurtes und der Diagonalen abhängig. In diesem Beispiel sind <math>b_0 = 50 \text{ mm}</math>, <math>b_i = 30 \text{ mm}</math>, <math>t_0 = 4 \text{ mm}</math> und <math>t_i = 2 \text{ mm}</math>.</p> <p>Aus <math>t_0/t_i = 2</math> folgt der Kerbfall 71.</p> <p>Da <math>0,5(b_0 - b_i) = 10 \text{ mm}</math>, <math>g = 11 \text{ mm}</math>, <math>1,1(b_0 - b_i) = 22 \text{ mm}</math> und <math>2t_0 = 8 \text{ mm}</math>, erfüllt der Anschluss die Bedingungen <math>0,5(b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_i)</math> und <math>g \geq 2t_0</math>.</p>	Spannungsschwingbreite:	Anzahl der Lastwechsel:	$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$	$n_1 = 10 \times 10^3$	$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$	$n_2 = 100 \times 10^3$	$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$	$n_3 = 1000 \times 10^3$	<p>Kapitel 9</p> <p>Tabelle 2.2</p> <p>Die folgenden Verweise beziehen sich auf EN 1993-1-9</p> <p>Tabelle 8.7</p>
Spannungsschwingbreite:	Anzahl der Lastwechsel:								
$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$	$n_1 = 10 \times 10^3$								
$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$	$n_2 = 100 \times 10^3$								
$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$	$n_3 = 1000 \times 10^3$								

**Einfluss sekundärer Anschlussmomente in der Verbindung**

Der Einfluss sekundärer Anschlussmomente wird durch das Produkt aus der Spannungsschwingbreite, ermittelt aus Stabnormalkräften, und dem Faktor  $k_1 = 1,5$  berücksichtigt.

Satz 4 (2),  
Tabelle 4.2**Teilsicherheitsbeiwerte für die Ermüdungsfestigkeit**

Unter der Annahme, dass die Konstruktion eine Schadenstoleranz aufweist und die Schadenskonsequenzen gering sind, wird ein Wert für den Teilsicherheitsbeiwert für die Ermüdungsfestigkeit von  $\gamma_{Mf} = 1,0$  empfohlen. Der Teilsicherheitsbeiwert für die schadensäquivalente Spannungsschwingbreite beträgt  $\gamma_{FF} = 1,0$ .

Satz 3 (7),  
Tabelle 3.1**Ermüdungsnachweis**

Die Bezugsspannungsschwingbreite bei  $2 \times 10^6$  Spannungswechseln für den Kerbfall 71 wird mit  $\Delta\sigma_c = 71 \text{ N/mm}^2$  angesetzt.

Abb. 7.1

Die Ermüdungsfestigkeitskurve für Fachwerke hat eine konstante Steigung von  $m = 5$ .

Die Anzahl der Lastspiele entsprechend der Nennschwingbreite  $\Delta\sigma_i$  ist:

$$N_i = 2 \times 10^6 \left[ \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf} \gamma_{FF} (k_1 \Delta\sigma_i)} \right]^m$$

$$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$N_1 = 47,5 \times 10^3$$

$$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$$

$$N_2 = 283 \times 10^3$$

$$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$N_3 = 4640 \times 10^3$$

**Schadensakkumulation nach Palmgren-Miner**

Teilschädigung aufgrund von  $n_i$  Lastwechseln der Schwingbreite  $\Delta\sigma_i$ :  $D_{d,i} = n_{Ei} / N_{Ri}$

Daher ist:

$$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2$$

$$D_{d,1} = 0,21$$

A.5 (1)

$$\Delta\sigma_2 = 70 \text{ N/mm}^2$$

$$D_{d,2} = 0,35$$

$$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2$$

$$D_{d,3} = 0,22$$

Die Schadensakkumulation während der Lebensdauer beträgt:

Gl. A.1

$$D_d = \sum_i \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} = \sum D_{d,i} = 0,78 \leq 1,0$$

Da die Schadensakkumulation kleiner als 1 ist, ist die Bemessungslebensdauer des Gurtes größer als die erforderliche Lebensdauer.

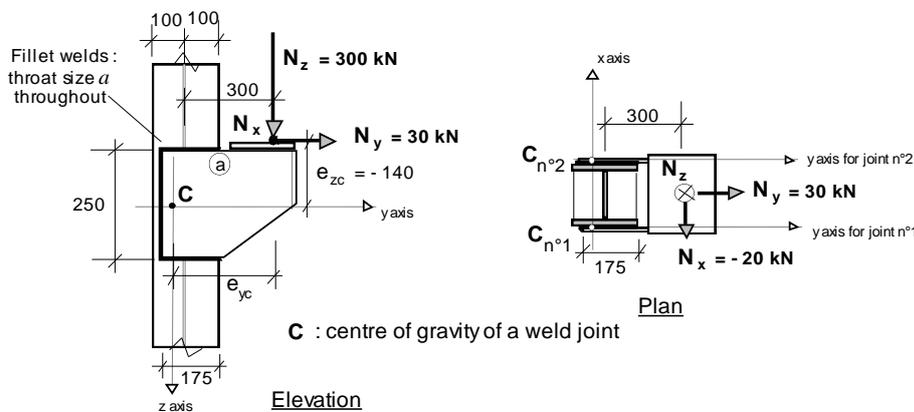
Satz 8 (4)

Das beschriebene Verfahren ist auch für die Diagonalen anzuwenden.

<p><b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b></p> <p><b>BERECHNUNGSVORLAGE</b></p>	Blatt 1 von 7				
	Titel Bemessungsbeispiel 5 – Geschweißter Anschluss				
	Auftraggeber	Research Fund for Coal and Steel	Erstellt	IR	Datum
Bearbeitet			MEB	Datum	04/06
Bearbeitet			UDE	Datum	01/17

**BEMESSUNGSBEISPIEL 5 – Geschweißter Anschluss**

Das Verbindungsdetail sowie die Einwirkungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Dabei wird die Belastung über zwei identische, ebene Kehlnähte mit konstanter Nahtdicke übertragen. Die erforderliche Schweißnahtdicke soll bestimmt werden. Es sollen durchgehend rechtwinklige (gleichschenklige) Schweißnähte verwendet werden.



**Materialeigenschaften**

Es wird ein austenitischer Stahl der Sorte 1.4401 mit den folgenden Materialeigenschaften verwendet:

$f_y = 220 \text{ N/mm}^2, f_u = 530 \text{ N/mm}^2, E = 200000 \text{ N/mm}^2$  und  $G = 76900 \text{ N/mm}^2$ .

Es wird angenommen, dass die Streckgrenze und die Zugfestigkeit der Schweißnaht größer sind als die entsprechenden Werte des Grundwerkstoffes.

**Teilsicherheitsbeiwerte**

Teilsicherheitsbeiwert für den Schweißnahttragfähigkeit:  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

Außerdem wird untersucht, ob ein Abminderungsfaktor für die Schweißnahttragfähigkeit bezogen auf die Schweißnahtlänge, berücksichtigt werden muss.

**Berechnung geschweißter Anschlüsse**

Um die rechtwinklige, gleichschenklige Kehlnaht für den oben genannten Lastfall zu bemessen, wird ein elastischer Berechnungsansatz verwendet, womit die Schweißnahttragfähigkeit allerdings nur konservativ abgeschätzt wird.

Die Koordinaten eines Punktes ( $x_c, y_c, z_c$ ) auf der Schweißnaht beziehen sich in einem Rechte-Hand-Achssystem auf den Ursprung im Schwerpunkt des geschweißten Anschlusses. (Im diesem Beispiel liegt der Anschluss in der y-z-Ebene, sodass  $x_c = 0$  ist.)

Das Hauptziel der elastischen Berechnung ist die Bestimmung der Bemessungsschnittgrößen in der Schweißnaht an der oder den maßgebenden Stellen des geschweißten Anschlusses, welche oft auch als "kritische" Punkte bezeichnet werden. In diesem Beispiel kann der kritische Punkt als der Punkt angenommen werden, der am weitesten vom Schwerpunkt des Anschlusses entfernt ist.

Tabelle 2.2  
Kapitel 2.3.1  
Kapitel 7.4.1

Tabelle 4.1

EN 1993-1-8  
Satz 2.5

Die Lastvektoren, die Exzentrizität und die daraus resultierenden Momente, durch welche der geschweißte Anschluss grundsätzlich und im Schwerpunkt C beansprucht wird, können wie folgt bestimmt werden:

### Lastvektor

$$\overline{N}_{w,Ed} = \begin{bmatrix} N_{x,Ed} & N_{y,Ed} & N_{z,Ed} \end{bmatrix}$$

### Exzentrizität des Lastvektors

$$\overline{e}_N = \begin{bmatrix} e_{xc} & e_{yc} & e_{zc} \end{bmatrix}$$

(dies sind die Koordinaten des Angriffspunktes der einwirkenden Kraft  $N_{w,Ed}$ )

### Resultierende Momente

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed}$$

Eine linear-elastische Berechnung des Anschlusses für eine allgemeine Lastfallkombination führt zu den folgenden Lastkomponenten je Längeneinheit der Schweißnaht an einem Punkt mit den Koordinaten  $(x_c, y_c, z_c)$  und der Schweißnahtdicke  $a$ :

$$F_{wx,Ed} = a \left[ \frac{N_{x,Ed}}{A_w} + \frac{z_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} - \frac{y_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} \right]$$

$$F_{wy,Ed} = a \left[ \frac{N_{y,Ed}}{A_w} + \frac{x_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} - \frac{z_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} \right]$$

$$F_{wz,Ed} = a \left[ \frac{N_{z,Ed}}{A_w} + \frac{y_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} - \frac{x_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} \right]$$

In den vorangegangenen Formeln sind die Querschnittsfläche der Schweißnaht und das Flächenträgheitsmoment bezogen auf die Hauptachsen des geschweißten Anschlusses wie folgt zu bestimmen:

$$A_w = \int a dl = \sum a_i l_i$$

Für eine Schweißnaht mit geraden Längensegmenten  $l_i$  und einer Schweißnahtdicke  $a_i$  gilt:

$$I_{xc} = \int a (y_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{yc} = \int a (x_c^2 + z_c^2) dl$$

$$I_{zc} = \int a (x_c^2 + y_c^2) dl$$

Wenn alle Schweißnähte dieselbe Schweißnahtdicke  $a$  aufweisen gilt:

$$\frac{A_w}{a} = \int dl = \sum l_i$$

und mit  $x_c = 0$ :

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 dl$$

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 dl$$

$$\frac{I_{xc}}{a} = \int y_c^2 + z_c^2 dl = \frac{I_{yc}}{a} + \frac{I_{zc}}{a}$$

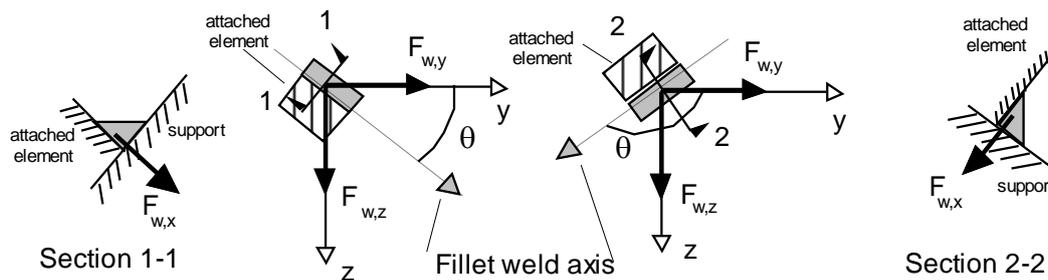
Bemessungsbeispiel 5	Blatt 3 von 7
<p><b>Bemessung der Kehlnähte</b></p> <p>Es bestehen zwei verschiedene Verfahren für die Bemessung von Kehlnähten und demnach auch zur Bestimmung der erforderlichen Schweißnahtdicke an den kritischen Punkten erlaubt:</p> <p>Das erste Verfahren beruht auf der vereinfachten und konservativeren Bemessungsschubfestigkeit für Kehlnähte. Die Bemessungsschubkraft je Längeneinheit der Schweißnaht an jedem Punkt des Anschlusses wird als Summe der Bemessungslastvektoren je Längeneinheit unter Berücksichtigung aller Kräfte und Momente die über die Schweißnaht übertragen werden, bestimmt. Die Bemessungsschubkraft je Längeneinheit sollte den Bemessungswiderstand je Längeneinheit, welcher das Produkt aus der Bemessungsschubfestigkeit und der Schweißnahtdicke ist, nicht überschreiten. Dieser Ansatz vernachlässigt die Orientierung der Schweißnahtfläche in Richtung der resultierenden Schweißnahtkräfte je Längeneinheit.</p> <p>Das zweite Verfahren basiert auf dem Vergleich der Bemessungsfestigkeit des schwächeren der angeschlossenen Bauteile mit der Bemessungsspannung in der Schweißnaht, ermittelt anhand einer von-Mises-Berechnung. Dieser Ansatz ist die genauere Variante, da hierbei die Orientierung der Schweißnahtfläche in Richtung der resultierenden Schweißnahtkräfte je Längeneinheit berücksichtigt werden.</p> <p><u>1. Vereinfachtes Verfahren</u></p> <p>Der Nachweis für den Bemessungswiderstand der Kehlnaht lautet wie folgt:</p> $F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} \leq F_{w,Rd} = \alpha f_{vw,d} = \alpha \left( \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)$ <p>Dabei gilt:  <math>f_{vw,d}</math> Bemessungsschubfestigkeit der Schweißnaht,  <math>F_{w,Rd}</math> Bemessungs(schub)widerstand je Längeneinheit der Schweißnaht mit der Dicke <math>a</math>.</p> <p>Für nichtrostenden Stahl wird <math>\beta_w</math> mit 1,0 angenommen.</p> <p>Zur Bestimmung der erforderlichen Nahtdicke wird folgende Formel verwendet:</p> $a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}}$ <p><u>2. Richtungsbezogenes Verfahren</u></p> <p>Beim Richtungsbezogenem Verfahren werden die durch die Schweißnaht zu übertragenden Kräfte in Normal- und Schubspannungen aufgeteilt, bezogen auf den Schweißnahtquerschnitt (siehe Bild 4.5 in EN 1993-1-8):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Normalspannung <math>\sigma_{\perp}</math> senkrecht zum Schweißnahtquerschnitt,</li> <li>• Schubspannung <math>\tau_{  }</math> im Schweißnahtquerschnitt parallel zur Schweißnahtachse,</li> <li>• Schubspannung <math>\tau_{\perp}</math> im Schweißnahtquerschnitt senkrecht zur Schweißnahtachse.</li> </ul> <p>Die Normalspannung <math>\sigma_{  }</math> parallel zur Schweißnahtachse muss nicht berücksichtigt werden.</p> <p>Bei Kombinationen der Spannungen <math>\sigma_{\perp}</math>, <math>\tau_{  }</math>, und <math>\tau_{\perp}</math> sind folgende Nachweise zu führen:</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{  }^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{und} \quad \sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>In diesem Beispiel eines ebenen Anschlusses mit rechtwinkligen (gleichschenkligen) Kehlnähten werden die letzten beiden Nachweise nicht maßgebend. Bei teilweise durchgeschweißten Nähten in schrägen Anschlüssen kann dies aber der Fall sein.</p>	<p>Kapitel 7.4.2</p> <p>EN 1993-1-8 Satz 4.5.3.3</p> <p>Kapitel 7.4.2</p> <p>Gl. 7.14 und 7.15</p>

Alternativ zur Berechnung der Spannungskomponenten in der Schweißnaht kann der folgende Nachweis bei Anschlüssen, die in der y-z-Ebene liegen und rechtwinklige (gleichschenklige) Schweißnähte besitzen geführt werden.

$$2F_{w,x}^2 + 2F_{w,y}^2 + 2F_{w,z}^2 + F_{w,y}^2 \cos^2 \theta + F_{w,z}^2 \sin^2 \theta - 2F_{w,x} F_{w,y} \sin \theta + 2F_{w,x} F_{w,z} \cos \theta + 2F_{w,y} F_{w,z} \sin \theta \cos \theta \leq \left( a \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)^2$$

*Anmerkung:* Die Indizes wurden abgekürzt:  $F_{w,x}$  für  $F_{w,x,Ed}$  etc.

In den vorangegangenen Gleichungen beschreibt  $\theta$  den Winkel zwischen der y-Achse und der Schweißnahtachse:



**Die Lastkomponenten an der maßgebenden Stelle der Schweißnaht werden im Anhang dieses Bemessungsbeispiels ermittelt.**

**1. Vereinfachtes Verfahren**

Die Bemessungsschubfestigkeit für das vereinfachte Verfahren berechnet sich wie folgt:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} = \frac{530}{1,0 \times 1,25 \times \sqrt{3}} \approx 245 \text{ N/mm}^2$$

EN 1993-1-8:  
Gl. 4.4

Der Wert der resultierenden Kraft je Längeneinheit in einer Schweißnaht mit einer Dicke von 1 mm ergibt sich wie folgt:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} = \sqrt{243^2 + 747^2 + 966^2} = 1245 \text{ N/mm}$$

Die erforderliche Schweißnahtdicke beträgt:

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}} = \frac{1245}{245} \approx 5,0 \text{ mm}$$

**2. Richtungsbezogenes Verfahren**

Am Punkt (a), mit  $\theta = 0^\circ$ , wird folgender Nachweis geführt:

$$2F_{wx,Ed}^2 + 3F_{wy,Ed}^2 + 2F_{wz,Ed}^2 + 2F_{wx,Ed} F_{wz,Ed} \leq \left( a \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \right)^2$$

Die erforderliche Schweißnahtdicke beträgt:

$$a \geq \sqrt{\frac{2 \times (-243)^2 + 3 \times (747)^2 + 2 \times (966)^2 + 2 \times (-243) \times (966)}{530 / 1,25}} = 4,8 \text{ mm}$$

Die Schweißnahtdicke wird mit 5 mm festgelegt und es wird angenommen, dass die Schweißnaht mit der erforderlichen Dicke über die gesamte Länge ausgeführt wird.

**Anmerkung:** Für eine Laschenverbindung wird ein Abminderungsbeiwert erforderlich, wenn die wirksame Länge der Kehlnaht größer als  $150a$  ist. Bei dem Anschlusstyp in diesem Beispiel wird der Abminderungsfaktor allerdings nicht maßgebend. Dennoch ergibt sich folgende Gleichung, wenn man auf der sicheren Seite liegend die komplette Länge des geschweißten Anschlusses und eine Schweißnahtdicke von 5 mm ansetzt:

$$\beta_{LW.1} = 1,2 - \frac{0,2L_j}{150a} = 1,2 - \frac{0,2 \times 600}{150 \times 5} = 1,04 > 1,0$$

mit  $\beta_{LW.1} = 1,0$ .

Demzufolge ist in diesem Beispiel eine Abminderung der Bemessungstragfähigkeit der Schweißnaht nicht erforderlich.

**Anhang – Berechnung der Kraftkomponenten an der maßgebenden Stelle der Schweißnaht**

**Querschnittswerte des geschweißten Anschlusses**

Auf beiden Seiten der Stütze ist jeweils der gleiche Anschluss zur Aufnahme der Einwirkungen vorgesehen, weshalb nur einer berechnet werden muss.

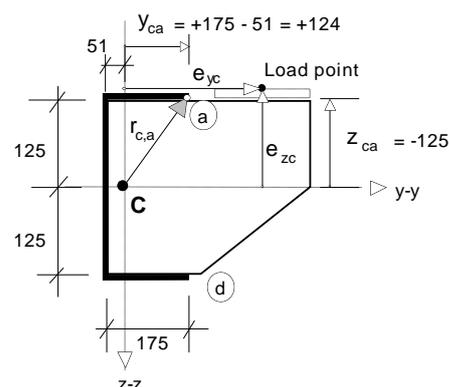
Schweißnahtquerschnitt und Lage des Schwerpunktes sowie des maßgebenden Punktes

Der Schweißnahtquerschnitt (tragfähiger Querschnitt) jedes Anschlusses besteht aus geraden Abschnitten der Länge  $L_i$  mit einer konstanten Schweißnahtdicke  $a$  und beträgt je mm Schweißnahtdicke:

$$\frac{A_w}{a} = \frac{a \int ds}{a} = \frac{\sum A_{w,i}}{a} = \frac{\sum aL_{w,i}}{a} = \sum L_i = 2 \times 175 + 250 = 600 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Der Abstand des Schwerpunktes zur vertikalen Seite des Anschlusses (parallel zur z-Achse) bei konstanter Nahtdicke  $a$  beträgt:

$$y = \frac{\sum y_i \frac{A_{w,i}}{a}}{\sum \frac{A_{w,i}}{a}} = \frac{\sum y_i L_i}{\sum L_i} = \frac{2 \times (87,5 \times 175) + 0 \times 250}{600} \approx 51 \text{ mm}$$



Die Koordinaten des maßgebenden Punktes (a) des Anschlusses bezogen auf die Hauptachsen durch den Schwerpunkt ergeben wie folgt zu:

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{ca} = -125 \text{ mm}$$

**Anmerkung:** Der Punkt (d) kann ebenfalls als maßgebender Punkt betrachtet werden, wobei gilt:

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ mm} \quad z_{ca} = +125 \text{ mm}$$

Allerdings ist Punkt (a) für den betrachteten Lastfall maßgebend.

EN 1993-1-8  
Gl. 4.9

Flächenträgheitsmoment zweiten Grades der Querschnittsfläche des Anschlusses

Für jeden Anschluss und je 1 mm der Schweißnahtdicke gilt:

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 ds = 2 \times 175 \times 125^2 + \frac{250^3}{12} = 6,77 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 ds = 250 \times 51^2 + 2 \times \frac{175^3}{12} + 2 \times 175 \times (87,5 - 51)^2 = 2,01 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Das Torsionsmoment für jeden Anschluss lautet:

$$I_{xc} = a \int r_c^2 ds = a \int y_c^2 ds + a \int z_c^2 ds = I_{zc} + I_{yc}$$

Daraus folgt:

$$\frac{I_{xc}}{a} = (6,77 + 2,01) \times 10^6 = 8,78 \times 10^6 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Einwirkende Kräfte und Momente

Es wird angenommen, dass die einwirkenden Lasten und Momente sich gleichmäßig auf beide Anschlüsse aufteilen.

Die einwirkenden Normal- und Querkräfte in jedem Anschluss ergeben sich wie folgt:

$$N_{x,Ed} = -\frac{20}{2} = -10 \text{ kN} \quad N_{y,Ed} = +\frac{30}{2} = +15 \text{ kN} \quad N_{z,Ed} = +\frac{300}{2} = +150 \text{ kN}$$

Die einwirkenden Momente ergeben sich aus den einwirkenden Lasten und den entsprechenden Exzentrizitäten. Die Exzentrizitäten, d.h. die Koordinaten der Lastangriffspunkte, ergeben sich wie folgt:

$e_{xc} = 0$ , da der Lastangriffspunkt in der y-z-Ebene des Anschlusses Naht liegt

$$e_{yc} = 300 - 100 + 175 - 51 = +324 \text{ mm}$$

$$e_{zc} = -140 \text{ mm}$$

Die wirkenden Momente in jedem Anschluss ergeben sich daraus zu:

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed} = (+324) \times (+150) - (-140) \times (+15) = +50,7 \text{ kNm}$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed} = (-140) \times (-10) - (0) \times (+150) = +1,4 \text{ kNm}$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed} = (0) \times (+15) - (+324) \times (-10) = +3,24 \text{ kNm}$$

**Kraftkomponenten an der maßgebenden Stelle der Schweißnaht**

Für den Punkt (a) des ebenen Anschlusses, der in der y-z-Ebene liegt, ergeben sich in der Schweißnaht folgende Kraftkomponenten je Längeneinheit:

$$F_{w,x,Ed} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w/a} + \frac{z_{ca} M_{yc,Ed}}{I_{yc}/a} - \frac{y_{ca} M_{zc,Ed}}{I_{zc}/a}$$

$$F_{w,y,Ed} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w/a} - \frac{z_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc}/a}$$

$$F_{w,z,Ed} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w/a} + \frac{y_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc}/a}$$

Die Anteile an den Schweißnahtkräften (an jedem Punkt des geschweißten Anschlusses) ergeben sich aus den einwirkenden Kräften wie folgt:

$$F_{w,x}^{N_x} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w/a} = \frac{-10}{600} = -17 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,y}^{N_y} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w/a} = \frac{+15}{600} = +25 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{N_z} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w/a} = \frac{+150}{600} = +250 \text{ N/mm}$$

Die verschiedenen Anteile an den Schweißnahtkräften je Längeneinheit der Schweißnaht ergeben sich aus den einwirkenden Kräften am Punkt (a) wie folgt:

$$F_{w,y}^{M_{xc}} = -M_{xc,Ed} \frac{z_{c,a}}{I_{xc}/a} = -50,7 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{8,78 \times 10^6} = +722 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z}^{M_{xc}} = +M_{xc,Ed} \frac{y_{c,a}}{I_{xc}/a} = +50,7 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{8,78 \times 10^6} = +716 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{yc}} = +M_{yc,Ed} \frac{z_{c,a}}{I_{yc}/a} = +1,41 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{6,77 \times 10^6} = -26 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,x}^{M_{zc}} = -M_{zc,Ed} \frac{y_{c,a}}{I_{zc}/a} = -3,24 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{2,01 \times 10^6} = -200 \text{ N/mm}$$

Durch Kombination der Anteile aus den Kräften und Momenten ergeben sich am Punkt (a) folgende Kraftkomponenten:

$$F_{w,x,Ed} = F_{w,x}^{N_x} + F_{w,x}^{M_{yc}} + F_{w,x}^{M_{zc}} = -17 - 26 - 200 = -243 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,y,Ed} = F_{w,y}^{N_y} + F_{w,y}^{M_{xc}} = +25 + 722 = +747 \text{ N/mm}$$

$$F_{w,z,Ed} = F_{w,z}^{N_z} + F_{w,z}^{M_{xc}} = +250 + 716 = +966 \text{ N/mm}$$

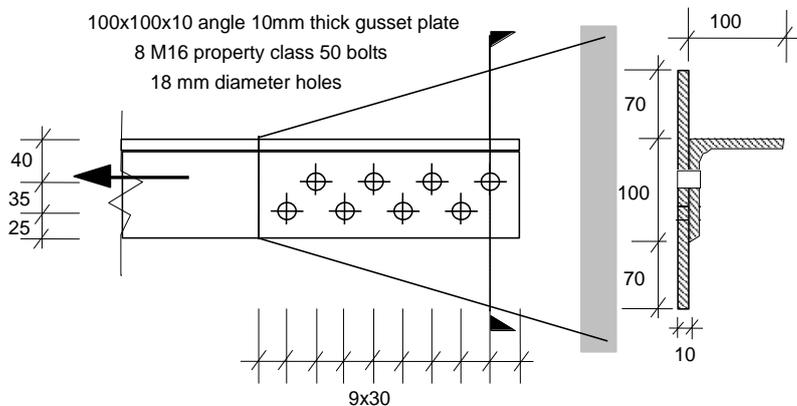
Diese resultierenden Kraftkomponenten je Längeneinheit gelten für einen geschweißten Anschluss mit einer Schweißnahtdicke von 1 mm über die volle Länge.



<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 6		
	Titel      Bemessungsbeispiel 6 – Geschraubter Anschluss		
	Auftrag- geber      Research Fund for Coal and Steel	Erstellt      IR	Datum      10/02
Bearbeitet      MEB		Datum      04/06	
Bearbeitet      UDE		Datum      01/17	

### BEMESSUNGSBEISPIEL 6 – Geschraubter Anschluss

Ein zugbeanspruchtes Winkelprofil (L 100×100×10) wird mit einem 10 mm dicken Knotenblech angeschlossen. Austenitischer nichtrostender Stahl der Sorte 1.4401 wird sowohl für das Winkelprofil als auch für das Knotenblech verwendet. Acht austenitische Schrauben der Festigkeitsklasse 50 mit einem Durchmesser von 16 mm verbinden in zwei versetzt angeordneten Reihe einen Schenkel des Winkelprofils mit dem Knotenblech. Der Bemessungswiderstand des Anschlusses ist zu bestimmen.



Es handelt sich um einen Anschluss der Kategorie A: Lochleibungsverbindung. Der Bemessungswert der einwirkenden Scherkraft darf weder den Bemessungswert der Schertragfähigkeit noch den Bemessungswert des Lochleibungswiderstandes überschreiten.

#### Materialeigenschaften

Der Winkel und das Knotenblech bestehen aus austenitischem nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4401 mit:

$$f_y = 220 \text{ N/mm}^2 \text{ und } f_u = 530 \text{ N/mm}^2.$$

Die Schrauben bestehen aus austenitischem Material der Festigkeitsklasse 50 mit:

$$f_{yb} = 210 \text{ N/mm}^2 \text{ und } f_{ub} = 500 \text{ N/mm}^2.$$

#### Teilsicherheitsbeiwerte

für den Widerstand des Bruttoquerschnitts:

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$$

für den Widerstand des Nettoquerschnitts:

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

für den Schraubenwiderstand gegen Abscheren und Lochleibung:

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

#### Lage und Größe der Schraubenlöcher

Für M16 Schrauben ist ein Lochdurchmesser  $d_0 = 18 \text{ mm}$  erforderlich.

Randabstände  $e_1 = 30 \text{ mm}$  und Eckabstände  $e_2 = 25 \text{ mm}$  sind einzuhalten.

$$e_1 \text{ und } e_2 < 4t + 40 = 4 \times 10 + 40 = 80 \text{ mm und} \\ > 1,2d_0 = 1,2 \times 18 = 21,6 \text{ mm}$$

EN 1993-1-8  
Satz 3.4.1

Tabelle 2.2

Kapitel 2.3.1

Kapitel 2.6

Tabelle 4.1

Kapitel 7.2.3

Bei versetzt angeordneten Schraubenreihen:

- Abstand zwischen Schrauben  $p_1 = 60 \text{ mm} > 2,2d_0 = 39,6 \text{ mm}$ ,
- Abstand zwischen zwei Schrauben in versetzt angeordneten Schraubenreihen:

$$\sqrt{30^2 + 35^2} = 46,1 \text{ mm} > 2,4d_0 = 43,2 \text{ mm} ,$$

- daraus ergibt sich der Abstand zwischen Schrauben in versetzt angeordneten Schraubenreihen zu  $p_2 = 35 \text{ mm} > 1,2d_0 = 21,6 \text{ mm}$ .

*Anmerkung: Bei Druckbeanspruchung sollten die Abstände  $e_2$  und  $p_1$  überprüft werden, hinsichtlich der Anforderungen gegen lokales Knicken für sowohl einseitig als auch beidseitig gestützte Bauteile. Dabei müssen sowohl das Winkelprofil als auch das Knotenblech überprüft werden.*

**Bemessungswiderstand der Bruttoquerschnittsfläche des zugbeanspruchten Winkels**

Kapitel 7.2.3

Bruttoquerschnittsfläche des Winkels:  $A_g = 1915 \text{ mm}^2$

Bemessungswert der plastischen Normalkrafttragfähigkeit:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1915 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 383 \text{ kN}$$

Gl. 7.6

**Bemessungswiderstand der Nettoquerschnittsfläche des zugbeanspruchten Winkels**

Kapitel 5.6.4

Bei versetzt angeordneten Löchern wird die Nettoquerschnittsfläche als das Minimum aus entweder der Bruttoquerschnittsfläche mit dem Abzug für nicht versetzt angeordnete Löcher oder dem folgenden Wert bestimmt:

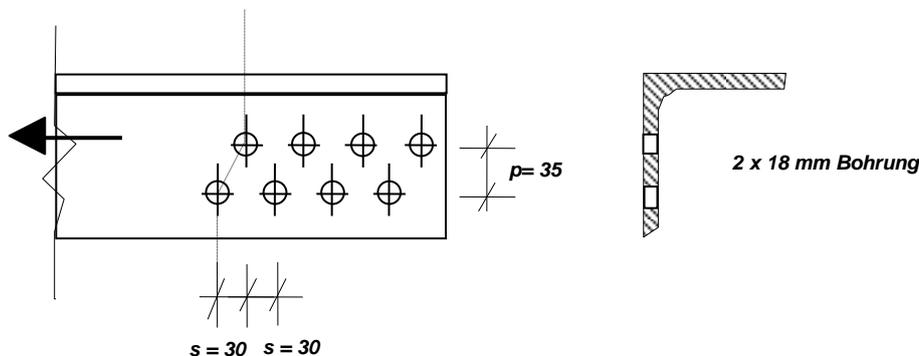
$$A_g - t \left( nd_0 - \sum \left[ \frac{s^2}{4p} \right] \right)$$

Der Abzug für nicht versetzte Löcher ergibt sich wie folgt:

$$A_g - td_0 = 1915 - 10 \times 18 = 1735 \text{ mm}^2$$

Die Nettoquerschnittsfläche durch zwei versetzt angeordnete Löcher ergibt sich wie folgt:

mit:  $n = 2$ ,  $s = 30 \text{ mm}$  und  $p = 35 \text{ mm}$



$$\begin{aligned} A_{net} &= A_g - t \left( nd_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right) = 1915 - 10 \times \left( (2 \times 18) - \frac{30^2}{4 \times 35} \right) \\ &= 1915 - 10 \times (36 - 6,4) = 1619 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Somit ist  $A_{net} = 1619 \text{ mm}^2$ .

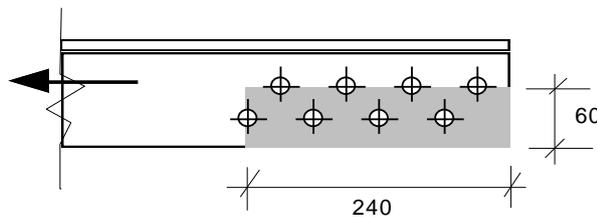
Auf der sicheren Seite liegend kann der Abminderungsbeiwert für einen Winkel, der an einem Schenkel mit einer einzelnen Schraubenreihe angeschlossen ist angesetzt werden. Durch Interpolation für mehr als drei Schrauben in einer Reihe erhält man  $\beta_3 = 0,57$ .

Der Bemessungswiderstand des Nettoquerschnitts des Winkels ergibt sich zu:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,57 \times 1619 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 391 \text{ kN}$$

### Bemessungswiderstand des Winkels gegen Blockversagen

Die Gleichungen für das Blockversagen sind EN 1993-1-8 (anstelle EN 1993-1-1) entnommen, da in EN 1993-1-8 explizit Winkel betrachtet werden.



Bemessungswiderstand gegen Blockversagen bei Berücksichtigung von versetzt angeordneten Schrauben:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 530 \times (60 - 18) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 89 + 194 = 283 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8  
Satz 3.10.2(3)  
Gl. 3.10

Bemessungswiderstand gegen Blockversagen bei Berücksichtigung von nicht versetzt angeordneten Schrauben:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,5 \times 530 \times (60 - 18 - 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3}$$

$$= 70 + 204 = 274 \text{ kN}$$

EN 1993-1-8  
Satz 3.10.2(3)  
Gl. 3.10

### Bemessungswiderstand der Bruttoquerschnittsfläche des Knotenblechs

Die Bruttoquerschnittsfläche am Ende des Winkels ergibt sich zu:

$$A_g = 10 \times (100 + 70 + 70) = 2400 \text{ mm}^2$$

Bemessungswert der plastischen Normalkrafttragfähigkeit:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2400 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 480 \text{ kN}$$

Gl. 5.23

### Bemessungswiderstand der Nettoquerschnittsfläche des Knotenblechs

Nettoquerschnittsfläche am Ende des Winkels (wo die einwirkende Last maximal wird) durch ein unsymmetrisch angeordnetes Loch und mit einer Breite von:

Kapitel 5.7.2

$$b = 100 + 70 + 70 = 240 \text{ mm}$$

$$A_{net} = A_g - d_0 t = 2400 - 18 \times 10 = 2220 \text{ mm}^2$$

Nettoquerschnittsfläche am Ende des Winkels durch zwei versetzt angeordnete Löcher mit  $s = 30 \text{ mm}$  und  $p = 35 \text{ mm}$ :

$$A_{net} = A_g - 2d_0 t + \frac{s^2 t}{4p} = 2400 - 2 \times 18 \times 10 + \frac{30^2 \times 10}{4 \times 35}$$

$$= 2400 - 360 + 64 = 2104 \text{ mm}^2$$

Somit ist  $A_{net} = 2104 \text{ mm}^2$ .

Bemessungswiderstand der Nettoquerschnittsfläche des Knotenblechs am Ende des Winkels:

$$N_{u,Rd} = \frac{kA_{net}f_u}{\gamma_{M2}}$$

Gl. 5.24

In diesem Beispiel wird der Beiwert  $k = 1,0$  angenommen. ( $k = 1,0$  für Querschnitte mit glatten Löchern)

$$N_{u,Rd} = \frac{1,0 \times 2104 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 892 \text{ kN}$$

Es wird empfohlen den Widerstand der Nettoquerschnittsfläche auch an anderen Stellen im Knotenblech zu überprüfen.

#### Querschnittsfläche am ersten Schraubenloch am Ende des Knotenblechs

(wo  $b = 100 + 30 / 240 \times 140 = 117,5 \text{ mm}$ )

$$A_{net} = A_g - d_{0t} = 117,5 \times 10 - 18 \times 10 = 995 \text{ mm}^2$$

Der Querschnitt muss die Last aus seiner Schraube übertragen können.

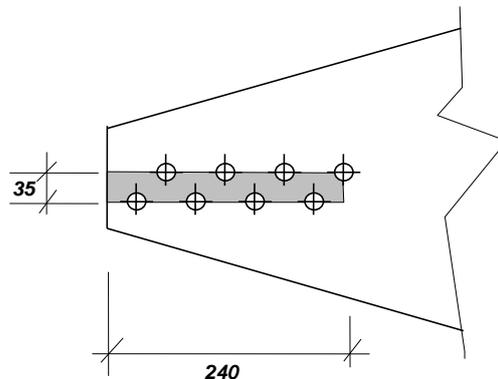
Bemessungswert der Tragfähigkeit im Querschnitt:

$$N_{u,Rd} = \frac{kA_{net}f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{1,0 \times 995 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 421 \text{ kN}$$

Gl. 5.24

Da die einwirkende Last nicht größer werden kann als die Tragfähigkeit des Winkelprofils, welche kleiner ist als die Tragfähigkeit des Knotenblechs, muss das Knotenblech an keiner weiteren Stelle überprüft werden.

#### **Bemessungswiderstand des Knotenblechs gegen Blockversagen**



Bemessungswiderstand gegen Blockversagen bei Berücksichtigung von versetzt angeordneten Schrauben:

$$\begin{aligned} V_{\text{eff},1,Rd} &= \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \\ &= \frac{530 \times (35 - 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18 + 240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3} \\ &= 110,2 + 398,4 = 508 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8  
Satz 3.10.2(2)  
Gl. 3.9

Bemessungswiderstand gegen Blockversagen bei Berücksichtigung von nicht versetzt angeordneten Schrauben:

$$\begin{aligned} V_{\text{eff},1,Rd} &= \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} \\ &= \frac{530 \times (35 - 2 \times 9) \times 10}{1,25 \times 10^3} + \frac{220 \times (2 \times 240 - 6 \times 18 - 2 \times 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^3} \\ &= 72,1 + 408,8 = 480 \text{ kN} \end{aligned}$$

EN 1993-1-8  
Satz 3.10.2(2)  
Gl. 3.9

**Bemessungswiderstand der Schrauben gegen Abscheren**

Bemessungswiderstand von Schrauben der Festigkeitsklasse 50 mit einem Durchmesser M16 und einer Querschnittsfläche von  $A = A_s = 157 \text{ mm}^2$ :

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$$

Gl. 7.11

Der Wert  $\alpha$  kann im Nationalen Anhang festgelegt werden. Der empfohlene Wert ist 0,6 für den Fall, dass die Scherfuge sowohl im Gewinde der Schraube liegt als auch für den Fall, dass die Scherfuge im Schaft der Schraube liegt.

Kapitel 7.2.4

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 500 \times 157}{1,25 \times 10^3} = 37,7 \text{ kN}$$

Bemessungswiderstand einer Schraubengruppe auf Abscheren:

$$n_b F_{v,Rd} = 8 \times 37,7 = 302 \text{ kN}$$

**Bemessungswiderstand der Schrauben/des Blechs gegen Lochleibung**

Der Bemessungswert für geschraubte Verbindungen gegen Lochleibung ergibt sich wie folgt:

Kapitel 7.2.3

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 \alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}}$$

Gl. 7.1

Für den Bemessungswiderstand gegen Lochleibung für das 10 mm dicke Knotenblech mit M16-Schrauben am Ende des Bleches werden folgende Parameter benötigt:

Randabstand  $e_1 = 30 \text{ mm}$ , Eckabstand  $e_2 = 25 \text{ mm}$  ( $> 1,2d_0 = 21,6 \text{ mm}$ ) und Schraubenabstände  $p_1 = 60 \text{ mm}$  und  $p_2 = 35 \text{ mm}$ .

Geschraubte Verbindungen werden in zwei Gruppen unterteilt, abhängig von der Dicke der miteinander verbundenen Bleche. Verbindungen mit dicken Blechen bestehen aus Blechen mit Dicken größer als 4 mm und bei Blechdicken unter oder gleich 4 mm spricht man von Verbindungen mit dünnen Blechen.

Kapitel 7.2.3

In diesem Beispiel handelt es sich um eine Verbindung mit dicken Blechen mit  $t_{\min} = 10 \text{ mm}$  und Verformungen sind kein maßgebendes Kriterium.

Für die äußerste Schraube mit den Abständen  $e_1 = 30 \text{ mm}$  und  $p_1 = 60 \text{ mm}$  ergibt sich der Lochleibungskoeffizient in Krafrichtung  $\alpha_b$  wie folgt:

$$\begin{aligned} \alpha_b &= \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{e_1}{3d_0} \end{array} \right\} \\ &= \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{30}{3 \times 18} = 0,556 \end{array} \right\} = 0,556 \end{aligned}$$

Der Lochleibungsbeiwert quer zur Krafrichtung  $k_t$  ergibt sich wie folgt:

$$k_t = \begin{cases} 1,0 & \text{for } \left( \frac{e_2}{d_0} \right) > 1,5 \\ 0,8 & \text{for } \left( \frac{e_2}{d_0} \right) \leq 1,5 \end{cases}$$

$$k_t = 0,8 \quad \text{for } \frac{e_2}{d_0} = \frac{25}{18} = 1,39 \leq 1,5$$

Der Bemessungswiderstand dieser geschraubten Verbindung gegenüber Lochleibung für die äußerste Schraube ergibt sich wie folgt:

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5\alpha_b k_t t d f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \times 0,556 \times 0,8 \times 10 \times 16 \times 530}{1,25 \times 10^3} = 75,44 \text{ kN}$$

Gl. 7.1

Bemessungswiderstand der Verbindung gegenüber Lochleibung:

$$n_b F_{b,Rd} = 8 \times 75,44 = 604 \text{ kN}$$

**Bemessungswiderstand der Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit**

Bemessungswiderstand des Bruttoquerschnitts des zugbeanspruchten Winkelprofils	$N_{pl,Rd}$	383 kN
Bemessungswiderstand des Nettoquerschnitts des zugbeanspruchten Winkelprofils	$N_{u,Rd}$	391 kN
Bemessungswiderstand des Winkels gegen Blockversagen (für versetzt angeordnete Schrauben)	$V_{eff,2,Rd}$	283 kN
Bemessungswiderstand des Winkels gegen Blockversagen (für nicht versetzt angeordnete Schrauben)	$V_{eff,2,Rd}$	<b>274 kN</b>
Bemessungswiderstand des Bruttoquerschnitts des zugbeanspruchten Knotenblechs	$N_{pl,Rd}$	480 kN
Bemessungswiderstand des Nettoquerschnitts des zugbeanspruchten Knotenblechs	$N_{u,Rd}$	892 kN
Bemessungswiderstand des Nettoquerschnitts des zugbeanspruchten Knotenblechs (am ersten Schraubenloch am Knotenblechende)	$N_{u,Rd}$	421 kN
Bemessungswiderstand des Knotenblechs gegen Blockversagen (für versetzt angeordnete Schrauben)	$V_{eff,1,Rd}$	508 kN
Bemessungswiderstand des Knotenblechs gegen Blockversagen (für nicht versetzt angeordnete Schrauben)	$V_{eff,1,Rd}$	480 kN
Bemessungswiderstand der Schrauben gegen Abscheren	$F_{v,Rd}$	302 kN
Bemessungswiderstand der Schrauben/des Blechs gegen Lochleibung	$F_{b,Rd}$	604 kN

Der kleinste Bemessungswiderstandswert ist der Bemessungswiderstand des Winkels gegen Blockversagen (für nicht versetzt angeordnete Schrauben):

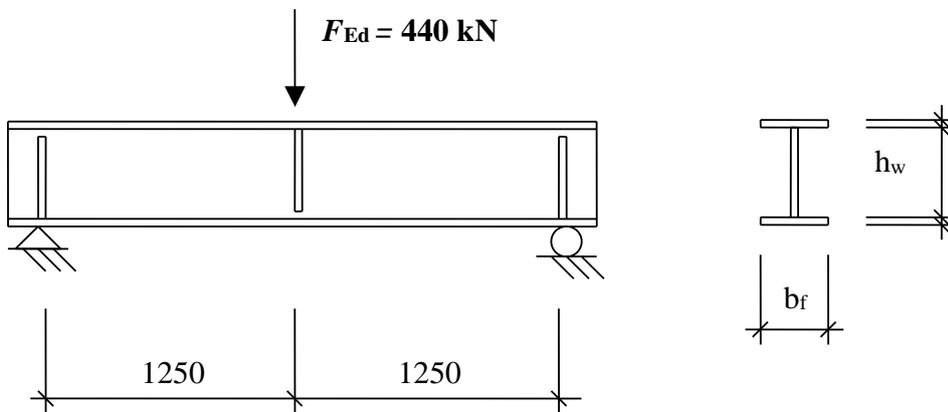
$$V_{eff,2,Rd} = 274 \text{ kN}$$

*Anmerkung: Der maßgebende Bemessungswiderstand für die Schrauben in der Verbindung ist der Bemessungswiderstand der Schrauben gegen Abscheren ( $F_{v,Rd} = 302 \text{ kN}$ ).*

<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 5		
	Titel Bemessungsbeispiel 7 – Stahlträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung mit Schubbeulen als maßgebendes Versagen		
	Auftraggeber Research Fund for Coal and Steel	Erstellt	AO
Bearbeitet		MEB	Datum 04/06
Bearbeitet		ER/IA	Datum 04/17

**BEMESSUNGSBEISPIEL 7 – Stahlträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung mit Schubbeulen als maßgebendes Versagen**

Bemessung eines Stahlträgers hinsichtlich der Schubtragfähigkeit. Der Träger ist ein gelenkig gelagertes I-Profil mit einer Spannweite, die in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Der obere Flansch wird seitlich gehalten.



**Materialkennwerte**

Ein nichtrostender Duplex-Stahl der Sorte 1.4162 mit den folgenden Materialeigenschaften wird verwendet:

$$f_y = 480 \text{ N/mm}^2 \text{ (für warmgewalzte Profile),}$$

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

**Querschnittswerte**

Gewählter Querschnitt mit:

Flansch:  $12 \times 200 \text{ mm}^2$   
 Steg:  $4 \times 500 \text{ mm}^2$   
 Aussteifungen:  $12 \times 98 \text{ mm}^2$   
 Schweißnahtdicke: 4 mm

**Statische Berechnung**

Die maximalen Querkräfte sowie Biegemomente ergeben sich zu:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{440}{2} = 220 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed} L}{4} = \frac{440 \times 2,5}{4} = 275 \text{ kNm}$$

**Teilsicherheitsbeiwerte**

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

Tabelle 2.2  
Kapitel 2.3.1

Tabelle 4.1

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{480} \times \frac{200}{210}} = 0,683$$

Steg unter Biegebeanspruchung:

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,683} = 178,9 > 90, \text{ der Steg ist der Querschnittsklasse 4}$$

zuzuordnen.

Flansch unter Druckbeanspruchung:

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,683} = 11,3 \leq 14,0, \text{ der Flansch ist der Querschnittsklasse 3}$$

zuzuordnen.

Der Gesamtquerschnitt ist der Querschnittsklasse 4 zuzuordnen.

**Schubtragfähigkeit**

Die Schubtragfähigkeit muss für vertikal ausgesteifte Stege berücksichtigt werden, falls

$$\text{gilt: } h_w / t_w \geq \frac{24,3}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$$

$$a/h_w = 1250/500 = 2,5 > 1$$

Da der Steg nicht ausgesteift ist gilt  $k_{\text{rst}}=0$ . Somit ist:

$$k_\tau = 5,34 + 4 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4 \left( \frac{500}{1250} \right)^2 = 5,98$$

EN 1993-1-4 empfiehlt einen Wert für  $\eta=1,2$ .

$$h_w/t_w = \frac{500}{4} = 125 \geq \frac{24,3}{1,2} \times 0,683 \times \sqrt{5,98} = 33,8$$

Demnach muss die Schubtragfähigkeit wie folgt berücksichtigt werden:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \times 480 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} \times 10^{-3} = 604,6 \text{ kN}$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

Für verformbare Auflagersteifen gilt:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) = \left( \frac{500}{37,4 \times 4 \times 0,683 \times \sqrt{5,98}} \right) = 2,00 > 0,65$$

$$\chi_w = \frac{1,19}{(0,54 + \bar{\lambda}_w)} \quad \text{für } \bar{\lambda}_w \geq 0,65$$

Somit ermittelt sich der Beitrag des Steges zu:

$$\chi_w = \frac{1,19}{(0,54 + 2,00)} = 0,468$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,468 \times 480 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} \times 10^{-3} = 235,9 \text{ kN}$$

Kapitel 5.3

Tabelle 5.2

Tabelle 5.2

Tabelle 5.2

Kapitel 6.4.3

Gl. 6.26

Kapitel 6.4.3

Gl. 6.22

Gl. 6.23

Gl. 6.25

Tabelle 6.3

Tabelle 6.3

Gl. 6.23

Bemessungsbeispiel 7	Blatt 3 von 5
<p>Der Beitrag der Flansche kann angesetzt werden, wenn diese nicht vollständig für die Biegebeanspruchung ausgenutzt werden. Die Biegebeanspruchbarkeit eines Querschnitts, der nur aus den Flanschen besteht, ergibt sich wie folgt:</p>	Kapitel 6.4.3
$M_{f,Rd} = 12 \times 200 \times \frac{480}{1,1} \times (500 + 12) \times 10^{-6} = 536,2 \text{ kNm}$	
<p><math>M_{f,Rd} &gt; M_{Ed} = 275 \text{ kNm}</math>, somit können die Flansche bei der Schubtragfähigkeit berücksichtigt werden.</p>	
$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left[ \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right]^2 \right]$	Gl. 6.29
$c = a \left[ 0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right] \text{ aber } \frac{c}{a} \leq 0,65$	Gl. 6.30
$= 1250 \times \left[ 0,17 + \frac{3,5 \times 200 \times 12^2 \times 480}{4 \times 500^2 \times 480} \right] = 338,5 \text{ mm}$ $338,5 \text{ mm} < 0,65 \times 1250 = 812,5 \text{ mm}$	
$V_{bf,Rd} = \frac{200 \times 12^2 \times 480}{338 \times 1,1} \times \left[ 1 - \left[ \frac{275}{536,2} \right]^2 \right] = 27,4 \text{ kN}$	Gl. 6.29
$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 235,8 + 27,4 = 263,2 \text{ kN} \leq 604,6 \text{ kN}$	Gl. 6.22
<p><b>Quersteifen</b></p>	Kapitel 6.4.5
<p>Quersteifen müssen gegen plastisches Versagen und gegen Biegeknicken nachgewiesen werden. Dabei gilt <math>\alpha = 0,49</math> und <math>\bar{\lambda}_0 = 0,2</math> und ein wirksamer Querschnitt, bestehend aus den Steifen und den wirksamen Teilen des Steges, wird berücksichtigt. Der wirksame Teil des Stegs ist dabei <math>11 \varepsilon t_w</math> breit, wodurch die Quersteife der Querschnittsklasse 3 zugeordnet werden kann.</p>	Tabelle 6.1
<p><math>a/h_w = 1250/500 = 2,5 \geq \sqrt{2}</math>, daher muss das Flächenträgheitsmoment der Zwischensteifen folgende Bedingung erfüllen:</p>	Gl. 6.51
$I_{st} \geq 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \times 500 \times 4^3 = 24000 \text{ mm}^4$	Gl. 6.51
$I_{st} = 2 \times \frac{(11 \times 0,683 \times 4) \times 4^3}{12} + \frac{12 \times 200^3}{12} = 8,00 \times 10^6 \text{ mm}^4$ , somit ist die Bedingung erfüllt.	
<p>Der Widerstand gegen plastisches Versagen des Steges ermittelt sich wie folgt:</p>	
$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$	Gl. 5.27
$A_g = (12 \times 200 + 11 \times 0,683 \times 4 \times 2) = 2460,1 \text{ mm}^2$	
$N_{c,Rd} = 2460,1 \times 480 \times 10^{-3} / 1,1 = 1073,5 \text{ kN}$	
<p>Der Widerstand gegen Biegeknicken ermittelt sich wie folgt:</p>	
$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$	Gl. 6.2
$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$	Gl. 6.4
$\varphi = 0,5 \left( 1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right)$	Gl. 6.5

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}}$$

$$L_{cr} = 0,75h_w = 0,75 \times 500 = 375 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{375}{\sqrt{\frac{8 \times 10^6}{2460,1}}} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{480}{200000}} = 0,103$$

$$\varphi = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,103 - 0,2) + 0,103^2) = 0,48$$

$$\chi = \frac{1}{0,48 + [0,48^2 - 0,103^2]^{0,5}} = 1,05 > 1 \Rightarrow \chi = 1,0$$

Da  $N_{b,Rd} = N_{c,Rd} = 1073,5 \text{ kN} > N_{Ed}$  sind die Quersteifen ausreichend bemessen.

### Interaktion aus Querkraft und Biegung

Wenn der Nachweis der Querkraft mit  $\bar{\eta}_3$  den Wert 0,5 übersteigt, muss eine Interaktion aus Biegung und Querkraft berücksichtigt werden.

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{220}{235,9} = 0,933 > 0,5, \text{ demzufolge muss eine Interaktion berücksichtigt werden.}$$

Die folgende Interaktionsbedingung muss erfüllt werden:

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

mit:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}$$

$$M_{f,Rd} = 536,2 \text{ kNm (Blatt 3)}$$

$M_{pl,Rd}$  plastische Momententragfähigkeit des Querschnitts:

$$M_{pl,Rd} = M_{f,Rd} + \frac{t_w h_w^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = 536,2 + \frac{4 \times 500^2 \times 480}{4 \times 1,1 \times 10^6} = 645,3 \text{ kNm}$$

### Nachweis der Interaktionsbedingungen

$M_{Ed} = 275 \text{ kNm}$ , daher gilt:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{275}{645,3} = 0,426 \leq 1,0 \text{ (erfüllt)}$$

$\bar{\eta}_1$  erfüllt die Bedingungen. Nun muss noch die Interaktion überprüft werden.

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,426 + \left(1 - \frac{536,2}{645,3}\right) \times (2 \times 0,933 - 1)^2 = 0,553 < 1,0$$

Daraus folgt, dass unter den gegebenen Bedingungen der Widerstand des Vollwandträgers gegen Querkraft, Biegung sowie gegenüber der Interaktion aus Querkraft und Biegung ausreichend ist.

Gl. 6.6

Kapitel 6.4.5

Gl. 6.6

Gl. 6.5

Gl. 6.4

Kapitel 6.4.3

Gl. 6.36

Gl. 6.34

Gl. 6.35

Gl. 6.35

**Berechnung der wirksamen Querschnittswerte**

Die Flansche sind der Querschnittsklasse 3 zugeordnet und daher vollständig wirksam.

Beim Steg wird der Abminderungsfaktor  $\rho$  für geschweißte Stege berücksichtigt:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$$

Gl. 5.1

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{mit } \bar{b} = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ mm}$$

Gl. 5.3

Mit der Annahme einer linear veränderlichen, symmetrischen Spannungsverteilung im Steg ergibt sich folgendes Spannungsverhältnis:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1 \Rightarrow k_\sigma = 23,9$$

Tabelle 5.3

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488,68/4}{28,4 \times 0,683 \times \sqrt{23,9}} = 1,29$$

Gl. 5.3

$$\rho = \frac{0,772}{1,29} - \frac{0,079}{1,29^2} = 0,55 \leq 1$$

Gl. 5.1

$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi) = 0,55 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 134,76 \text{ mm}$$

Tabelle 5.3

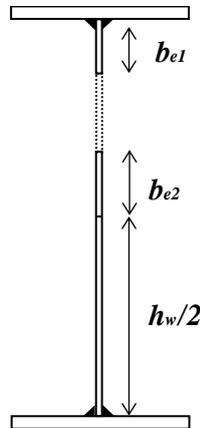
$$b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}} = 0,4 \times 134,76 = 53,9 \text{ mm}$$

Tabelle 5.3

$$b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}} = 0,6 \times 134,76 = 80,9 \text{ mm}$$

**Berechnung der wirksamen Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung**

$e_1$  wird positiv definiert, ausgehend vom Schwerpunkt des oberen Flansches nach unten.



$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w + b_{e2} t_w + (h_w / 2) t_w = 6361,7 \text{ mm}^2$$

$$e_{\text{eff}} = \frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f) ] + \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w (0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)) + b_{e2} t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2} / 2) + (h_w / 2) t_w (0,75 h_w + 0,5 t_f) ] = 266,4 \text{ mm}$$

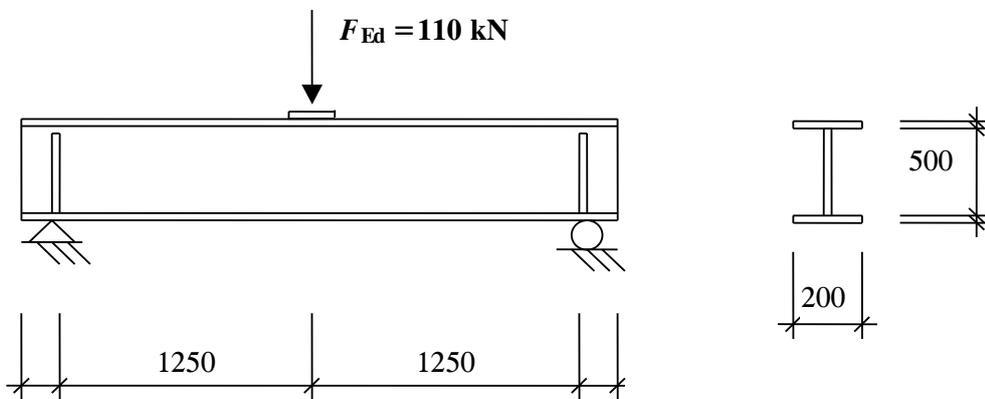
$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w (b_{e1} + 4\sqrt{2})^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w (h_w / 2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [ e_{\text{eff}} - (h_w + t_f) ]^2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2}) t_w [ e_{\text{eff}} - 0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f) ]^2 + b_{e2} t_w [ e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f - b_{e2}) ]^2 + (h_w / 2) t_w [ e_{\text{eff}} - (0,75 h_w + 0,5 t_f) ]^2 = 3,472 \times 10^8 \text{ mm}^4$$



<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 5					
	Titel Bemessungsbeispiel 8 – Stahlträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung mit Querkraft als maßgebende Bemessungsgröße					
	Auftraggeber	Research Fund for Coal and Steel	Erstellt	AO	Datum	06/02
			Bearbeitet	MEB	Datum	04/06
Bearbeitet			ER/IA	Datum	04/17	

**BEMESSUNGSBEISPIEL 8 – Stahlträger der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung mit Querkraft als maßgebende Bemessungsgröße**

Ein Vollwandträger, der zuvor durch eine gleichmäßige Streckenlast beansprucht wurde, wird saniert und durch eine Einzellast beansprucht. Es soll überprüft werden, ob der Vollwandträger die neue Belastung, welche über eine 12 mm dickes Blech eingeleitet wird, aufnehmen kann. Der Vollwandträger besteht aus einem gelenkig gelagerten I-Profil und die Stützweite ist der folgenden Abbildung zu entnehmen. Der obere Flansch ist seitlich gehalten.



**Materialkennwerte**

Es wird ein Duplex-Stahl der Sorte 1.4462 mit folgenden Materialwerten verwendet:

$$f_y = 460 \text{ N/mm}^2 \text{ (für warmgewalzte Bleche),}$$

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

**Querschnittswerte**

- Flansch:  $12 \times 200 \text{ mm}^2$
- Steg:  $4 \times 500 \text{ mm}^2$
- Aussteifungen:  $12 \times 98 \text{ mm}^2$
- Schweißnahtdicke: 4 mm

**Statische Berechnung**

Die maximalen Werte für die Querkraft und das Biegemoment ergeben sich zu:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{110}{2} = 55 \text{ kN,}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{110 \times 2,5}{4} = 68,75 \text{ kNm.}$$

**Teilsicherheitsbeiwerte**

$$\gamma_{M0} = 1,1$$

$$\gamma_{M1} = 1,1$$

Tabelle 2.2  
Kapitel 2.3.1

Tabelle 4.1

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{460} \times \frac{200}{210}} = 0,698$$

Steg unter Biegebeanspruchung:

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,698} = 175,1 > 90, \text{ der Steg wird der Querschnittsklasse 4 zugeordnet.}$$

Flansch unter Druckbeanspruchung:

$$\frac{c}{t\varepsilon} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,698} = 11,0 \leq 14,0, \text{ der Flansch wird der Querschnittsklasse 3 zugeordnet.}$$

Der Gesamtquerschnitt wird daher der Querschnittsklasse 4 zugeordnet.

**Widerstand gegenüber lokaler Krafteinleitung**

Die Bemessungslast sollte nicht größer sein als der Bemessungswiderstand:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad \text{Gl. 6.37}$$

Die wirksame Länge  $L_{eff}$  ist definiert als:

$$L_{eff} = \chi_F l_y \quad \text{Gl. 6.45}$$

mit dem Abminderungsbeiwert:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F} \leq 1,0 \quad \text{Gl. 6.46}$$

mit der bezogenen Schlankheit:

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad \text{Gl. 6.47}$$

Die wirksame Lastausbreitungslänge ergibt sich wie folgt:

$$l_y = s_s + 2t_f \left(1 + \sqrt{m_1 + m_2}\right) \quad \text{Gl. 6.41}$$

mit:

$s_s$  Länge der Lasteinleitung  
 $m_1$  bzw.  $m_2$  dimensionslose Parameter mit:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad \text{Gl. 6.38}$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad \text{Gl. 6.39}$$

$$m_2 = 0 \quad \text{für } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad \text{Gl. 6.40}$$

$s_s$  ist auf der sicheren Seite liegend mit der doppelten Dicke des Bleches zur Lasteinleitung anzusetzen, d.h. 24 mm. Abb. 6.5

$$m_1 = \frac{460 \times 200}{460 \times 4} = 50 \quad \text{Gl. 6.38}$$

$$m_2 = 0,02 \times \left[\frac{500}{12}\right]^2 = 34,7, \text{ mit der Annahme } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad \text{Gl. 6.39}$$

$$l_y = 24 + 2 \times 12 \times \left(1 + \sqrt{50 + 34,7}\right) = 268,9 \text{ mm} \quad \text{Gl. 6.41}$$

Bemessungsbeispiel 8	Blatt 3 von 5
<p>Die kritische Last ergibt sich wie folgt:</p> $F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w}$ <p>Der Beulwert ergibt sich mit der Lastsituation vom Typ a) wie folgt:</p> $k_F = 6 + 2 \left[ \frac{h_w}{a} \right]^2 = 6 + 2 \times \left[ \frac{500}{2500} \right]^2 = 6,08$ $F_{cr} = 0,9 \times 6,08 \times 200000 \times \frac{4^3}{500} \times 10^{-3} = 140,1 \text{ kN}$ $\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{268,9 \times 4 \times 460}{140,1 \times 10^3}} = 1,88 > 0,5, \text{ die Annahme war demnach korrekt.}$ $\chi_F = \frac{0,5}{1,88} = 0,27 \leq 1,0, \text{ (erfüllt)}$ $L_{eff} = 0,27 \times 268,9 = 72,6 \text{ mm}$ $F_{Ed} = 110 \leq 460 \times 72,6 \times 4 / (1,1 \times 10^3) = 121,4 \text{ kN}$ <p>Der Widerstand ist größer als die einwirkende Last.</p>	<p>Gl. 6.48</p> <p>Abb. 6.4</p> <p>Gl. 6.48</p> <p>Gl. 6.47</p> <p>Gl. 6.46</p> <p>Gl. 6.37</p>
<p><b>Interaktion von Querlasten, Biegung und Normalkraft</b></p> <p>Die Interaktion zwischen einer konzentrierten Last und einem Biegemoment wird nach EN 1993-1-5:2006 durchgeführt:</p> $0,8 \times \eta_1 + \eta_2 \leq 1,4$ <p>mit</p> $\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{f_y W_{eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0,$ $\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1}} \leq 1,0.$	<p>EN 1993-1-5, Gl. 7.2</p> <p>EN 1993-1-5, Gl. 4.14</p> <p>EN 1993-1-5, Gl. 6.14</p>
<p><b>Berechnung der wirksamen Querschnittswerte</b></p> <p>Die Flansche sind der Querschnittsklasse 3 zugeordnet und somit vollständig wirksam. Für den Steg muss der Abminderungsfaktor <math>\rho</math> für geschweißte Stege wie folgt berücksichtigt werden:</p> $\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1$ $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \text{ mit } b = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ mm}$ <p>Mit der Annahme einer linear veränderlichen, symmetrischen Spannungsverteilung im Steg ergibt sich folgendes Spannungsverhältnis:</p> $\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1 \quad \Rightarrow k_\sigma = 23,9$	<p>Gl. 5.1</p> <p>Gl. 5.3</p> <p>Tabelle 5.3</p>

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488,68/4}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{23,9}} = 1,26$$

$$\rho = \frac{0,772}{1,26} - \frac{0,079}{1,26^2} = 0,562 \leq 1$$

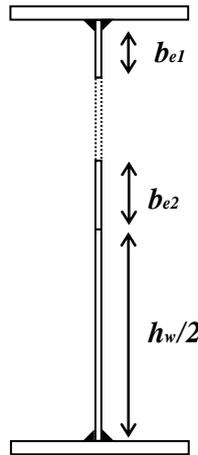
$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho b / (1 - \psi) = 0,562 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 137,3 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4b_{\text{eff}} = 0,4 \times 137,3 = 54,9 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6b_{\text{eff}} = 0,6 \times 137,3 = 82,4 \text{ mm}$$

### Berechnung der wirksamen Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung

$e_i$  wird positiv definiert, ausgehend vom Scherpunkt des oberen Flansches nach unten.



$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w + b_{e2}t_w + (h_w/2)t_w = 6372,2 \text{ mm}^2$$

$e_{\text{eff}} =$

$$\frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f) ] + \frac{1}{A_{\text{eff}}} [ (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w (0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)) + b_{e2}t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2}/2) + (h_w/2)t_w (0,75h_w + 0,5t_f) ] = 266,4 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w (b_{e1} + 4\sqrt{2})^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \frac{t_w (h_w/2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [e_{\text{eff}} - (h_w + t_f)]^2 + (b_{e1} + 4\sqrt{2})t_w [e_{\text{eff}} - 0,5((b_{e1} + 4\sqrt{2}) + t_f)]^2 + b_{e2}t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f - b_{e2})]^2 + (h_w/2)t_w [e_{\text{eff}} - (0,75h_w + 0,5t_f)]^2 = 3,475 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{eff}}}{e_{\text{eff}} + 0,5t_f} = 1,293 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\eta_1 = \frac{68,75 \times 10^6}{460 \times 1,293 \times 10^6 / 1,1} = 0,127$$

$$\eta_2 = \frac{110}{119,63} = 0,919$$

$$0,8\eta_1 + \eta_2 = 0,8 \times 0,127 + 0,919 = 1,021 < 1,4$$

Der Widerstand des Vollwandträgers gegenüber Interaktion zwischen einer konzentrierten Last und einem Biegemoment ist ausreichend.

Tabelle 5.3

EN 1993-1-5  
Gl. 4.14EN 1993-1-5  
Gl. 6.14

Bemessungsbeispiel 8	Blatt 5 von 5
<p><b>Schubtragfähigkeit</b></p> <p>Die Schubtragfähigkeit muss für unausgesteifte Stege berücksichtigt werden, falls gilt:</p> $h_w / t_w \geq \frac{56,2}{\eta} \varepsilon .$ $h_w / t_w = \frac{500}{4} = 125 \geq \frac{56,2}{1,2} \times 0,698 = 32,7$ <p>Demnach muss die Schubtragfähigkeit wie folgt berücksichtigt werden:</p> $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$ $V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}$ <p>Für verformbare Endauflagersteifen ergibt sich nach Tabelle 6.3:</p> $\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) = \left( \frac{500}{86,4 \times 4 \times 0,698} \right) = 2,07 > 0,65$ $\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + \bar{\lambda}_w} \quad \text{für } \bar{\lambda}_w \geq 0,65$ $\chi_w = \frac{1,19}{0,54 + 2,07} = 0,455$ <p>Der Beitrag der Flansche kann angesetzt werden, wenn diese nicht vollständig für die Biegebeanspruchung ausgenutzt werden. Der Beitrag ist jedoch gering und wird auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt, d.h. <math>V_{bf,Rd} = 0</math>.</p> <p>Die Schubtragfähigkeit wird wie folgt berechnet:</p> $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} = \frac{0,455 \times 460 \times 500 \times 4}{1,1 \times \sqrt{3}} \times 10^{-3} = 219,8 \text{ kN} < \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = 579,45 \text{ kN}$ $V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} > V_{Ed} = 55 \text{ kN}$ <p>Die Schubtragfähigkeit des Trägers ist ausreichend.</p> <p><b>Interaktion von Querkraft und Biegung</b></p> <p>Wenn <math>\bar{\eta}_3</math> nicht größer als 0,5 ist, muss die Tragfähigkeit für Biegung und Normalkraft nicht infolge der Querkraft abgemindert werden.</p> $\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \leq 1,0$ $= \frac{55}{219,8} = 0,25 \leq 0,5, \text{ somit muss eine Interaktion von Querkraft und Biegung}$ <p>nicht berücksichtigt werden.</p> <p><b>Abschließende Bemerkung</b></p> <p>Die Querschnittstragfähigkeit des Trägers ist größer als die einwirkenden Lasten. Es ist zu beachten, dass die vertikalen Steifen an den Auflagern nicht überprüft wurden. Dies sollte nach der Vorgehensweise im Bemessungsbeispiel 7 ebenfalls erfolgen.</p>	<p>Kapitel 6.4.3</p> <p>Gl. 6.20</p> <p>Gl. 6.22</p> <p>Gl. 6.23</p> <p>Gl. 6.24</p> <p>Tabelle 6.3</p> <p>Tabelle 6.3</p> <p>Gl. 6.23</p> <p>Gl. 6.36</p>



**„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)**

**BERECHNUNGSVORLAGE**

Titel

Bemessungsbeispiel 9 – Kaltgeformtes U-Profil unter Biegebeanspruchung mit in Abständen angeordneten seitlichen Halterungen des Druckflanschs; Biegedrillknicken zwischen den seitlichen Halterungen wird maßgebend

Auftraggeber

Research Fund for Coal and Steel

Erstellt

SMH

Datum

09/01

Bearbeitet

NRB

Datum

04/06

Bearbeitet

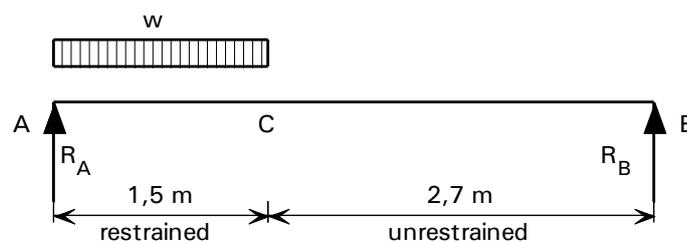
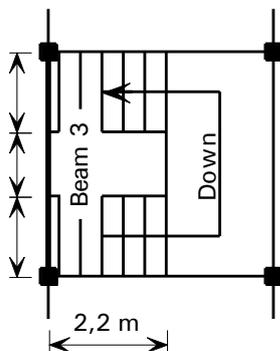
SJR

Datum

04/17

**BEMESSUNGSBEISPIEL 9 – Kaltgeformtes U-Profil unter Biegebeanspruchung mit in Abständen angeordneten seitlichen Halterungen des Druckflanschs; Biegedrillknicken zwischen den seitlichen Halterungen wird maßgebend**

In diesem Beispiel wird ein Unterstützungsträger einer Treppe bemessen. Der Träger besteht aus einem U-Profil und ist als gelenkig gelagerter Einfeldträger ausgeführt. Der Treppenlauf befindet sich zwischen A und C und hält den Träger am oberen Flansch. Zwischen B und C ist der obere Flansch nicht gehalten. Die gesamte Spannweite des Trägers beträgt 4,2 m.



**Einwirkungen**

Es wird angenommen, dass der Träger nur die Lasten aus der ersten Treppenstufe bis zum Treppenpodest trägt:

Ständige Lasten ( $G$ ): Last der Treppe:  $1,0 \text{ kN/m}^2 = 1,0 \times 2,2 = 2,2 \text{ kN/m}$   
Eigengewicht Träger:  $0,13 \text{ kN/m}$

Veränderliche Lasten ( $Q$ ): Last auf der Treppe:  $4 \text{ kN/m}^2 = 4,0 \times 2,2 = 8,8 \text{ kN/m}$

Lastfallkombinationen (Grenzzustand der Tragfähigkeit):

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

Da nur eine veränderliche Last zu berücksichtigen ist ( $Q_{k,1}$ ), entfällt in diesem Beispiel der letzte Term der oben genannten Gleichung.

$$\gamma_{G,j} = 1,35 \text{ (ungünstig)}$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5$$

**Bemessungslasten**

Ständige Einwirkungen: Last der Treppe =  $1,35 \times 2,2 = 2,97 \text{ kN/m}$   
Eigengewicht Träger =  $1,35 \times 0,13 = 0,18 \text{ kN/m}$

Veränderliche Einwirkungen: Last auf der Treppe =  $1,5 \times 8,8 = 13,2 \text{ kN/m}$

**Statische Berechnung**

Auflagerreaktionen:

$$R_A + R_B = (2,97 + 13,2) \times 1,5 + 0,18 \times 4,2 = 25,01 \text{ kN}$$

Momentengleichgewicht um Punkt A:

$$R_B = \frac{1,5 \times (2,97 + 13,2) \times 0,75 + 0,18 \times 4,2 \times (4,2/2)}{4,2} = 4,71 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow R_A = 25,01 - 4,71 = 20,30 \text{ kN}$$

Maximales Biegemoment im Abstand von  $1,5 \times \left(1 - \frac{1,5}{2 \times 4,2}\right) = 1,23 \text{ m}$  von Punkt A:

$$M_{Ed,max} = 20,30 \times 1,23 - (2,97 + 13,2) \times \frac{1,23^2}{2} - 0,18 \times \frac{1,23^2}{2} = 12,60 \text{ kNm}$$

Maximale Querkraft am Punkt A:

$$F_{Ed,max} = 20,30 \text{ kN}$$

**Materialeigenschaften**

Stahlsorte 1.4401 (Austenit)

0,2%-Dehngrenze = 240 N/mm<sup>2</sup> (kaltgeformtes Blech)

$$f_y = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ und } G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

⇒ Gewählt wird ein U-Profil 200 × 75 mit der Dicke  $t = 5 \text{ mm}$ .

**Querschnittswerte**

$$I_y = 9,456 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{el,y} = 94,56 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_z = 0,850 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{pl,y} = 112,9 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$I_w = 5085 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$A_g = 1650 \text{ mm}^2$$

$$I_t = 1,372 \times 10^4 \text{ mm}^4$$

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{240} \times \frac{200000}{210000}} = 0,97$$

Auf der sicheren Seite liegend gilt für den Steg:  $c = h - 2t = 200 - 2 \times 5 = 190 \text{ mm}$

$$\text{Steg unter Biegebeanspruchung: } \frac{c}{t} = \frac{190}{5} = 38$$

Für Klasse 1:  $\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon = 69,8$ , der Steg wird Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

$$\text{einseitig gestützter Flansch unter Druckbeanspruchung: } \frac{c}{t} = \frac{75}{5} = 15$$

Für Klasse 3,  $\frac{c}{t} \leq 14\varepsilon = 13,6$ , der Flansch wird Querschnittsklasse 4 zugeordnet.

⇒ Der gesamte Querschnitt wird demnach Querschnittsklasse 4 zugeordnet.

Tabelle 2.2

Kapitel 2.3.1

Kapitel 5.3.2

Tabelle 5.2

Tabelle 5.2

Tabelle 5.2

**Berechnung der wirksamen Querschnittswerte**

Der Abminderungsfaktor  $\rho$  für kaltgeformte einseitig gestützte Bauteile wird wie folgt ermittelt:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \quad \text{jedoch } \leq 1$$

Gl. 5.2

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad \text{mit } \bar{b} = c = 75 \text{ mm}$$

Gl. 5.3

Es wird eine konstante Spannungsverteilung im Druckflansch angenommen:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1 \Rightarrow k_\sigma = 0,43$$

Tabelle 5.4

$$\bar{\lambda}_p = \frac{75/5}{28,4 \times 0,97 \times \sqrt{0,43}} = 0,830$$

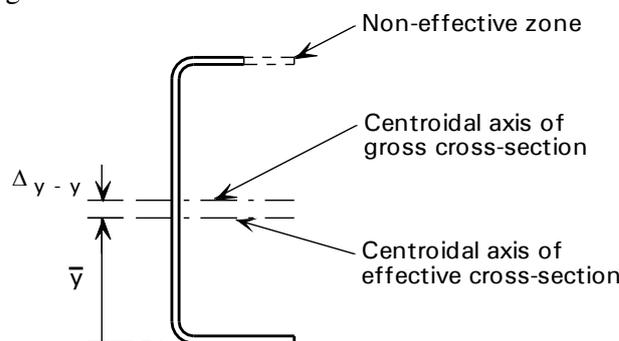
$$\rho = \frac{1}{0,830} - \frac{0,188}{0,830^2} = 0,932$$

$$c_{\text{eff}} = \rho \times c = 0,932 \times 75 = 69,9$$

Tabelle 5.4

$$A_{\text{eff}} = A_g - (1 - \rho)ct = 1650 - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 = 1625 \text{ mm}^2$$

Berechnung der Exzentrizität der neutralen Achse des Querschnitts unter Biegebeanspruchung:



$$\bar{y} = \frac{A_g \times \frac{h}{2} - (1 - \rho) \times c \times t \times \left( h - \frac{t}{2} \right)}{A_{\text{eff}}} = \frac{1650 \times \frac{200}{2} - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 \times \left( 200 - \frac{5}{2} \right)}{1625}$$

$$\bar{y} = 98,44$$

$$\text{Exzentrizität der neutralen Achse, } \Delta_{y-y} = \frac{h}{2} - \bar{y} = \frac{200}{2} - 98,44 = 1,56 \text{ mm}$$

$$I_{\text{eff},y} = \left( I_y - \frac{(1 - \rho)ct^3}{12} - (1 - \rho)ct \left( \frac{h}{2} - \frac{t}{2} \right)^2 - A_{\text{eff}} \Delta_{y-y}^2 \right)$$

$$I_{\text{eff},y} = 9,456 \times 10^6 - \frac{(1 - 0,932) \times 75 \times 5^3}{12} - (1 - 0,932) \times 75 \times 5 \times (100 - 2,5)^2 - 1625 \times 1,56^2$$

$$I_{\text{eff},y} = 9,21 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$W_{\text{eff},y} = \frac{I_{\text{eff},y}}{\frac{h}{2} + \Delta_{y-y}} = \frac{9,21 \times 10^6}{\frac{200}{2} + 1,56} = 90,69 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

Bemessungsbeispiel 9	Blatt 4 von 7
<p><b>Schubverzerrung</b></p> <p>Die Wirkung der Schubverzerrung kann vernachlässigt werden, wenn bei einseitig gestützten Bauteilen gilt: <math>b_0 \leq L_e/50</math></p> <p><math>L_e = 4200</math> mm (Abstand zwischen Momentennullpunkten)</p> <p><math>L_e/50 = 84</math> mm, <math>b_0 = 75</math> mm, somit kann die Wirkung der Schubverzerrung vernachlässigt werden.</p> <p><b>Eindreihen der Flansche</b></p> $u = \frac{2 \sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z}$ <p><math>\sigma_a = 240</math> N/mm<sup>2</sup> (Maximalwert)</p> <p><math>b_s = 75 - 5 = 70</math> mm</p> <p><math>z = 100 - 2,5 = 97,5</math> mm</p> $u = \frac{2 \times 240^2 \times 70^4}{200000^2 \times 5^2 \times 97,5} = 0,028$ mm <p>Ein Eindreihen der Flansche kann vernachlässigt werden, wenn gilt:  <math>u &lt; 0,05 \times 200 = 10</math> mm</p> <p>Somit ist ein Eindreihen der Flansche zu vernachlässigen.</p> <p><b>Teilsicherheitsbeiwerte</b></p> <p>Die folgenden Teilsicherheitsbeiwerte werden in diesem Beispiel verwendet:  <math>\gamma_{M0} = 1,1</math> und <math>\gamma_{M1} = 1,1</math></p> <p><b>Momententragfähigkeit des Querschnitts</b></p> <p>Für einen Querschnitt der Klasse 4 gilt:</p> $M_{c,Rd} = W_{\text{eff,min}} f_y / \gamma_{M0} = \frac{90,69 \times 10^3 \times 240}{1,1 \times 10^6} = 19,79$ kNm <p><math>M_{Ed,max} = 12,60</math> kNm <math>&lt; M_{c,Rd} = 19,79</math> kNm</p> <p>⇒ Der Momententragfähigkeit ist ausreichend.</p> <p><b>Querkrafttragfähigkeit des Querschnitts</b></p> $V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}$ <p><math>A_v = h \times t = 200 \times 5 = 1000</math> mm<sup>2</sup></p> $V_{pl,Rd} = \frac{1000 \times 240}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 1000} = 125,97$ kN <p><math>F_{Ed,max} = 20,30</math> kNm <math>&lt; V_{pl,Rd} = 125,97</math> kNm</p> <p>⇒ Die Querkrafttragfähigkeit ist ausreichend.</p>	<p>Kapitel 5.4.2</p> <p>Kapitel 5.4.2</p> <p>EN 1993-1-3</p> <p>Satz 5.4</p> <p>Gl. 5.3a</p> <p>EN 1993-1-3</p> <p>Satz 5.4</p> <p>Gl. 5.3a</p> <p>Tabelle 4.1</p> <p>Gl. 5.31</p> <p>Gl. 5.32</p>

Es wird überprüft, ob die Querkrafttragfähigkeit durch Schubbeulen begrenzt wird.

Mit der Annahme, dass  $h_w = h - 2t = 200 - 2 \times 5 = 190$  mm ist.

$$\frac{h_w}{t} = \frac{190}{5} = 38, \text{ Schubbeulen muss untersucht werden, falls gilt } \frac{h_w}{t} \geq \frac{56,2\varepsilon}{\eta}.$$

$$\eta = 1,20$$

$$\frac{h_w}{t} = 38 < \frac{56,2\varepsilon}{\eta} = \frac{56,2 \times 0,97}{1,20} = 45,4$$

⇒ Die Querkrafttragfähigkeit wird nicht durch Schubbeulen begrenzt.

### Widerstand gegen Biegedrillknicken

Der Druckflansch des Trägers ist zwischen den Punkten B und C seitlich nicht gehalten. Dieser Bereich des Trägers wird für Biegedrillknicken überprüft.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{eff,y} f_y / \gamma_{MI} \text{ für Querschnitte der Klasse 4}$$

$$W_{eff,y} = 90,69 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$$

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

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

Bestimmung des idealen Biegemoments ( $M_{cr}$ ):

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left( \left[ \left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - C_2 z_g \right)$$

C ist gelenkig gelagert, während B annähernd eingespannt ist. Auf der sicheren Seite liegend gilt:

$$k = k_w = 1,00$$

$C_1$  und  $C_2$  werden mit dem Momentendiagramm und den Randbedingungen ermittelt.

Aus dem Momentendiagramm folgt mit  $\psi = 0$ , ⇒  $C_1 = 1,77$

$$C_2 = 0 \text{ (keine Querlasten)}$$

$$M_{cr} = 1,77 \times \frac{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6}{(1,00 \times 2700)^2} \times$$

$$\left( \left[ \left( \frac{1,00}{1,00} \right)^2 \times \frac{5085 \times 10^6}{0,850 \times 10^6} + \frac{(1,00 \times 2700)^2 \times 76900 \times 1,372 \times 10^4}{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6} \right]^{0,5} \right)$$

$$M_{cr} = 41,9 \text{ kNm}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{90,69 \times 10^3 \times 240}{41,9 \times 10^6}} = 0,721$$

Kapitel 6.4.3

Gl. 6.20

Kapitel 6.4.2

Gl.6.13

Gl.6.14

Gl.6.15

Gl.6.16

Anhang E

Gl. E.1

E.3

Tabelle E.1

Mit einem Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$  für kaltgeformte Querschnitte gilt:

$$\varphi_{LT} = 0,5 \times (1 + 0,34 \times (0,721 - 0,4) + 0,721^2) = 0,814$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,814 + [0,814^2 - 0,721^2]^{0,5}} = 0,839$$

$$M_{b,Rd} = 0,839 \times 90,69 \times 10^3 \times 240 \times 10^{-6} / 1,1$$

$M_{b,Rd} = 16,60 \text{ kNm} < M_{Ed} = 12,0 \text{ kNm}$  (maximales Biegemoment im seitlich nicht gehaltenen Bereich des Trägers)

⇒ Das Bauteil hat einen ausreichenden Widerstand gegen Biegedrillknicken.

### Verformungen

Lastfallkombination (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit):  $\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Da nur eine veränderliche Last berücksichtigt werden muss ( $Q_{k,1}$ ), entfällt der letzte Term der oben genannten Gleichung in diesem Beispiel.

Zur Berechnung der Verformungen wird der Sekantenmodul verwendet – somit ist es notwendig die maximale Spannung mit den charakteristischen ständigen und veränderlichen Einwirkungen zu ermitteln.

$$\text{Sekantenmodul: } E_S = \left( \frac{E_{S1} + E_{S2}}{2} \right)$$

Gl. 6.52

$$\text{Worin } E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \text{ und } i = 1, 2.$$

Gl. 6.53

Aus einer statischen Berechnung ergeben sich folgende Werte:

$$\text{Maximales Biegemoment infolge ständiger Lasten} = 1,90 \text{ kNm}$$

$$\text{Maximales Biegemoment infolge veränderlicher Lasten} = 6,68 \text{ kNm}$$

$$\text{Summe der Momente infolge charakteristischer Lasten} = 8,58 \text{ kNm}$$

Es handelt sich um einen Querschnitt der Klasse 4, daher wird  $W_{eff}$  für die Berechnung der maximalen Spannung im Bauteil verwendet.

Es wird auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass die Spannungen im Zug- und im Druckflansch nahezu gleich sind, d.h.  $E_{S1} = E_{S2}$ .

Für die Stahlsorte 1.4401 gilt  $n = 7$ .

Bemessungsspannung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

$$\sigma_{i,Ed,ser} = \frac{M_{max}}{W_{eff,y}} = \frac{8,58 \times 10^6}{90,69 \times 10^3} = 94,6 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{S,i} = \frac{200000}{1 + 0,002 \times \frac{200000}{94,6} \times \left( \frac{94,6}{240} \right)^7} = 198757,6 \text{ N/mm}^2$$

Die maximale Verformung infolge der kombinierten Lasten tritt in einem Abstand von ca. 1,9 m vom Auflager A entfernt auf.

Kapitel 6.4.2

Kapitel 6.4.6

Tabelle 6.4

Die Verformungen im Abstand  $x$  vom Auflager A infolge der kombinierten Lasten, die im Abstand  $a$  vom Auflager A angreifen, werden durch folgende Gleichung ermittelt:

$$\text{Wenn } x \geq a: \quad \delta = \frac{waL^4}{24aE_sI} n^2 \left[ 2m^3 - 6m^2 + m(4+n^2) - n^2 \right]$$

mit:  $m = x/L$  und  $n = a/L$

Wenn  $x = 1,9$  m und  $a = 1,5$  m:  $m = 1,9/4,2 = 0,452$ ;  $n = 1,5/4,2 = 0,357$

Lastfallkombination (ständige und veränderliche charakteristische Lasten):

$w = 11,0$  kN/m

konstante Last (ständige Lasten):  $w = 0,128$  kN/m

Die Verformung infolge der kombinierten Lasten  $\delta_1$  im Abstand von 1,9 m vom Auflager A entfernt wird wie folgt bestimmt:

$$\delta_1 = \frac{11000 \times 1,5 \times 4200^4}{24 \times 1500 \times 198757,6 \times 9,06 \times 10^6} \times 0,357^2 \times \left[ 2 \times 0,452^3 - 6 \times 0,452^2 + 0,452(4 + 0,357^2) - 0,357^2 \right]$$

$$\delta_1 = 7,04 \text{ mm}$$

Die Verformung in Trägermitte  $\delta_2$  infolge Eigengewicht des Trägers wird wie folgt bestimmt:

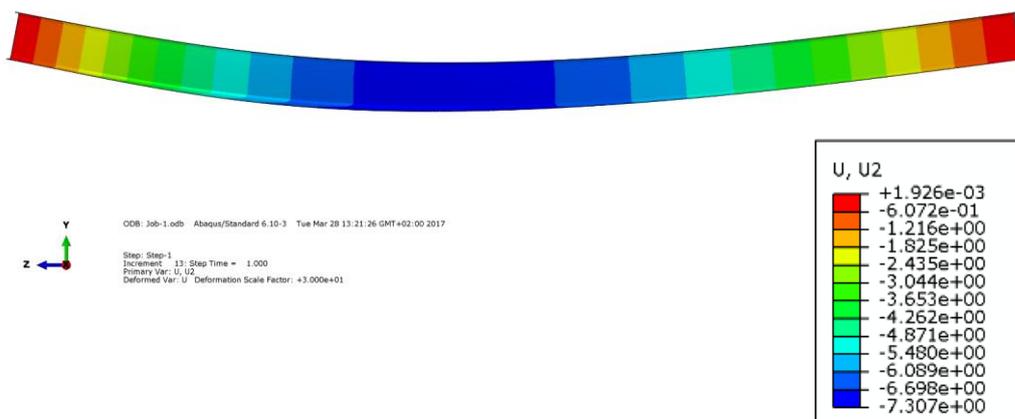
$$\delta_2 = \frac{5}{384} \times \frac{(w \times L)L^3}{E_s I} = \frac{5}{384} \times \frac{(0,128 \times 10^3 \times 4,2) \times 4200^3}{198757,6 \times 9,06 \times 10^6} = 0,29 \text{ mm}$$

Gesamtverformung  $\approx \delta_1 + \delta_2 = 7,04 + 0,29 = 7,33$  mm

$$\delta_{\text{limiting}} = \frac{L}{250} = \frac{4200}{250} = 16,8 \text{ mm} > 7,33 \text{ mm}$$

⇒ Die Verformungen sind geringer als der zulässige Wert.

(Eine Finite-Element-Berechnung wurde an einem identischen System durchgeführt. Die Gesamtverformung des Trägers in der Mitte beträgt 7,307 mm – der verformte Träger ist unten dargestellt.)



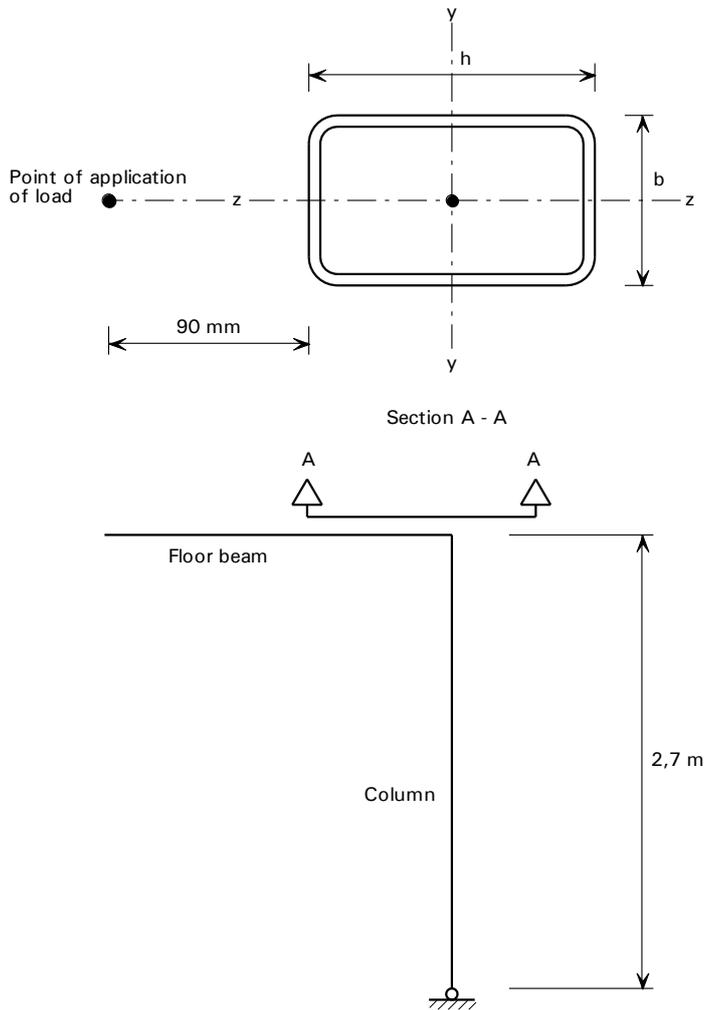


<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 8													
	Titel	Bemessungsbeispiel 10 – Rechteckiges Hohlprofil unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung mit 30 Minuten Feuerwiderstand												
	Auftraggeber	Research Fund for Coal and Steel	<table border="1"> <tr> <td>Erstellt</td> <td>SMH</td> <td>Datum</td> <td>08/01</td> </tr> <tr> <td>Bearbeitet</td> <td>MEB</td> <td>Datum</td> <td>04/06</td> </tr> <tr> <td>Bearbeitet</td> <td>SA</td> <td>Datum</td> <td>05/17</td> </tr> </table>	Erstellt	SMH	Datum	08/01	Bearbeitet	MEB	Datum	04/06	Bearbeitet	SA	Datum
Erstellt	SMH	Datum	08/01											
Bearbeitet	MEB	Datum	04/06											
Bearbeitet	SA	Datum	05/17											

**BEMESSUNGSBEISPIEL 10 – Rechteckiges Hohlprofil unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung mit 30 Minuten Feuerwiderstand**

Ein ungeschütztes, kaltgeformtes Rechteckhohlprofil mit einer Drucknormalkraft und Biegung wird für eine 30-minütige Brandbeanspruchung bemessen.

Die Stütze hat eine Länge von 2,7 m und wird durch eine Normalkraft belastet, die aus einem Deckenträger resultiert und die eine Exzentrizität von 90 mm zur Außenkante des Stützenprofils aufweist.



**Einwirkungen**

Die Exzentrizität beträgt  $90 \text{ mm} + h/2$ , mit  $h$  als die Profilhöhe. Daher wird die Stütze durch ein Biegemoment um die Hauptachse belastet.

Die charakteristischen Einwirkungen sind:

Ständige Lasten:	6 kN
Veränderliche Lasten:	7 kN

Die Stütze wird zunächst im Grenzzustand der Tragfähigkeit (LC1) überprüft und anschließend für einen 30-minütigen Brand im Grenzzustand für den Brandfall (LC2) bemessen. Die Lastfallkombinationen sind wie folgt:

$$\text{LC1 (Grenzzustand der Tragfähigkeit)} \quad \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$$

$$\gamma_{G,j} = 1,35 \text{ (ungünstige)}$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5$$

$$\text{LC2 (Grenzzustand für den Brandfall)} \quad \sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1}$$

$$\gamma_{GA} = 1,0$$

Werte für  $\psi_{1,1}$  sind EN 1990 sowie dem Nationalem Anhang zu entnehmen. Auf der sicheren Seite liegend, wird für dieses Beispiel  $\psi_{1,1} = 1,0$  angenommen.

### Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (LC1)

Belastung der Eckstütze infolge Querkraft am Balkenende (LC1):

$$\text{Normalkraft: } N_{Ed} = 1,35 \times 6 + 1,5 \times 7 = 18,6 \text{ kN}$$

Gewählt wird ein Rechteckhohlprofil  $100 \times 50 \times 6$ .

Biegung um die Hauptachse (infolge der Exzentrizität der Querkraft des Balkens bezogen auf die Stützenachse):

$$M_{y,Ed} = 18,6 \times (0,09 + 0,10/2) = 2,60 \text{ kNm}$$

### Teilsicherheitsbeiwerte

Die folgenden Teilsicherheitsbeiwerte werden in diesem Bemessungsbeispiel für LC1 verwendet: Tabelle 4.1

$$\gamma_{M0} = 1,10 \text{ und } \gamma_{M1} = 1,10$$

### Materialeigenschaften

Es wird ein austenitischer nichtrostender Stahl der Sorte 1.4401 mit folgenden Materialkennwerten verwendet:

$$f_y = 220 \text{ N/mm}^2 \text{ und } f_u = 530 \text{ N/mm}^2 \text{ (für warmgewalztes Band).}$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2 \text{ und } G = 76900 \text{ N/mm}^2$$

Tabelle 2.2  
Kapitel  
2.3.1

### Querschnittswerte – 100 x 50 x 6 mm RHP

$$W_{el,y} = 32,58 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad i_y = 32,9 \text{ mm}$$

$$W_{pl,y} = 43,75 \times 10^3 \text{ mm}^3 \quad i_z = 19,1 \text{ mm}$$

$$A = 1500 \text{ mm}^2 \quad t = 6,0 \text{ mm}$$

Bemessungsbeispiel 10	Blatt 3 von 8
<p><b>Querschnittsklassifizierung</b></p> $\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{220} \times \frac{200000}{210000} \right]^{0,5} = 1,01$ <p>Für ein RHP wird die Breite <math>c</math> im Druckbereich mit <math>h - 3t</math> angenommen.  Für den Steg gilt <math>c = 100 - 3 \times 6 = 82</math> mm.  Druckbeanspruchter Steg: <math>c/t = 82/6 = 13,7</math>  Für Querschnittsklasse 1 gilt: <math>33\varepsilon = 33,33</math>  <math>33,33 &gt; 13,7</math>, der Steg kann somit Querschnittsklasse 1 zugeordnet werden.  Bei genauer Betrachtung folgt aus der Querschnittsklasse 1 des druckbeanspruchten Steges, für den Flansch ebenfalls die Zuordnung in die Querschnittsklasse 1.  Somit gilt für den Gesamtquerschnitt Querschnittsklasse 1. (bei reiner Druckbeanspruchung)</p>	<p>Kapitel 5.3.2</p> <p>Tabelle 5.2</p> <p>Tabelle 5.2</p> <p>Tabelle 5.2</p> <p>Tabelle 5.2</p>
<p><b>Querschnitt unter Druckbeanspruchung</b></p> $N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \text{ für Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3}$ $N_{c,Rd} = \frac{1500 \times 220}{1,1} = 300 \text{ kN}$ <p><math>300 \text{ kN} &gt; 18,6 \text{ kN}</math>, der Nachweis ist erfüllt.</p>	<p>Kapitel 5.7.3</p> <p>Gl. 5.27</p>
<p><b>Querschnitt unter Biegebeanspruchung</b></p> $M_{c,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ für Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3}$ $M_{c,y,Rd} = \frac{43750 \times 220}{1,1} = 8,75 \text{ kNm}$ <p><math>8,75 \text{ kNm} &gt; 2,60 \text{ kNm}</math>, der Nachweis ist erfüllt.</p>	<p>Kapitel 5.7.4</p> <p>Gl. 5.29</p>
<p><b>Querschnitte unter kombinierter Beanspruchung (Normalkraft und Biegung)</b></p> $M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}$ <p>Für das RHP kann folgende Annahme für <math>M_{N,y,Rd}</math> getroffen werden:</p> $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1 - n) / (1 - 0,5a_w) \text{ aber } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$ <p>wobei gilt:</p> $a_w = \frac{A - 2bt}{A} \text{ aber } a_w \leq 0,5,$ $a_w = \frac{1500 - 2 \times 50 \times 6}{1500} = 0,6 \text{ aber } a_w \leq 0,5, \text{ somit } a_w = 0,5,$ $n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} = \frac{18,6}{300} = 0,062,$ $M_{N,y,Rd} = 8,75 \left( \frac{1 - 0,062}{1 - 0,5 \times 0,5} \right) = 10,94 \leq M_{pl,y,Rd} = 8,75.$ <p>Somit gilt: <math>M_{N,y,Rd} = 8,75 \text{ kNm}</math>, und <math>M_{y,Ed} \leq M_{N,Rd}</math>.</p>	<p>Kapitel 5.7.6</p> <p>Gl. 5.33</p> <p>EN 1993-1-1, Satz 6.2.9.1(5)</p>

**Knickwiderstand des Querschnitts unter Druckbeanspruchung**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \text{ für Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3}$$

Kapitel  
6.3.3

Gl. 6.2

$$\chi = \frac{1}{\phi + [\phi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1$$

Gl. 6.4

wobei gilt:

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

Gl. 6.5

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \text{ für Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3}$$

Gl. 6.6

$L_{cr}$  = Knicklänge der Stütze auf der sicheren Seite liegend mit  
 $1,0 \times$  Stützenlänge = 2,7 m angenommen.

$$\bar{\lambda}_y = \frac{2700}{32,9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 0,866$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{2700}{19,1} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{\frac{220}{200000}} = 1,492$$

**Knicken um die starke (y-y) Achse**

Für kaltgeformte, austenitische nichtrostende Hohlprofile gilt beim Biegeknicken  $\alpha = 0,49$   
 und  $\bar{\lambda}_0 = 0,30$ .

Tabelle 6.1

$$\phi = 0,5 \times \left( 1 + 0,49 \times (0,866 - 0,3) + 0,866^2 \right) = 1,014$$

$$\chi_y = \frac{1}{1,014 + [1,014^2 - 0,866^2]^{0,5}} = 0,649$$

$$N_{b,y,Rd} = \frac{0,649 \times 1500 \times 220}{1,10} = 194,70 \text{ kN}$$

194,70 kN > 18,6 kN, der Nachweis ist erfüllt.

**Knicken um die schwache (z-z) Achse**

$$\phi = 0,5 \times \left( 1 + 0,49 \times (1,492 - 0,3) + 1,492^2 \right) = 1,905$$

$$\chi_z = \frac{1}{1,905 + [1,905^2 - 1,492^2]^{0,5}} = 0,324$$

$$N_{b,z,Rd} = \frac{0,324 \times 1500 \times 220}{1,10} = 97,20 \text{ kN}$$

97,20 kN > 18,6 kN, der Nachweis ist erfüllt.

(Drillknicken wird bei einem Rechteckhohlprofil mit einem  $h/b$ -Verhältnis von 2 nicht maßgebend.)

Kapitel 6.3.1

Bemessungsbeispiel 10	Blatt 5 von 8
<p><b>Knickwiderstand des Querschnitts unter kombinierter Beanspruchung (Drucknormalkraft und Biegung)</b></p> $\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1$ <p><math>\beta_{w,y} = 1,0</math> für Querschnitte der Klasse 1</p> $k_y = 1,0 + D_1 (\bar{\lambda}_y - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \leq 1 + D_1 (D_3 - D_2) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$ <p>Mit Tabelle 6.6 gilt <math>D_1 = 2,0</math>, <math>D_2 = 0,3</math> und <math>D_3 = 1,3</math>.</p> $k_y = 1,0 + 2 \times (0,866 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,108 < 1 + 2 \times (1,3 - 0,3) \times \frac{18,6}{194,7} = 1,191$ <p><math>\Rightarrow k_y = 1,108</math></p> $\frac{18,6}{97,20} + 1,108 \times \left( \frac{2,60 \times 10^6 + 0}{1,0 \times 43,75 \times 10^3 \times 220 / 1,10} \right) = 0,521 < 1, \text{ der Nachweis ist erfüllt.}$ <p><b>Brandschutzbemessung (LC2)</b></p> <p>Im LC2 wird die Stütze für die folgenden Lasten bemessen:</p> <p>Drucknormalkraft <math>N_{fi,Ed} = 1,0 \times 6 + 1,0 \times 7 = 13,0 \text{ kN}</math></p> <p>Maximales Biegemoment <math>M_{y,fi,Ed} = 13,0 \times (0,09 + 0,05) = 1,82 \text{ kNm}</math></p> <p><b>Ermittlung der Temperatur im Stahl nach 30-minütiger Brandbeanspruchung</b></p> <p>Es wird ein ungeschützter Querschnitt und eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb des Stahlprofils angenommen. Der Anstieg der Temperatur während des Zeitintervalls <math>\Delta t</math> ergibt sich wie folgt:</p> $\Delta \theta_t = \frac{A_m / V}{c \rho} \dot{h}_{net,d} \Delta t$ $\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r}$ $\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta)$ $\dot{h}_{net,r} = \phi \varepsilon_{res} 5,67 \times 10^{-8} \left[ (\theta_g + 273)^4 - (\theta + 273)^4 \right]$ <p>worin gilt:</p> <p><math>\theta_g</math> = Gastemperatur in der Umgebung des brandbeanspruchten Bauteils entsprechend der zeitabhängigen Nenntemperaturkurve:</p> $\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1)$ <p><math>\theta</math> = Oberflächentemperatur des Bauteils.</p>	<p>Kapitel 6.5.2</p> <p>Gl. 6.56</p> <p>Gl. 6.63</p> <p>Tabelle 6.6</p> <p>Kapitel 8.4.4</p> <p>Gl. 8.41</p> <p>Gl. 8.42</p> <p>Gl. 8.43</p> <p>Gl. 8.44</p> <p>Gl. 8.45</p>

Eingangswerte für die Bestimmung der maximalen Stahltemperatur sind wie folgt:

$$A_m/V = 200 \text{ m}^{-1}$$

$$\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Anfängliche Stahltemperatur:  $\theta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Resultierende Wärmestrahlung:  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,4$

Dichte des Stahls:  $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$  für die Stahlsorte 1.4401

Konfigurationsfaktor:  $\varphi = 1,0$

Die spezifische Wärmekapazität ist temperaturabhängig und wird wie folgt ermittelt:

$$c = 450 + 0,28\theta - 2,91 \times 10^{-4}\theta^2 + 1,34 \times 10^{-7}\theta^3 \text{ J/kgK}$$

$$\Delta t = 2 \text{ Sekunden}$$

Die oben angegebenen Formeln und Eingangsparameter wurden mithilfe von Excel berechnet, sodass sich die folgende Stahltemperatur nach einer 30-minütigen Brandbeanspruchung ergibt:

$$\theta = 829 \text{ }^\circ\text{C}$$

### Abminderung der mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen

Die folgenden Abminderungsbeiwerte werden für die Berechnung des Widerstandes bei erhöhten Temperaturen benötigt:

Abminderungsfaktor für den E-Modul:  $k_{E,\theta} = E_\theta/E$

Abminderungsfaktor für die 0,2%-Dehngrenze:  $k_{p0,2,\theta} = f_{p0,2,\theta}/f_y$

Abminderungsfaktor für die Zugfestigkeit bei 2 %

der gesamten Dehnung:  $k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y$  aber  $f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$

Die Abminderungsfaktoren bei einer Temperatur von 829 °C werden durch lineare Interpolation ermittelt:

$$k_{E,\theta} = 0,578$$

$$k_{p0,2,\theta} = 0,355$$

$$k_{2,\theta} = 0,430$$

$$k_{u,\theta} = 0,297$$

$$f_{2,\theta} = 0,430 \times 220 = 94,6 \text{ und } f_{u,\theta} = 0,297 \times 530 = 157, \text{ somit } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

### Teilsicherheitsbeiwerte

$$\gamma_{M,fi} = 1,0$$

Kapitel  
8.4.4

Kapitel  
8.4.4

Tabelle 2.7  
EN 1991-1-2  
Satz 3.1(7)

Gl. 8.37

Kapitel 8.2

Gl. 8.4

Gl. 8.1

Gl. 8.2

Tabelle 8.1

Tabelle 8.1

Kapitel 8.1

Bemessungsbeispiel 10	Blatt 7 von 8
<p><b>Querschnittsklassifizierung</b></p> <p>Unter Druckbeanspruchung wird <math>k_{y,\theta}</math> mit <math>f_{p0,2,\theta}</math> bestimmt, d.h. <math>k_{y,\theta} = k_{p0,2,\theta}</math>.</p> $\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 1,01 \times \left[ \frac{0,578}{0,355} \right]^{0,5} = 1,29$ <p>Druckbeanspruchter Steg: <math>c/t = 82/6 = 13,7</math></p> <p>Für Querschnitte der Klasse 1 gilt: <math>33 \varepsilon_{\theta} = 42,57</math></p> <p><math>42,57 &gt; 13,7</math>, der Steg wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.</p> <p>Der Gesamtquerschnitt wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet (reine Druckbeanspruchung).</p> <p><b>Knickwiderstand des Querschnitts unter Druckbeanspruchung</b></p> $N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{p0,2,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}}$ für Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3 <p><math display="block">\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + [\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2]^{0,5}} \leq 1</math></p> <p>worin gilt:</p> $\phi_{\theta} = 0,5 \left( 1 + \alpha (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2 \right),$ $\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda} \left[ \frac{k_{p0,2,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5}, \text{ für alle Querschnittsklassen,}$ $\bar{\lambda}_{y,0} = 0,866 \left[ \frac{0,355}{0,578} \right]^{0,5} = 0,679,$ $\bar{\lambda}_{z,0} = 1,492 \left[ \frac{0,355}{0,578} \right]^{0,5} = 1,169.$ <p><b>Knicken um die starke (y-y) Achse:</b></p> <p>Für kaltgeformte, austenitische nichtrostende Hohlprofile gilt beim Biegeknicken <math>\alpha = 0,49</math> und <math>\bar{\lambda}_0 = 0,30</math>.</p> $\phi_{\theta,y} = 0,5 \times \left( 1 + 0,49 \times (0,679 - 0,3) + 0,679^2 \right) = 0,823$ $\chi_{fi,y} = \frac{1}{0,823 + [0,823^2 - 0,679^2]^{0,5}} = 0,776$ $N_{b,y,fi,t,Rd} = \frac{0,776 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 90,91 \text{ kN}$ <p><math>90,91 \text{ kN} &gt; 13,0 \text{ kN}</math>, der Nachweis ist erfüllt.</p>	<p>Kapitel 8.3.2</p> <p>Kapitel 8.2</p> <p>Gl. 8.6</p> <p>Gl. 8.10</p> <p>Gl. 8.12</p> <p>Gl. 8.13</p> <p>Gl. 8.14</p> <p>Tabelle 6.1</p>

**Knicken um die schwache (z-z) Achse:**

$$\phi_{\theta,z} = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,169 - 0,3) + 1,169^2) = 1,396$$

$$\chi_{fi,z} = \frac{1}{1,396 + [1,396^2 - 1,169^2]^{0,5}} = 0,463$$

$$N_{b,z,fi,t,Rd} = \frac{0,463 \times 0,355 \times 1500 \times 220}{1,0} = 54,24 \text{ kN}$$

54,24 kN > 18,6 kN, der Nachweis ist erfüllt.

**Knickwiderstand des Querschnitts unter kombinierter Beanspruchung (Drucknormalkraft und Biegung)**

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad \text{Gl. 8.26}$$

worin gilt.

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3, \quad \text{Gl. 8.30}$$

$$\mu_y = (1,2 \beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8. \quad \text{Gl. 8.31}$$

Unter der Annahme das die Stütze am Fußpunkt gelenkig gelagert ist, ergibt sich eine dreieckige Momentenverteilung mit  $\beta_M = 1,8$  Tabelle 8.3

$$\begin{aligned} \mu_y &= (1,2 \times 1,8 - 3) \times 0,679 + 0,44 \times 1,8 - 0,29 \\ &= -0,068 \end{aligned}$$

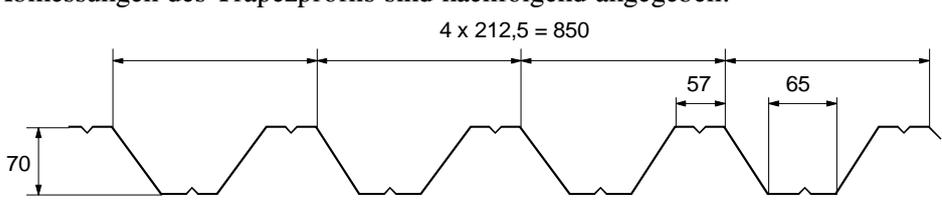
$$k_y = 1 - \frac{(-0,068) \times 13,0 \times 10^3}{0,776 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} = 1,010 < 3,0$$

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} \left( \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right) \text{ für Querschnitte der Klasse 1, 2 oder 3} \quad \text{Gl. 8.15}$$

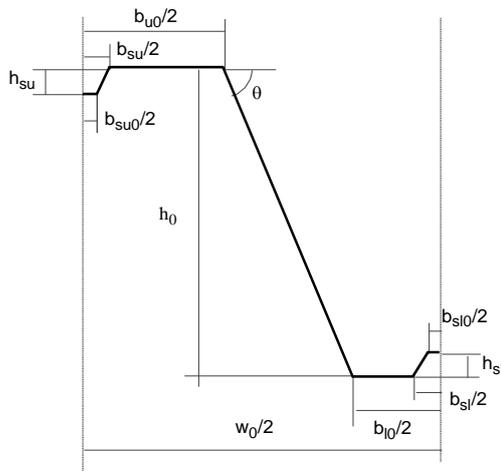
$$M_{y,fi,\theta,Rd} = 0,430 \times 8,75 \times \left( \frac{1,10}{1,0} \right) = 4,14 \text{ kNm}$$

$$\frac{13,0}{0,463 \times 1500 \times 0,355 \times \frac{220}{1,0}} + \frac{1,010 \times 1,82}{4,14} = 0,444 \leq 1 \quad \text{Gl. 8.26}$$

Somit hat das Profil einen ausreichenden Widerstand gegen eine 30-minütige Brandbeanspruchung.

<p><b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b></p> <p><b>BERECHNUNGSVORLAGE</b></p>			Blatt 1 von 8	
	<p><b>Titel</b> Bemessungsbeispiel 11 – Stahltrapezprofil als Dacheindeckung der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung - Vergleich der Bemessung für kaltverfestigtes und geglühtes Material</p>			
	<p><b>Auftraggeber</b> Research Fund for Coal and Steel</p>	Erstellt	JG/AO	Datum 02/06
Bearbeitet		GZ	Datum 03/06	
Bearbeitet		SJ	Datum 04/17	
<p><b>BEMESSUNGSBEISPIEL 11 – Stahltrapezprofil als Dacheindeckung der Querschnittsklasse 4 unter Biegebeanspruchung - Vergleich der Bemessung für kaltverfestigtes und geglühtes Material</b></p> <p>Ein Trapezprofil aus austenitischem nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4401 CP500, d. h. kaltverfestigt mit <math>f_y = 460 \text{ N/mm}^2</math>, mit einer Blechdicke von 0,6 mm wird als Zweifeldträger in einem Dach bemessen. Es wird ein Vergleich mit einem identischen Trapezprofil aus ferritischem Stahl der Sorte 1.4003 im geglühten Zustand, d.h. <math>f_y = 280 \text{ N/mm}^2</math> (siehe Bemessungsbeispiel 3), durchgeführt. (Anmerkung: Bei der Bemessung von ferritischen bzw. austenitischen Dachkonstruktionen gibt es grundsätzlich keine Unterschiede.)</p> <p>Die Abmessungen des Trapezprofils sind nachfolgend angegeben.</p>  <p>Das Beispiel beinhaltet die folgenden Bemessungsaspekte:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestimmung der wirksamen Querschnittswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit,</li> <li>- Bestimmung der Biegebeanspruchbarkeit des Querschnitts,</li> <li>- Bestimmung der Tragfähigkeit am mittleren Auflager,</li> <li>- Bestimmung der Verformungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.</li> </ul> <p><b>Systemangaben</b></p> <p>Spannweite: <math>L = 3500 \text{ mm}</math></p> <p>Auflagerbreite: <math>s_s = 100 \text{ mm}</math></p> <p>Bemessungsflächenlast: <math>Q = 1,4 \text{ kN/m}^2</math></p> <p>Eigengewicht: <math>G = 0,07 \text{ kN/m}^2</math></p> <p>Profildicke: <math>t = 0,6 \text{ mm}</math></p> <p>Streckgrenze: <math>f_y = 460 \text{ N/mm}^2</math></p> <p>Elastizitätsmodul: <math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math></p> <p>Teilsicherheitsbeiwerte: <math>\gamma_{M0} = 1,1</math></p> <p><math>\gamma_{M1} = 1,1</math></p> <p><math>\gamma_G = 1,35</math> (ständige Lasten)</p> <p><math>\gamma_Q = 1,5</math> (veränderliche Lasten)</p>				
<p>Tabelle 2.3 Kapitel 2.3.1 Tabelle 4.1 Tabelle 4.1 Kapitel 4.3 Kapitel 4.3</p>				

Eine Detailskizze des Trapezprofils ist der folgenden Abbildung zu entnehmen. Der Querschnitt ist so gelagert, dass der obere Flansch am Auflager aufgrund der Biegung auf Druck beansprucht wird.



Achsmaße:

- $h_0 = 70 \text{ mm}$ ,
- $w_0 = 212,5 \text{ mm}$ ,
- $b_{u0} = 65 \text{ mm}$ ,
- $b_{l0} = 57 \text{ mm}$ ,
- $b_{su} = 20 \text{ mm}$ ,
- $b_{su0} = 8 \text{ mm}$ ,
- $h_{su} = 6 \text{ mm}$ ,
- $b_{sl} = 20 \text{ mm}$ ,
- $r = 2 \text{ mm}$  (Innenradius der Ecken).

Winkel des Steges:

$$\theta = \arctan \left| \frac{h_0}{0,5(w_0 - b_{u0} - b_{l0})} \right| = \arctan \left| \frac{70}{0,5 \times (212,5 - 65 - 57)} \right| = 57,1^\circ$$

**Wirksame Querschnittswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GzT)**

Breite/Dicke-Verhältnis:

$$h_0/t = 70/0,6 = 117 \leq 400 \sin \theta = 336$$

Winkel des Steges und Eckradius:

$$\max(b_{l0}/t; b_{u0}/t) = b_{u0}/t = 65/0,6 = 108 \leq 400$$

$$45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$$

$$b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

Der Einfluss runder Ecken auf die Tragfähigkeit von Querschnitten kann vernachlässigt werden, wenn der Innenradius die Bedingungen  $r \leq 5t$  sowie  $r \leq 0,10b_p$  erfüllt.

$$r = 2 \text{ mm} \leq \min(5t; 0,1b_p) = \min(5 \times 0,6; 0,1 \times 22,5) = 2,25 \text{ mm}$$

Der Einfluss runder Ecken auf die Tragfähigkeit des Querschnitts kann vernachlässigt werden.

**Lage der Schwerachse für den vollständig wirksamen Steg**

Der Abminderungsfaktor  $\rho$  wird für den beidseitig gestützten druckbeanspruchten Flansch ermittelt:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} \text{ aber } \leq 1$$

worin gilt:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{22,5/0,6}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{4}} = 0,946$$

$$\psi = 1 \Rightarrow k_\sigma = 4$$

$$\bar{b} = b_p = \frac{b_{u0} - b_{su}}{2} = \frac{65 - 20}{2} = 22,5 \text{ mm}$$

Kapitel 5.2

Tabelle 5.1

Tabelle 5.1

Kapitel 5.6.2

Kapitel 5.4.1  
Gl. 5.1

Gl. 5.3

Tabelle 5.3

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{460} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,698$$

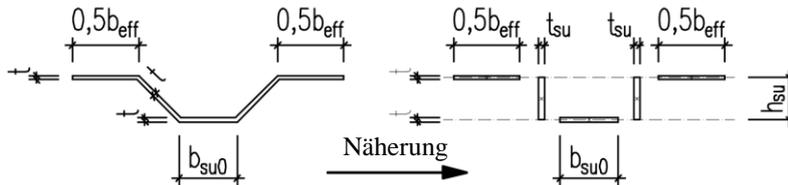
Tabelle 5.2

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,079}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{0,946} - \frac{0,079}{0,946^2} = 0,728 \leq 1$$

$$b_{\text{eff},u} = \rho \bar{b} = 0,728 \times 22,5 = 16,38 \text{ mm}$$

Tabelle 5.3

**Wirksame Querschnittswerte der Aussteifungen (Sicken)**



$$t_{\text{su}} = \frac{\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su0}}}{2}\right)^2}}{h_{\text{su}}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$A_s = (b_{\text{eff},u} + b_{\text{su0}})t + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}} = (16,38 + 8) \times 0,6 + 2 \times 6 \times 0,849 = 24,82 \text{ mm}^2$$

Abb. 5.3

$$e_s = \frac{b_{\text{su0}}h_{\text{su}}t + 2h_{\text{su}}\frac{h_{\text{su}}}{2}t_{\text{su}}}{A_s} = \frac{8 \times 6 \times 0,6 + 2 \times 6 \times \frac{6}{2} \times 0,849}{24,82} = 2,39 \text{ mm}$$

$$I_s = 2(15t^2e_s^2) + b_{\text{su0}}t(h_{\text{su}} - e_s)^2 + 2h_{\text{su}}t_{\text{su}}\left(\frac{h_{\text{su}}}{2} - e_s\right)^2 + 2\left(\frac{15t^4}{12}\right) + \frac{b_{\text{su0}}t^3}{12} + 2\frac{t_{\text{su}}h_{\text{su}}^3}{12}$$

$$I_s = 2 \times (15 \times 0,6^2 \times 2,39^2) + 8 \times 0,6 \times (6 - 2,39)^2 + 2 \times 6 \times 0,849 \times \left(\frac{6}{2} - 2,39\right)^2 + 2 \times \left(\frac{15 \times 0,6^4}{12}\right) + \frac{8 \times 0,6^3}{12} + 2 \times \frac{0,849 \times 6^3}{12} = 159,07 \text{ mm}^4$$

Abb. 5.3

$$b_s = 2\sqrt{h_{\text{su}}^2 + \left(\frac{b_{\text{su}} - b_{\text{su0}}}{2}\right)^2} + b_{\text{su0}} = 2 \times \sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2} + 8 = 25,0 \text{ mm}$$

$$l_b = 3,07 \left[ I_s b_p^2 \left( \frac{2b_p + 3b_s}{t^3} \right) \right]^{1/4} = 3,07 \times \left[ 159,07 \times 22,5^2 \times \left( \frac{2 \times 22,5 + 3 \times 25}{0,6^3} \right) \right]^{1/4} = 251 \text{ mm}$$

Gl. 5.10

$$s_w = \sqrt{\left(\frac{w_0 - b_{u0} - b_{l0}}{2}\right)^2 + h_0^2} = \sqrt{\left(\frac{212,5 - 65 - 57}{2}\right)^2 + 70^2} = 83,4 \text{ mm}$$

Abb. 5.5

$$b_d = 2b_p + b_s = 2 \times 22,5 + 25 = 70 \text{ mm}$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} = \sqrt{\frac{83,4 + 2 \times 70}{83,4 + 0,5 \times 70}} = 1,37$$

Gl. 5.11

$$\frac{l_b}{s_w} = \frac{251}{83,4} = 3,01 \geq 2 \Rightarrow k_w = k_{w0} = 1,37$$

Gl. 5.8

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

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 \times 1,37 \times 200 \times 10^3}{24,82} \times \sqrt{\frac{159,07 \times 0,6^3}{4 \times 22,5^2 \times (2 \times 22,5 + 3 \times 25)}} = 551,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,s}}} = \sqrt{\frac{460}{551,3}} = 0,913$$

$$0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,913 < 1,38 \Rightarrow$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \times 0,913 = 0,81$$

$$t_{red,u} = \chi_d t = 0,81 \times 0,6 = 0,486 \text{ mm}$$

Der Abstand der Schwerachse zum druckbeanspruchten Flansch:

$$t_{sl} = \frac{\sqrt{h_{sl}^2 + \left(\frac{b_{sl} - b_{sl0}}{2}\right)^2}}{h_{sl}} t = \frac{\sqrt{6^2 + \left(\frac{20 - 8}{2}\right)^2}}{6} \times 0,6 = 0,849 \text{ mm}$$

$$t_w = t / \sin\theta = 0,6 / \sin(57,1^\circ) = 0,714 \text{ mm}$$

$e_i$ [mm]	$A_i$ [mm <sup>2</sup> ]
0	$0,5b_{eff,u} t = 4,9$
0	$0,5b_{eff,u} \chi_d t = 3,98$
$0,5h_{su} = 3$	$h_{su} \chi_d t_{su} = 4,13$
$h_{su} = 6$	$0,5b_{su0} \chi_d t = 1,94$
$0,5h_0 = 35$	$h_0 t_w = 49,98$
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$
$h_0 - 0,5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5,09$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0,5b_{sl0} t = 2,4$

$$A_{tot} = \sum A_i = 83,52 \text{ mm}^2$$

$$e_c = \frac{\sum A_i e_i}{A_{tot}} = 36,46 \text{ mm}$$

**Wirksame Querschnittswerte des druckbeanspruchten Bereichs vom Steg**

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} = 0,76t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{com,Ed}}} = 0,76 \times 0,6 \times \sqrt{\frac{200}{1,1 \times 460 \times 10^{-3}}} = 9,07 \text{ mm}$$

$$s_{eff,n} = 1,5s_{eff,0} = 1,5 \times 9,07 = 13,61 \text{ mm}$$

**Wirksamer Querschnittswerte für die halbe Aussteifung (Sicke)**

$$h_{eff,1} = s_{eff,1} \sin\theta = 9,07 \times \sin(57,1^\circ) = 7,62 \text{ mm}$$

$$h_{eff,n} = s_{eff,n} \sin\theta = 13,61 \times \sin(57,1^\circ) = 11,43 \text{ mm}$$

Gl. 5.4

Gl. 5.17

EN 1993-1-3  
5.5.3.4.3(4-5)

$e_{\text{eff},i}$ [mm]	$A_{\text{eff},i}$ [mm <sup>2</sup> ]	$I_{\text{eff},i}$ [mm <sup>4</sup> ]
0	$0,5b_{\text{eff},u}t = 4,9$	$\approx 0$
0	$0,5b_{\text{eff},u} \chi_d t = 4,0$	$\approx 0$
$0,5h_{\text{su}} = 3$	$h_{\text{su}} \chi_d t_{\text{su}} = 4,1$	$\chi_d t_{\text{su}} h_{\text{su}}^3 / 12 = 12,4$
$h_{\text{su}} = 6$	$0,5b_{\text{su}0} \chi_d t = 1,9$	$\approx 0$
$0,5h_{\text{eff},1} = 3,8$	$h_{\text{eff},1} t_w = 5,4$	$t_w h_{\text{eff},1}^3 / 12 = 26,3$
$h_0 - 0,5(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) = 47,5$	$(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n}) t_w = 32,1$	$t_w \frac{(h_0 - e_c + h_{\text{eff},n})^3}{12} = 5411,1$
$h_0 = 70$	$0,5(b_{l0} - b_{sl}) t = 11,1$	$\approx 0$
$h_0 - 0,5h_{sl} = 67$	$h_{sl} t_{sl} = 5,1$	$t_{sl} h_{sl}^3 / 12 = 15,3$
$h_0 - h_{sl} = 64$	$0,5b_{sl0} t = 2,4$	$\approx 0$

$A_{\text{tot}} = \sum A_{\text{eff},i} = 71,0 \text{ mm}^2$   
 $e_c = \frac{\sum A_{\text{eff},i} e_{\text{eff},i}}{A_{\text{tot}}} = 40,0 \text{ mm}$   
 $I_{\text{tot}} = \sum I_{\text{eff},i} + \sum A_{\text{eff},i} (e_c - e_{\text{eff},i})^2 = 5\,465,1 + 46\,021,6 = 51\,486,7 \text{ mm}^2$

Alternativ können die wirksamen Querschnittswerte auch iterativ bezogen auf die Lage der Schwerachse des wirksamen Querschnitts ermittelt werden.

**Momenten Tragfähigkeit je m Breite (1 m)**

$I = \frac{1000}{0,5w_0} I_{\text{tot}} = \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 51\,486,7 = 484\,580,7 \text{ mm}^4$   
 $W_u = \frac{I}{e_c} = \frac{484\,580,7}{40} = 12\,114,5 \text{ mm}^3$   
 $W_1 = \frac{I}{h_0 - e_c} = \frac{484\,580,7}{70 - 40} = 16\,152,7 \text{ mm}^3$   
 Da  $W_u < W_1 \Rightarrow W_{\text{eff},\text{min}} = W_u = 12\,114,5 \text{ mm}^3$   
 $M_{\text{c,Rd}} = \frac{W_{\text{eff},\text{min}} f_y}{\gamma_{\text{M0}}} = 12114,5 \times 460 \times \frac{10^{-6}}{1,1} = 5,07 \text{ kNm}$

**Ermittlung der Tragfähigkeit am mittleren Auflager**  
**Bemessungswiderstand des Steges gegen Krüppeln**

$c \geq 40 \text{ mm}$   
 $r/t = 2/0,6 = 3,33 \leq 10$   
 $h_w/t = 70/0,6 = 117 \leq 200 \sin \theta = 200 \sin(57,1^\circ) = 168$   
 $45^\circ \leq \theta = 57,1^\circ \leq 90^\circ$   
 $\beta_V = 0 \leq 0,2 \Rightarrow l_a = s_s = 100 \text{ mm}$   
 $\alpha = 0,15$  (Kategorie 2)

EN 1993-1-3

Gl. 5.31

Kapitel 6.4.4

EN 1993-1-3

Satz 6.1.7

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_y E} \left( 1 - 0,1 \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left( 0,5 + \sqrt{0,02 \frac{l_a}{t}} \right) \left[ 2,4 + \left( \frac{\varphi}{90} \right)^2 \right] \frac{1}{\gamma_{M1}} \frac{1000}{0,5 w_0}$$

$$R_{w,Rd} = 0,15 \times 0,6^2 \sqrt{460 \times 200\,000} \times \left( 1 - 0,1 \sqrt{\frac{2}{0,6}} \right) \left( 0,5 + \sqrt{0,02 \times \frac{100}{0,6}} \right) \times \left[ 2,4 + \left( \frac{57,1}{90} \right)^2 \right] \times \frac{1}{1,1} \times \frac{1000}{0,5 \times 212,5} \times 10^{-3} = 23,6 \text{ kN}$$

EN 1993-1-3  
Gl. 6.18

**Kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Auflagerreaktion**

Einwirkung je m Breite (1 m):

$$q = \gamma_G G + \gamma_Q Q = 1,35 \times 0,07 + 1,5 \times 1,4 = 2,19 \text{ kN/m}$$

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8} = \frac{2,19 \times 3,5^2}{8} = 3,35 \text{ kNm}$$

$$F_{Ed} = \frac{5}{4} qL = \frac{5}{4} \times 2,19 \times 3,5 = 9,58 \text{ kN}$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{3,35}{5,07} = 0,661 \leq 1,0$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = \frac{9,58}{23,6} = 0,406 \leq 1,0$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} = 0,661 + 0,406 = 1,067 \leq 1,25$$

EN 1993-1-3  
Gl. 6.28a-c

Die Querschnittstragfähigkeit erfüllt die Bedingungen.

**Bestimmung der Verformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit**

**Wirksame Querschnittswerte**

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit sollte die wirksame Breite des druckbeanspruchten Bauteils ebenfalls mit der Druckspannungsverteilung im Bauteil aus Lasten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ermittelt werden.

EN 1993-1-3  
Satz 5.5.1

Eine konservative Annäherung für die maximale Druckspannung des wirksamen Querschnitts im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird mit  $W_u$  erreicht, welches zuvor im Grenzzustand der Tragfähigkeit bestimmt wurde.

$$M_{y,Ed,ser} = \frac{(G + Q)L^2}{8} = \frac{(0,07 + 1,4) \times 3,5^2}{8} = 2,25 \text{ kNm}$$

$$\sigma_{com,Ed,ser} = \frac{M_{y,Ed,ser}}{W_u} = \frac{2,25 \times 10^6}{12114,5} = 185,7 \text{ N/mm}^2$$

Die wirksamen Querschnittswerte werden wie im Grenzzustand der Tragfähigkeit ermittelt mit der Ausnahme, dass  $f_y$  durch  $\sigma_{com,Ed,ser}$  ersetzt wird und dass die Dicke der Flanschsteifen nicht abgemindert wird. Die Berechnung liefert folgende Ergebnisse:

Effektive Breite des druckbeanspruchten Flansch: Der Flansch ist vollständig wirksam.

Lage der Schwerachse, wenn der Steg vollständig wirksam ist:  $e_c = 34,1 \text{ mm}$

Wirksamer Querschnitt der druckbeanspruchten Bereiche des Steges: Der Steg ist vollständig wirksam.

Wirksamer Teil des Steges:  $s_{eff,1} = 14,268 \text{ mm}$   
 $s_{eff,n} = 21,4 \text{ mm}$

Wirksame Querschnittswerte für die halbe Aussteifung (Sicke):	$A_{\text{tot}} = 82,44 \text{ mm}^2$ $e_c = 36,25 \text{ mm}$ $I_{\text{tot}} = 59726,1 \text{ mm}^4$
Wirksame Querschnittswerte je m Breite (1 m):	$I = 562128,0 \text{ mm}^4$ $W_u = 15507,0 \text{ mm}^4$ $W_l = 16655,6 \text{ mm}^4$

**Bestimmung der Verformungen**

Der Sekantenmodul entspricht dem maximalen Biegemoment:

$$\sigma_{1,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_u} = \frac{2,25 \times 10^6}{15\,507} = 145,096 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2,\text{Ed,ser}} = \frac{M_{y,\text{Ed,ser}}}{W_l} = \frac{2,25 \times 10^6}{16\,655,6} = 135,090 \text{ N/mm}^2$$

$n = 7$  (für die austenitische nichtrostende Stahlsorte 1.4401)

$$E_{S,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{1,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,145} \left( \frac{0,145}{0,460} \right)^7} = 199,83 \text{ kN/mm}^2$$

Tabelle 6.4

Gl. 6.53

$$E_{S,2} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}} \left( \frac{\sigma_{2,\text{Ed,ser}}}{f_y} \right)^n} = \frac{200}{1 + 0,002 \times \frac{200}{0,135} \left( \frac{0,135}{0,460} \right)^7} = 199,89 \text{ kN/mm}^2$$

Gl. 6.53

$$E_S = \frac{E_{S,1} + E_{S,2}}{2} = \frac{199,83 + 199,89}{2} = 199,86 \text{ kN/mm}^2$$

Gl. 6.52

**Überprüfung der Verformungen**

Auf der sicheren Seite liegend kann die Änderung von  $E_{s,\text{ser}}$  über die Bauteillänge vernachlässigt werden.

Für die Querschnittssteifigkeiten sollte der Einfluss der ausgerundeten Ecken beachtet werden. Der Einfluss wird über die folgende Näherung berücksichtigt:

$$\delta = 0,43 \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \frac{2 \times \frac{294,2^\circ}{90^\circ}}{149,3} = 0,019$$

Gl. 5.22

$$I_{y,r} = I (1 - 2\delta) = 562128,0 (1 - 2 \times 0,019) = 540767,1 \text{ mm}^4$$

Gl. 5.20

Lage der maximalen Verformung:

$$x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times L = \frac{1 + \sqrt{33}}{16} \times 3,5 = 1,48 \text{ m}$$

$$\delta = \frac{(G + Q)L^4}{48E_S I_{y,r}} \left( \frac{x}{L} - 3 \frac{x^3}{L^3} + 2 \frac{x^4}{L^4} \right)$$

$$\delta = \frac{(0,07 + 1,4) \times 10^3 \times 3,5^4}{48 \times 199,86 \times 10^6 \times 540767,1 \times 10^{-12}} \times \left( \frac{1,48}{3,5} - 3 \times \frac{1,48^3}{3,5^3} + 2 \times \frac{1,48^4}{3,5^4} \right)$$

$$\delta = 11,1 \text{ mm}$$

Die zulässige Verformung beträgt  $L/200 = 3500/200 = 17,5 \text{ mm} > 11,1 \text{ mm}$ .  
Somit ist die berechnete Verformung zulässig.

**Vergleich zwischen den geglähten und den kaltverfestigten Bauteilen**

Ein Vergleich der Momenten Tragfähigkeit je m Breite und der Tragfähigkeit bei lokaler Lasteileitung von zwei identischen Profilen aus jedoch zwei unterschiedlichen nichtrostenden Stählen einmal im geglähten ( $f_y = 280 \text{ N/mm}^2$ ) und einmal im kaltverfestigten ( $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ ) Zustand zeigt folgende Ergebnisse:

$$f_y = 280 \text{ N/mm}^2 \text{ (Bemessungsbsp. 3)} \quad M_{c,Rd} = 3,84 \text{ kNm} \quad \text{und} \quad R_{w,Rd} = 18,4 \text{ kN}$$

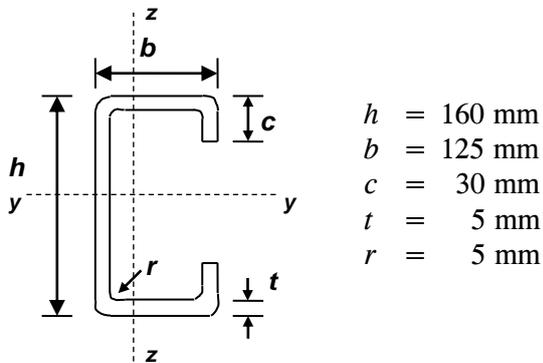
$$f_y = 460 \text{ N/mm}^2 \text{ (Bemessungsbsp. 11)} \quad M_{c,Rd} = 5,07 \text{ kNm} \quad \text{und} \quad R_{w,Rd} = 23,6 \text{ kN}$$

Bei dem Trapezprofil aus geglähtem Material muss die Spannweite auf 2,90 m reduziert werden, verglichen mit 3,5 m für das kaltverfestigte Material. Ein Einsatz von kaltverfestigtem Material bei Dachkonstruktionen erlaubt grundsätzlich höhere Spannweiten, d.h. die Anzahl von Zwischenträgern und Pfetten kann reduziert werden, wodurch die Kosten gesenkt werden können.

<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 8			
	Titel Bemessungsbeispiel 12– Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Material in einem offenen Geschoss unter Biegebeanspruchung			
	Auftraggeber Research Fund for Coal and Steel	Erstellt	ER/EM	Datum 02/06
		Bearbeitet	HB	Datum 03/06
Bearbeitet		ER/IA	Datum 04/17	
<p><b>BEMESSUNGSBEISPIEL 12 – Gekantetes U-Profil aus kaltverfestigtem Material in einem offenen Geschoss unter Biegebeanspruchung</b></p> <p>Ein C-Profil unter Biegebeanspruchung mit einem seitlich nicht gehaltenen Druckflansch aus austenitischem nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4401 CP500 im kaltverfestigtem Zustand wird bemessen. Der Träger ist gelenkig gelagert mit einer Stützweite von <math>l = 4</math> m. Der Abstand zwischen benachbarten Trägern beträgt 1 m.</p> <p>Da die Last nicht im Schubmittelpunkt des C-Profils angreift, muss eine Interaktion zwischen den Widerständen gegen Drillknicken und gegen Biegedrillknicken des Querschnitts überprüft werden. In diesem Beispiel wird jedoch nur der Biegedrillknickwiderstand des Bauteils überprüft.</p> <p><b>Teilsicherheitsbeiwerte</b>  <math>\gamma_{M0} = 1,1</math> und <math>\gamma_{M1} = 1,1</math>  <math>\gamma_G = 1,35</math> (ständige Lasten) und <math>\gamma_Q = 1,5</math> (veränderliche Lasten)</p> <p><b>Einwirkungen</b>          Ständige Einwirkungen (<math>G</math>): <math>2 \text{ kN/m}^2</math>          Veränderliche Einwirkungen (<math>Q</math>): <math>3 \text{ kN/m}^2</math>          Da der Abstand zwischen benachbarten Trägern 1 m beträgt gilt:  <math>G_k = 2 \text{ kN/m}</math>,  <math>Q_k = 3 \text{ kN/m}</math>.          Maßgebende Lastfallkombination im Grenzzustand der Tragfähigkeit:  <math>q^* = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 7,2 \text{ kN/m}</math></p> <p><b>Statische Berechnung</b>          Auflagerreaktionen (Bemessungsquerkraft):  <math>V_{Ed} = \frac{q^* \times 4}{2} = 14,4 \text{ kN}</math>          Bemessungsbiegemoment:  <math>M_{Ed} = \frac{q^* \times 4^2}{8} = 14,4 \text{ kNm}</math></p> <p><b>Materialeigenschaften</b>  <math>f_y = 460 \text{ N/mm}^2</math>          Elastizitätsmodul <math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math> und Schermodul <math>G = 76900 \text{ N/mm}^2</math></p>				
Tabelle 4.1 EN 1991				
EN 1991				
Tabelle 2.3 Kapitel 2.3.1				

**Querschnittswerte**

Der Einfluss runder Ecken auf die Tragfähigkeit von Querschnitten kann vernachlässigt werden, wenn der Innenradius die Bedingungen  $r \leq 5t$  und  $r \leq 0,10b_p$  erfüllt und wenn der Querschnitt aus ebenen Abschnitten mit scharfen Ecken besteht. Für die Steifigkeitswerte des Querschnitts sollte der Einfluss runder Ecken immer berücksichtigt werden.



- $h = 160 \text{ mm}$
- $b = 125 \text{ mm}$
- $c = 30 \text{ mm}$
- $t = 5 \text{ mm}$
- $r = 5 \text{ mm}$

$$r_m = r + t/2 = 7,5 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m [\tan(\varphi/2) - \sin(\varphi/2)] = 2,2 \text{ mm}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 5t = 25 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm} \leq 0,10b_p = 11,56 \text{ mm}$$

Der Einfluss der runden Ecken auf die Querschnittswerte kann mit ausreichender Genauigkeit berücksichtigt werden, indem die Querschnittswerte eines ansonsten gleichen Querschnitts, jedoch mit scharfen Ecken, mit den folgenden Näherungen reduziert werden:

wirksame ebene Breite des Flansches:  $b_{p,f} = b - t - 2g_r = 115,6 \text{ mm}$

wirksame ebene Breite des Steges:  $b_{p,w} = h - t - 2g_r = 150,6 \text{ mm}$

wirksame ebene Breite der Lippe:  $b_{p,l} = c - t/2 - g_r = 25,3 \text{ mm}$

$$A_{g,sh} = t [2b_{p,f} + b_{p,w} + 2b_{p,l}] = 2162 \text{ mm}^2$$

$$I_{yg,sh} = 2 \times \left[ \frac{1}{12} b_{p,f} t^3 + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t)^2 \right] + 2 \times \left[ \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t + b_{p,l} t (0,5h - (c - b_{p,l}) - 0,5b_{p,l})^2 \right] + \frac{1}{12} b_{p,w}^3 t = 9,376 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$$

$$A_g = A_{g,sh} (1 - \delta) = 2119 \text{ mm}^2$$

$$I_g = I_{g,sh} (1 - 2\delta) = 9,0 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

Kapitel 5.6.2

Abb. 5.5

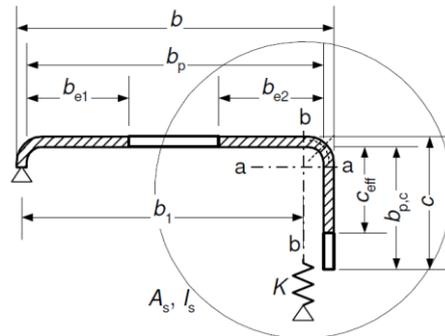
Gl. 5.22

Gl. 5.19

Gl. 5.20

Bemessungsbeispiel 12	Blatt 3 von 8
<p><b>Querschnittsklassifizierung</b></p> $\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5} = 0,698$ <p><b>Flansch:</b> Beidseitig gestütztes Bauteil unter Druckbeanspruchung:  <math>c = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm}</math> und <math>c/t = 23,12</math></p> <p>Für Klasse 2 gilt: <math>c/t \leq 35\varepsilon = 24,43</math>, die Flansche werden der Querschnittsklasse 2 zugeordnet.</p> <p><b>Steg:</b> Beidseitig gestütztes Bauteil unter Biegebeanspruchung:  <math>c = b_{p,w} = 150,6 \text{ mm}</math> und <math>c/t = 30,12</math></p> <p>Für Klasse 1 gilt: <math>c/t \leq 72\varepsilon = 50,26</math>, der Steg wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.</p> <p><b>Lippe:</b> Einseitig gestütztes Bauteil unter Druckbeanspruchung (Druckbeanspruchung am freien Ende):  <math>c = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm}</math> und <math>c/t = 5,06</math></p> <p>Für Klasse 1 gilt: <math>c/t \leq 9\varepsilon = 6,28</math>, die Lippen werden der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.</p> <p><b>Wirkung der Schubverzerrung</b></p> <p>Der Einfluss der Schubverzerrung in den Flanschen kann vernachlässigt werden, wenn gilt <math>b_0 &lt; L_e/50</math>, wobei <math>b_0</math> ein einseitig gestützter Abschnitt oder die Hälfte eines beidseitig gestützten Abschnitts und <math>L_e</math> der Abstand zwischen Momentennullpunkten ist.</p> <p>Für beidseitig gestützte Abschnitte gilt: <math>b_0 = (b - t)/2 = 60 \text{ mm}</math></p> <p>Der Abstand zwischen Momentennullpunkten beträgt: <math>L_e = 4000 \text{ mm}</math>, <math>L_e/50 = 80 \text{ mm}</math></p> <p>Somit kann der Einfluss der Schubverzerrung vernachlässigt werden.</p> <p><b>Eindreihen der Flansche</b></p> <p>Das Eindreihen der Flansche kann vernachlässigt werden, wenn die Verdrehung der Flansche bezogen auf die neutrale Achse <math>u</math> weniger als 5 % der Profilhöhe des Querschnitts beträgt:</p> $u = 2 \frac{\sigma_a^2 b_s^4}{E^2 t^2 z}$ <p><math>\sigma_a</math> ist die mittlere Spannung in den Flanschen berechnet mit dem Bruttoquerschnitt (<math>f_y = 460 \text{ N/mm}^2</math> wird angenommen)</p> <p><math>b_s =</math> ist der Abstand zwischen Stegen <math>= b_{p,f} + b_{p,l} = 140,9 \text{ mm}</math></p> <p><math>t = 5 \text{ mm}</math></p> <p><math>z =</math> ist der Abstand des Flansches bezogen auf die Schwerachse <math>= 77,5 \text{ mm}</math></p> <p><math>u = 2,15 \text{ mm} &lt; 0,05h = 8 \text{ mm}</math>, somit kann das Eindreihen der Flansche vernachlässigt werden.</p>	<p>Kapitel 5.3 Tabelle 5.2</p> <p>Kapitel 5.4.2</p> <p>Kapitel 5.4.3</p> <p>EN 1993-1-3 Satz 5.4 Gl. 5.3a</p>

**Ausgesteifte Bauteile. Randaussteifungen**  
**Drillknicken. Ebene Teilflächen mit Randaussteifungen**



$b/t \leq 60$   
 a) single edge fold

Kapitel 5.5.1  
 und  
 EN 1993-1-3  
 Satz 5.5.3

**Schritt 1: Wirksamer Ausgangsquerschnitt der Aussteifungen**

Für die Flansche (wie zuvor berechnet) gilt:

$b = 125 \text{ mm}$  und  $b_p = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm}$

Für die Lippen wird die wirksame Breite  $c_{eff}$  mit den entsprechenden Knickbeiwerten  $k_\sigma$ ,  $\bar{\lambda}_p$  und  $\rho$  wie folgt bestimmt:

$b_{p,c} = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm}$

$b_{p,c}/b_p = 0,22 < 0,35$  dann gilt  $k_\sigma = 0,5$

$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} = 0,36$  ( $\bar{b} = 25,3 \text{ mm}$ )

Kaltverformte, einseitig gestützte Teilflächen:  $\rho = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = 1,33 > 1$ , also  $\rho = 1,0$

$c_{eff} = \rho b_{p,c} = 25,30 \text{ mm}$

EN 1993-1-3  
 Satz 5.5.3.2

EN 1993-1-3  
 Gl. 5.13b

Gl. 5.3

Gl. 5.2

EN 1993-1-3  
 Gl. 5.13a

**Schritt 2: Abminderungsbeiwert für Drillknicken**

Berechnung der Querschnittswerte für den wirksamen Querschnitt der Randaussteigung:

$b_{e2} = b_{p,f} = 115,6 \text{ mm}$

In diesem Beispiel ist der Druckflansch der Querschnittsklasse 2 zugeordnet, weshalb  $b_{e2}$  bereits den gesamten Flansch berücksichtigt, sodass  $b_{e1} = 0$  ist.

$c_{eff} = b_{p,l} = 25,30 \text{ mm}$

$A_s = (b_{e2} + c_{eff})t = (b_{b,f} + b_{b,l}) \times t = 704,5 \text{ mm}^2$

Berechnung der linearen Federsteifigkeit:

$K_1 = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \left( \frac{1}{b_1^2 h_w + b_1^3 + 0,5b_1 b_2 h_w k_f} \right) = 6,4 \text{ N/mm}^2$

$b_1 = b - y_b - t/2 - r = 71,1 \text{ mm}$  (Abstand zwischen dem Steg-Flansch-Knotenpunkt zum Schwerpunkt des wirksamen Querschnitts der Randaussteifung, inklusive dem wirksamen Teil des Flansches  $b_{e2}$ ).

$k_f = 0$  (Zugflansch)

$h_w = h - 2t - 2r = 160 - 2 \times 5 - 2 \times 5 = 140 \text{ mm}$

EN 1993-1-3  
 Gl. 5.10b

Bemessungsbeispiel 12	Blatt 5 von 8
<p>Ideale Beulspannung für den wirksamen Querschnitt der Aussteifung, mit <math>K = K_1</math></p> $\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} = 565,8 \text{ N/mm}^2$ <p>Abminderungsfaktor <math>\chi_d</math> für Drillknicken:</p> $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}} = 0,90$ <p><math>0,65 &lt; \bar{\lambda}_d &lt; 1,38</math> somit <math>\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d = 0,82</math></p> <p>Reduzierte Querschnittsfläche und Dicke des wirksamen Querschnitts der Aussteifung, mit <math>\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}</math>:</p> $A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} = 576,4 \text{ mm}^2$ $t_{red} = t A_{s,red}/A_s = 4,1 \text{ mm}$ <p>Berechnung der wirksamen Querschnittswerte unter Berücksichtigung von Einflüssen aus Drillknicken:</p> $A_{g,sh} = t [b_{p,f} + b_{p,w} + b_{p,l}] + t_{red} [b_{p,f} + b_{p,l}] = 2034,0 \text{ mm}^2$ $\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ} / \sum_{i=1}^m b_{p,i} = 0,02$ $A_g = A_{g,sh} (1-\delta) = 1993,3 \text{ mm}^2$ <p>Das neue <math>e_{eff}</math>, ausgehend vom Schwerpunkt des Steges, positiv nach unten:</p> $e_{eff} = \frac{-b_{p,f} t_{red} (0,5h - 0,5t_{red}) + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t) - b_{p,l} t_{red} (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l})}{A_{g,sh}} + \frac{b_{p,l} t (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l}) + b_{p,l} 0}{A_{g,sh}} = 4,7 \text{ mm}$ $I_{y,g,sh} = \frac{1}{12} b_{p,f} t_{red}^3 + b_{p,f} t_{red} (0,5h - 0,5t_{red} + e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t_{red} + b_{p,l} t_{red} (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l} + e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,f} t^3 + b_{p,f} t (0,5h - 0,5t - e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,l}^3 t + b_{p,l} t (0,5h - 0,5t - g_r - 0,5b_{p,l} - e_{eff})^2 + \frac{1}{12} b_{p,w}^3 t + b_{p,w} t (e_{eff})^2 = 8,64 \times 10^6 \text{ mm}^4$ $I_{y,g} = I_{y,g,sh} (1-2\delta) = 8,297 \times 10^6 \text{ mm}^4$ <p><math>z_{max} = h/2 + e_{eff} = 160/2 + 4,7 = 84,7 \text{ mm}</math> (Abstand vom oberen Rand zur neutralen Achse)</p> $W_{y,g} = I_{y,g} / z_{max} = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3$	<p>EN 1993-1-3 Gl. 5.15</p> <p>EN 1993-1-3 Gl. 5.12d</p> <p>EN 1993-1-3 Gl. 5.12b</p> <p>EN 1993-1-3 Gl. 5.17</p> <p>Gl. 5.22</p> <p>Gl. 5.19</p> <p>Gl. 5.20</p>

Bemessungsbeispiel 12	Blatt 6 von 8
<p><b>Querschnittstragfähigkeit</b></p> <p><b>Querschnitt unter Biegebeanspruchung</b></p> $M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} = 41,0 \text{ kNm}$ <p>Für das Biegemoment <math>M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}</math> ist die Querschnittstragfähigkeit gewährleistet.</p> <p><b>Querschnitt unter Querkraftbeanspruchung</b></p> $A_v = 800 \text{ mm}^2$ $V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} = 193,15 \text{ kN}$ <p>Für die Querkraft <math>V_{Ed} = 14,4 \text{ kN}</math> ist die Querschnittstragfähigkeit gewährleistet.</p> <p><b>Querschnitt unter kombinierter Belastung</b></p> $V_{Ed} = 14,4 \text{ kN} > 0,5 V_{pl,Rd} = 96,57 \text{ kN}$ <p>Somit ist keine Interaktion zwischen Biegung und Querkraft zu berücksichtigen.</p> <p><b>Biegebeanspruchte Bauteile</b></p> <p><b>Biegedrillknicken</b></p> $M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}$ $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1$ $\phi_{LT} = 0,5 (1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2)$ $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$ $\alpha_{LT} = 0,34 \text{ (für kaltgeformte Querschnitte)}$ <p>Bestimmung des idealen Biegedrillknickmoments:</p> $M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left( \sqrt{\left( \frac{k}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right)$ <p>Für gelenkig gelagerte Träger mit gleichmäßiger Belastung gilt: <math>C_1 = 1,13</math> and <math>C_2 = 0,454</math></p> <p>Bei üblichen Randbedingungen an jedem Ende gilt: <math>k = k_w = 1</math></p> <p><math>z_a</math> ist die Koordinate des Lastangriffs der Einzellast  <math>z_s</math> ist die Koordinate des Schubmittelpunktes  <math>z_g = z_a - z_s = h/2 = 80 \text{ mm}</math>  <math>y_G =</math> ist der Abstand der Mittelachse des Steges zum Schwerpunkt  <math display="block">y_G = \frac{2b_{p,f} t (g_r + 0,5b_{p,f}) + 2b_{p,l} t (b - 0,5t)}{A_s} = 46,4 \text{ mm}</math></p>	<p>Kapitel 5.7</p> <p>Kapitel 5.7.4</p> <p>Gl. 5.29</p> <p>Kapitel 5.7.5</p> <p>Gl. 5.32</p> <p>Kapitel 5.7.6</p> <p>Kapitel 6.4</p> <p>Kapitel 6.4.2</p> <p>Gl. 6.13</p> <p>Gl. 6.14</p> <p>Gl. 6.15</p> <p>Gl. 6.16</p> <p>Gl. E.1</p> <p>Tabelle E.2</p>

Bemessungsbeispiel 12	Blatt 7 von 8
<p> <math>I_{z,sh} = 4,590 \times 10^6 \text{ mm}^4</math>  <math>I_{t,sh} = 18,02 \times 10^3 \text{ mm}^4</math>  <math>I_{w,sh} = 23,19 \times 10^9 \text{ mm}^6</math>  <math>I_z = I_{z,sh} (1-2\delta) = 4,406 \times 10^6 \text{ mm}^4</math>  <math>I_t = I_{t,sh} (1-2\delta) = 17,30 \times 10^3 \text{ mm}^4</math>  <math>I_w = I_{w,sh} (1-4\delta) = 21,33 \times 10^9 \text{ mm}^6</math> </p> $M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2} \left( \sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - (C_2 z_g) \right) = 34,76 \text{ kNm}$ <p> <math>\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{y,g} f_y}{M_{cr}}} = 1,14 \quad (W_{y,g} = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3, \text{ Druckflansch})</math> </p> $\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) = 1,27$ $\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + [\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} = 0,54$ $M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1} = 22,21 \text{ kNm}$ <p>Für das Biegemoment <math>M_{Ed} = 14,4 \text{ kNm}</math> ist der Biegedrillknickwiderstand gewährleistet.</p> <p>Anmerkung: Wenn die Last nicht im Schubmittelpunkt des C-Profils angreift, muss die Interaktion zwischen der Drillknicktragfähigkeit und der Biegedrillknicktragfähigkeit des Bauteils überprüft werden.</p> <p><b>Schubbeultragfähigkeit</b></p> <p>Die Schubbeultragfähigkeit für einen unausgesteiften Steg muss überprüft werden, wenn gilt: <math>h_w / t \geq 56,2\epsilon / \eta</math>.</p> <p>Der empfohlene Wert für <math>\eta = 1,20</math>.</p> <p><math>h_w / t = (h - 2t - 2r) / t = 140 / 5 = 28,0</math>, <math>56,2\epsilon / \eta = 32,67</math>, die Schubbeultragfähigkeit muss nicht überprüft werden.</p> <p><b>Verformungen</b></p> <p>Verformungen sollten für die maßgebenden Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wie folgt berücksichtigt werden:</p> <p>Lastfaktor <math>\gamma_G = 1,00</math> (ständige Lasten) und <math>\gamma_Q = 1,00</math> (veränderliche Lasten)</p> <p>Ständige Einwirkungen (<math>G</math>): <math>2 \text{ kN/m}^2</math> und veränderliche Einwirkungen (<math>Q</math>): <math>3 \text{ kN/m}^2</math></p> <p>Maßgebende Lastfallkombination im GzG, mit einem Abstand zwischen benachbarten Trägern von 1 m:</p> $q = \sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} = 5,0 \text{ kN/m}$	<p>Gl. E.1</p> <p>Gl. 6.16</p> <p>Gl. 6.15</p> <p>Gl. 6.14</p> <p>Gl. 6.13</p> <p>Kapitel 6.4.3</p> <p>Gl. 6.20</p> <p>Kapitel 6.4.6</p> <p>EN 1991</p> <p>EN 1991</p>

Die Verformungen von elastischen Trägern können mit den üblichen Berechnungsmethoden bestimmt werden mit der Ausnahme, dass der Sekantenmodul anstelle des Elastizitätsmodul verwendet werden sollte:

$$E_S = \frac{(E_{S1} + E_{S2})}{2}$$

Gl. 6.52

Dabei ist:

$E_{S1}$  der Sekantenmodul bezogen auf die Spannung im Zugflansch und

$E_{S2}$  der Sekantenmodul bezogen auf die Spannung im Druckflansch.

$E_{S1}$  und  $E_{S2}$  können für die Bemessung im GzG wie folgt bestimmt werden:

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{und} \quad i = 1, 2$$

Gl. 6.53

wobei gilt:

$\sigma_{i,Ed,ser}$  Bemessungswert der Spannung im Zug- bzw. Druckflansch für den GzG,

$n$  Ramberg-Osgood-Koeffizient; für austenitischen nichtrostenden Stahl der Sorte 1.4401 ist  $n = 7$ .

Tabelle 6.4

Das nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Verhalten von nichtrostendem Stahl bedeutet, dass der Elastizitätsmodul innerhalb eines Querschnitts und über die Länge eines Bauteils variieren kann. Vereinfachend kann die Veränderung von  $E_S$  über die Bauteillänge vernachlässigt werden und der Mindestwert von  $E_S$  für das Bauteil (entsprechend der maximalen Werte für die Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  im Bauteil) kann über seine gesamte Länge verwendet werden.

Die Spannungen im Zug- und Druckflansch ergeben sich wie folgt:

Druckflansch:

$$\sigma_{Ed,ser,1} = \frac{M_{Ed,max}}{W_{y,sup}} = 102,1 \text{ MPa} \quad \text{und} \quad E_{S1} = 199979,2 \text{ MPa},$$

Gl. 6.53

mit  $M_{Ed,max} = 10 \text{ kNm}$  und  $W_y = 97,95 \times 10^3 \text{ mm}^3$ .

Zugflansch:

$$\sigma_{Ed,ser,2} = \frac{M_{Ed,max}}{W_{y,inf}} = 100,8 \text{ MPa} \quad \text{und} \quad E_{S2} = 199980,8 \text{ MPa},$$

mit  $M_{Ed,max} = 10 \text{ kNm}$  und  $W_y = 99,24 \times 10^3 \text{ mm}^3$ .

Und somit gilt:  $E_S = 199980,0 \text{ MPa}$

Gl. 6.52

Die maximale Verformung kann näherungsweise durch die üblichen Berechnungsmethoden mit dem Sekantenmodul bestimmt werden.

$$d_{max} = \frac{5ql^4}{384E_S I_y}$$

mit:  $I_y = 8,297 \times 10^6 \text{ mm}^4$ ,  $q = 5,0 \text{ kN/m}$  und  $l = 4,0 \text{ m}$

Blatt 1 &amp; 5

$$d_{max} = 10,0 \text{ mm}$$

<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 9													
	Titel	Bemessungsbeispiel 13 – Fachwerkträger aus kaltverfestigtem Material unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung mit 30 Minuten Feuerwiderstand												
	Auftraggeber	Research Fund for Coal and Steel	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%;">Erstellt</td> <td style="width: 35%;">PTY/AAT</td> <td style="width: 15%;">Datum</td> <td style="width: 35%;">01/06</td> </tr> <tr> <td>Bearbeitet</td> <td>MAP</td> <td>Datum</td> <td>02/06</td> </tr> <tr> <td>Bearbeitet</td> <td>MIG</td> <td>Datum</td> <td>06/17</td> </tr> </table>	Erstellt	PTY/AAT	Datum	01/06	Bearbeitet	MAP	Datum	02/06	Bearbeitet	MIG	Datum
Erstellt	PTY/AAT	Datum	01/06											
Bearbeitet	MAP	Datum	02/06											
Bearbeitet	MIG	Datum	06/17											

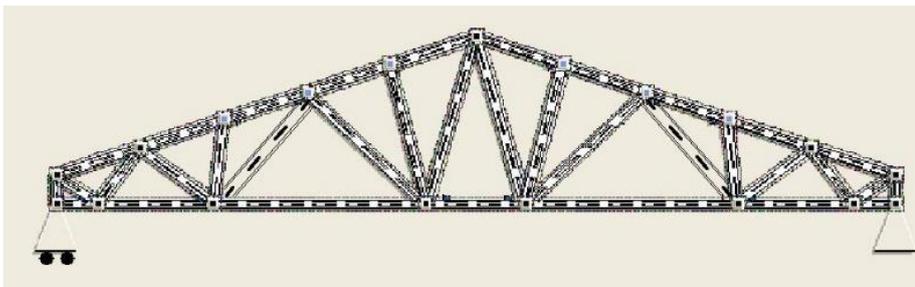
**BEMESSUNGSBEISPIEL 13 - Fachwerkträger aus kaltverfestigtem Material unter kombinierter Druck- und Biegebeanspruchung mit 30 Minuten Feuerwiderstand**

Ein Fachwerkträger bestehend aus Quadrat- und Rechteckhohlprofilen aus austenitischem nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4301 trägt eine Dachverglasung. Es wird ein Vergleich durchgeführt zwischen zwei verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Festigkeiten – ein Material im geglühten Zustand ( $f_y = 210 \text{ N/mm}^2$ ) und eines im kaltverfestigtem Zustand (CP500,  $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$ ). Die Bemessung erfolgt für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und für die Tragfähigkeit unter einer 30-minütigen Brandbeanspruchung. Die Abminderungsfaktoren für die mechanischen Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen für das kaltverfestigte Material CP500 wurden nach Kapitel 8.2 berechnet.

Die statische Berechnung wurde mit Hilfe des FE-Programms WINRAMI durchgeführt, welches durch die „Finnish Constructional Steelwork Association“ (FCSA) ([www.terasrakennedydistys.fi](http://www.terasrakennedydistys.fi)) verkauft wird. Die WINRAMI Datenbank enthält Quadrat-, Rechteck- und Rundhohlprofile für eine Berechnung mit nichtrostenden Stählen. WINRAMI kann Schnittgrößen sowie Verformungen berechnen und Querschnittsnachweise bei Raumtemperatur, eine Bemessung bei Brandbeanspruchung und Anschlussnachweise bei Raumtemperatur durchführen. (Außerdem werden alle geometrischen Randbedingungen von Fachwerkträgern überprüft) In diesem Beispiel werden die Gurte als durchgehende Träger und die Diagonalen als gelenkig angeschlossen simuliert. Nach EN 1993-1-1 können die Knicklängen für die Gurte und die Diagonalen mit dem 0,9-fachen bzw. 0,75-fachen Knotenabstand angenommen werden. In diesem Beispiel werden auf der sicheren Seite liegend die Knotenabstände für die Knicklängen angenommen. Die Schnittgrößen wurden mit Bauteilabmessungen die dem geglühten Zustand entsprechen mit dem Programm WINRAMI berechnet. Diese Schnittgrößen werden für die Berechnung in beiden Zustände, geglüht und kaltverfestigt, verwendet.

Dieses Beispiel konzentriert sich auf die Überprüfung von 3 Bauteilen: Untergurte, die überwiegend durch Zugnormalkräfte beansprucht werden (Element 0), Diagonalen, die durch eine Drucknormalkraft beansprucht werden (Element 31) und Obergurte, die durch eine kombinierte Beanspruchung aus Drucknormalkraft und Biegung beansprucht werden (Element 5). Das Gewicht der Träger wird auch verglichen.

Die geschweißten Anschlüsse sollten nach Kapitel 7.4 bemessen werden. Diese Bemessung ist jedoch nicht in diesem Beispiel enthalten.



**geglüht:** Untergurt: 100x60x4, Obergurt: 80x80x5, Randvertikale: 60x60x5 Diagonalen von links bis zur Mitte: 50x50x3, 50x50x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3, 40x40x3.

**CP500:** Untergurt: 60x40x4, Obergurt 70x70x4, Randvertikale: 60x60x5, alle Diagonalen: 40x40x3.

Stützweite 15 m, Höhe in der Mitte 3,13 m, Höhe am Rand 0,5 m.  
 Gewicht der Fachwerkträger: geblüht: 407 kg, CP500: 307 kg. Das Gewicht ist nicht vollständig optimiert.

**Einwirkungen**

Folgende Lasten werden für die Fachwerkstruktur angenommen: gleichmäßig verteilte Schneelast, Lasten aus der Dachkonstruktion (inkl. Verglasung) und Eigengewicht der Träger.

Ständige Lasten (G): Glas und Konstruktion 1 kN/m<sup>2</sup>  
 Eigengewicht Träger (aus WINRAMI)

Veränderliche Lasten (Q): Schneelast 2 kN/m<sup>2</sup>

Lastfallkombination 1 (Grenzzustand der Tragfähigkeit):  $\sum_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}$

EN 1990

Lastfallkombination 2 (Brandschutzbemessung):  $\sum_j \gamma_{GA,j} G_{k,j} + \gamma_{\psi 1,1} Q_{k,1}$

Grenzzustand der Tragfähigkeit (Raumtemperatur)	Brandschutzbemessung
$\gamma_{G,j} = 1,35$ (ungünstig)	$\gamma_{GA,j} = 1,0$
$\gamma_{Q,1} = 1,5$	$\gamma_{\psi 1,1} = 0,2$

EN 1990  
 EN 1991-1-2

(Die empfohlenen Teilsicherheitsbeiwerte für Lasten werden in diesem Beispiel berücksichtigt.)

Bemessungslasten im Grenzzustand der Tragfähigkeit:

Ständige Lasten: Knotenlasten: 1,35 x 4,1 kN  
 Eigengewicht der Träger: (enthalten in WINRAMI)

Veränderliche Lasten Schneelast: 1,5 x 8,1 kN

**Schnittgrößen der maßgebenden Bauteile**

Die Schnittkräfte wurden mit Profilen im geblühten Zustand am Model ermittelt.

**Untergurt, Element 0**

geblüht: 100x60x4 mm,	CP500: 60x40x4 mm
$N_{t,Ed} = 142,2$ kN,	$N_{t,fi,Ed} = 46,9$ kN
$M_{max,Ed} = 0,672$ kNm,	$M_{max,fire,Ed} = 0,245$ kNm

**Obergurt, Element 5**

geblüht: 80x80x5 mm,	CP500: 70x70x4 mm
$N_{c,Ed} = -149,1$ kN,	$N_{c,fire,Ed} = -49,2$ kN
$M_{max,Ed} = 2,149$ kNm,	$M_{max,fire,Ed} = 0,731$ kNm

**Diagonale, Element 31**

geblüht: 50x50x3mm,	CP500: 40x40x3 mm
$N_{c,Ed} = -65,9$ kN,	$N_{c,fire,Ed} = -21,7$ kN

**Materialeigenschaften**

Es wird austenitischer nichtrostender Stahl der Sorte 1.4301 verwendet.

<b>geblüht:</b> $f_y = 210$ N/mm <sup>2</sup>	$f_u = 520$ N/mm <sup>2</sup>	$E = 200000$ N/mm <sup>2</sup>
<b>CP500:</b> $f_y = 460$ N/mm <sup>2</sup>	$f_u = 650$ N/mm <sup>2</sup>	$E = 200000$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 2.2  
 Tabelle 2.3

**Teilsicherheitsbeiwerte**

Die folgenden Teilsicherheitsbeiwerte wurden in diesem Bemessungsbeispiel berücksichtigt:

$$\gamma_{M0} = 1,1, \gamma_{M1} = 1,1, \gamma_{M,fi} = 1,0$$

**Querschnittswerte: geglüht**

Element 0:	$A = 1175 \text{ mm}^2$			$W_{pl,y} = 37,93 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Element 5:	$A = 1436 \text{ mm}^2$	$I_y = 131,44 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$i_y = 30,3 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 39,74 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Element 31:	$A = 541 \text{ mm}^2$	$I_y = 19,47 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$i_y = 19 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 9,39 \times 10^3 \text{ mm}^3$

**Querschnittswerte: CP500**

Element 0:	$A = 695 \text{ mm}^2$			$W_{pl,y} = 13,16 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Element 5:	$A = 1015 \text{ mm}^2$	$I_y = 72,12 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$i_y = 26,7 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 24,76 \times 10^3 \text{ mm}^3$
Element 31:	$A = 421 \text{ mm}^2$	$I_y = 9,32 \times 10^4 \text{ mm}^4$	$i_y = 14,9 \text{ mm}$	$W_{pl,y} = 5,72 \times 10^3 \text{ mm}^3$

**Querschnittsklassifizierung der Elemente 5 und 31**

geglüht :	$\varepsilon = 1,03$	CP500 : $\varepsilon = 0,698$
geglüht 80x80x5 :	$c = 80 - 15 = 65 \text{ mm}$	CP500 70x70x4 : $c = 70 - 12 = 58 \text{ mm}$
geglüht 50x50x3 :	$c = 50 - 9 = 41 \text{ mm}$	CP500 40x40x3 : $c = 40 - 9 = 31 \text{ mm}$

Flansch/Steg druckbeansprucht:

geglüht 80x80x5 :	$c/t = 13$	CP500 70x70x4 : $c/t = 14,5$
geglüht 50x50x3 :	$c/t = 13,7$	CP500 40x40x3 : $c/t = 10,3$

Für Klasse 1 gilt:  $\frac{c}{t} \leq 33,0\varepsilon$ , beide Profile werden Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

**UNTERGURT, BEMESSUNG BEI RAUMTEMPERATUR UND BEI BRAND****A) Raumtemperatur****Tragfähigkeit des Querschnitts unter Zugbeanspruchung**

$$N_{pl,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0}$$

geglüht:  $N_{pl,Rd} = 1175 \times 210 / 1,1 = 224,3 \text{ kN} > 142,2 \text{ kN OK.}$

CP500 :  $N_{pl,Rd} = 695 \times 460 / 1,1 = 290,6 \text{ kN} > 142,2 \text{ kN OK.}$

**Momententragfähigkeit des Querschnitts**

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0}$$

geglüht :  $M_{c,Rd} = \frac{37,93 \times 10^3 \times 210}{1,1 \times 10^6} = 7,24 \text{ kNm} > 0,672 \text{ kNm OK.}$

CP500 :  $M_{c,Rd} = \frac{13,16 \times 10^3 \times 460}{1,1 \times 10^6} = 5,50 \text{ kNm} > 0,672 \text{ kNm OK.}$

Tabelle 4.1  
und Kapitel  
8.1

Tabelle 5.2

Tabelle 5.2

(Element 0)

Kapitel 5.7.2

Gl. 5.23

Kapitel 5.7.4

Gl. 5.29

**Interaktion zwischen Zugnormalkraft und Biegung**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

Gl. 6.55

geglüht:  $\frac{142,2}{224,3} + \frac{0,672}{7,24} = 0,73 \leq 1$  OK.

CP500:  $\frac{142,2}{290,6} + \frac{0,672}{5,50} = 0,61 \leq 1$  OK.

**B) Brandbeanspruchung**

$\epsilon_{res} = 0,4$

Stahltemperatur für RHP 100x60x4 nach 30-minütigem Brand

mit  $A_m/V = 275 \text{ m}^{-1}$ :  $\theta = 833 \text{ °C}$

Stahltemperatur für RHP 60x40x4 nach 30-minütigem Brand

mit  $A_m/V = 290 \text{ m}^{-1}$ :  $\theta = 834 \text{ °C}$

Auf der sicheren Seite liegend wird  $\theta = 834 \text{ °C}$  angesetzt.

Kapitel 8.4.4

**Geglüht:**

Die Werte für die Abminderungsbeiwerte bei  $834 \text{ °C}$  wurden linear interpoliert:

$k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y = 0,292$ , aber  $f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$

$k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u = 0,209$

$f_{2,\theta} = 0,292 \times 210 = 61,3$  und  $f_{u,\theta} = 0,209 \times 520 = 108,7$ , somit  $f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$

**CP500:**

Für Material im kaltverfestigten Zustand mit  $\theta \geq 800 \text{ °C}$ :

$k_{2,\theta,CF} = f_{2,\theta,CF}/f_y = 0,9k_{2,\theta} = 0,9f_{2,\theta}/f_y = 0,9 \times 0,292 = 0,263$ , aber  $f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$

$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} = f_{u,\theta,CF}/f_u = 0,209$

$f_{2,\theta,CF} = 0,263 \times 460 = 121,0$  und  $f_{u,\theta,CF} = 0,209 \times 650 = 135,9$ , somit  $f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$

Kapitel 8.2  
Tabelle 8.1

Kapitel 8.2  
Tabelle 8.1

**Tragfähigkeit des Querschnitts unter Zugbeanspruchung**

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

Gl. 8.8

geglüht:  $N_{fi,\theta,Rd} = 0,292 \times 224,3 \times 1,1/1,0 = 72,0 \text{ kN} > 46,9 \text{ kN}$  OK.

CP500:  $N_{fi,\theta,Rd} = 0,263 \times 290,6 \times 1,1/1,0 = 84,1 \text{ kN} > 46,9 \text{ kN}$  OK.

**Momententragfähigkeit des Querschnitts**

$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} M_{Rd} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}]$

Gl. 8.15

geglüht:  $M_{fi,\theta,Rd} = 0,292 \times 7,24 \times 1,1/1,0 = 2,33 \text{ kNm} > 0,245 \text{ kNm}$  OK.

CP500:  $M_{fi,\theta,Rd} = 0,263 \times 5,50 \times 1,1/1,0 = 1,59 \text{ kNm} > 0,245 \text{ kNm}$  OK.

**Interaktion zwischen Zugnormalkraft und Biegung**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \leq 1$$

geglüht:  $\frac{46,9}{72,0} + \frac{0,245}{2,33} = 0,75 \leq 1$  OK

CP500:  $\frac{46,9}{84,1} + \frac{0,245}{1,59} = 0,71 \leq 1$  OK.

Gl. 6.55

**DIGONALE, BEMESSUNG BEI RAUMTEMPERATUR UND BEI BRAND**

(Element 31)

Knicklänge = 1253 mm

**A) Raumtemperatur**

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}$$

Gl. 6.2

geglüht:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1253}{19} \frac{1}{\pi} \sqrt{(210 / 200000)} = 0,680$$

Gl. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,680 - 0,3) + 0,680^2) = 0,824$$

Gl. 6.5  
Tabelle 6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \lambda^2)}} = \frac{1}{0,824 + \sqrt{(0,824^2 - 0,680^2)}} = 0,776$$

Gl. 6.4

$$N_{b,Rd} = 0,776 \times 541 \times 210 / 1,1 = 80,1 \text{ kN} > 65,9 \text{ kN} \text{ OK.}$$

**CP500:**

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1253}{14,9} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(460 / 200000)} = 1,284$$

Gl. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (1,284 - 0,3) + 1,284^2) = 1,565$$

Gl. 6.5  
Tabelle 6.1

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \lambda^2)}} = \frac{1}{1,565 + \sqrt{(1,565^2 - 1,284^2)}} = 0,407$$

Gl. 6.4

$$N_{b,Rd} = 0,407 \times 421 \times 460 / 1,1 = 71,7 \text{ kN} > 65,9 \text{ kN} \text{ OK.}$$

**B) Brandbeanspruchung**

$$\varepsilon_{res} = 0,4$$

Kapitel 8.4.4

Stahltemperatur für QHP 80x80x5 nach 30-minütigem Brand

mit  $A_m/V = 220 \text{ m}^{-1}$ :  $\theta = 830 \text{ °C}$ 

Stahltemperatur für QHP 70x70x5 nach 30-minütigem Brand

mit  $A_m/V = 225 \text{ m}^{-1}$ :  $\theta = 831 \text{ °C}$ Auf der sicheren Seite liegend wird  $\theta = 831 \text{ °C}$  angesetzt.

geglüht:

Die Werte für die Abminderungsbeiwerte bei 831 °C wurden linear interpoliert:

$$k_{p0,2,\theta} = 0,219 \text{ und } k_{E,\theta} = 0,574$$

Kapitel 8.2  
Tabelle 8.1

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 1,03 \times \left[ \frac{0,574}{0,219} \right]^{0,5} = 1,67$$

Für Klasse 1 gilt:  $c/t \leq 33,0 \varepsilon_{\theta} = 33,0 \times 1,67 = 55,1$ .

$c/t = 13$ , das Profil wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

**CP500:**

Für Material im kaltverfestigten Zustand mit  $\theta \geq 800 \text{ °C}$ :

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8k_{p0,2,\theta} = 0,8 \times 0,219 = 0,175$$

$$k_{E,\theta,CF} = k_{E,\theta} = 0,574$$

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{0,5} = 0,698 \times \left[ \frac{0,574}{0,175} \right]^{0,5} = 1,26$$

Für Klasse 1 gilt:  $c/t \leq 33,0 \varepsilon_{\theta} = 33,0 \times 1,26 = 41,6$ .

$c/t = 14,5$ ; das Profil wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{p0,2,\theta} f_y / \gamma_{M,fi}$ , da beide Profile der Querschnittsklasse 1 zugeordnet sind.

**geglüht :**

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,\theta} / k_{E,\theta})} = 0,680 \times \sqrt{(0,219 / 0,574)} = 0,420$$

$$\phi_{\theta} = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,420 - 0,3) + 0,420^2) = 0,618$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{(\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2)}} = \frac{1}{0,618 + \sqrt{(0,618^2 - 0,420^2)}} = 0,933$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,933 \times 541 \times 0,219 \times 210 / 1,0 = 23,2 \text{ kN} > 21,7 \text{ kN OK.}$$

**CP500 :**

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,\theta,CF} / k_{E,\theta,CF})} = 1,284 \times \sqrt{(0,175 / 0,574)} = 0,709$$

$$\phi_{\theta} = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_{\theta}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,709 - 0,3) + 0,709^2) = 0,852$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_{\theta} + \sqrt{(\phi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2)}} = \frac{1}{0,852 + \sqrt{(0,852^2 - 0,709^2)}} = 0,755$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = 0,755 \times 421 \times 0,175 \times 460 / 1,0 = 25,6 \text{ kN} > 21,7 \text{ kN OK.}$$

Kapitel 8.3.2

Gl. 8.6

Kapitel 8.2  
Tabelle 8.1

Kapitel 8.3.2

Gl. 8.6

Gl. 8.10

Gl. 8.14

Gl. 8.13

Gl. 8.12

Gl. 8.14

Gl. 8.13

Gl. 8.12

**UNTERGURT, BEMESSUNG BEI RAUMTEMPERATUR UND BEI BRAND**

(Element 5)

Knicklänge = 1536 mm

**A) Raumtemperatur**

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1,0$$

Gl. 6.56

**geglüht :**

$\beta_{W,y} = 1,0$  für Querschnittsklasse 1

Kapitel. 6.5.2

$k_y = 1 + D_1(\bar{\lambda}_y - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}$ , aber  $k_y \leq 1 + D_1(D_3 - D_2)N_{Ed}/N_{b,Rd,y}$

Gl. 6.63

mit:  $D_1 = 2,0$ ,  $D_2 = 0,3$  und  $D_3 = 1,3$ .

Tabelle 6.6

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1536}{30,3} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(210 / 200000)} = 0,523$$

Gl. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,523 - 0,3) + 0,523^2) = 0,691$$

Gl. 6.5

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \lambda^2)}} = \frac{1}{0,691 + \sqrt{(0,691^2 - 0,523^2)}} = 0,875$$

Gl. 6.4

$N_{b,Rd,y} = 0,875 \times 1436 \times 210 / 1,1 = 239,9$  kN > 149,1 kN

Gl. 6.2

$k_y = 1,0 + 2,0 \times (0,523 - 0,30) \times 149,1 / 239,9 = 1,277$

Tabelle 6.6

$k_y \leq 1,0 + 2,0 \times (1,3 - 0,30) \times 149,1 / 239,9 = 2,243$ , somit  $k_y = 1,277$

$$\frac{149,1}{239,9} + 1,277 \times \left( \frac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 39,74 \times 10^3 \times 210 / 1,1} \right) = 0,98 < 1,0 \text{ OK.}$$

Gl. 6.56

**CP500**

$\beta_{W,y} = 1,0$  für Querschnittsklasse 1

Kapitel 6.5.2

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{(f_y / E)} = \frac{1536}{26,7} \times \frac{1}{\pi} \times \sqrt{(460 / 200000)} = 0,878$$

Gl. 6.6

$$\phi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,878 - 0,3) + 0,878^2) = 1,027$$

Gl. 6.5

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{(\phi^2 - \lambda^2)}} = \frac{1}{1,027 + \sqrt{(1,027^2 - 0,878^2)}} = 0,641$$

Gl. 6.4

$N_{b,Rd,y} = 0,641 \times 1015 \times 460 / 1,1 = 272,1$  kN > 149,1 kN

Gl. 6.2

$k_y = 1,0 + 2 \times (0,878 - 0,30) \times 149,1 / 272,1 = 1,633$

Tabelle 6.6

$k_y \leq 1,0 + 2,0 \times (1,3 - 0,30) \times 149,1 / 272,1 = 2,096$ , somit  $k_y = 1,633$

$$\frac{149,1}{272,1} + 1,633 \times \left( \frac{2,149 \times 1000^2}{1,0 \times 24,76 \times 10^3 \times 460 / 1,1} \right) = 0,89 < 1,0 \text{ OK.}$$

Gl. 6.56

**B) Brandbeanspruchung**

$\epsilon_{res} = 0,4$

Kapitel 8.4.4

Stahltemperatur für QHP 50x50x3 nach 30-minütigem Brand mit  $A_m/V = 370$  m<sup>-1</sup>:  $\theta = 836$  °C

Stahltemperatur für QHP 40x40x3 nach 30-minütigem Brand mit  $A_m/V = 380$  m<sup>-1</sup>:  $\theta = 836$  °C

**geglüht:**

Die Werte für die Abminderungsbeiwerte bei 836 °C wurden linear interpoliert:

$$k_{p0,2,\theta} = 0,214$$

$$k_{2,\theta} = f_{2,\theta}/f_y = 0,289, \text{ aber } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{u,\theta} = f_{u,\theta}/f_u = 0,207$$

$$f_{2,\theta} = 0,289 \times 210 = 60,7 \text{ und } f_{u,\theta} = 0,207 \times 520 = 107,6, \text{ somit } f_{2,\theta} \leq f_{u,\theta}$$

$$k_{E,\theta} = 0,565$$

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{-0,5} = 1,03 \times \left[ \frac{0,565}{0,214} \right]^{-0,5} = 1,67$$

Für Querschnittsklasse 1 gilt:  $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,67 = 55,1$ .

$c/t = 13,7$ , das Profil wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

**CP500:**

Für Material im kaltgeformten Zustand mit  $\theta \geq 800$  °C:

$$k_{p0,2,\theta,CF} = 0,8 k_{p0,2,\theta} = 0,8 \times 0,214 = 0,171$$

$$k_{2,\theta,CF} = f_{2,\theta,CF}/f_y = 0,9 k_{2,\theta} = 0,9 f_{2,\theta}/f_y = 0,9 \times 0,289 = 0,260, \text{ aber } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{u,\theta,CF} = k_{u,\theta} = f_{u,\theta,CF}/f_u = 0,207$$

$$f_{2,\theta,CF} = 0,260 \times 460 = 94,8 \text{ und } f_{u,\theta,CF} = 0,207 \times 650 = 134,6, \text{ somit } f_{2,\theta,CF} \leq f_{u,\theta,CF}$$

$$k_{E,\theta,CF} = k_{E,\theta} = 0,565$$

**Querschnittsklassifizierung**

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \left[ \frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}} \right]^{-0,5} = 0,698 \times \left[ \frac{0,565}{0,171} \right]^{-0,5} = 1,27$$

Für Querschnittsklasse 1 gilt:  $c/t \leq 33,0 \varepsilon_\theta = 33,0 \times 1,27 = 41,9$ .

$c/t = 10,3 < 41,9$ , das Profil wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} \leq 1,0, \text{ da beide Profile der Klasse 1 zugeordnet sind.}$$

Kapitel 8.2  
Tabelle 8.1

Kapitel 8.3.2

Gl. 8.6

Kapitel 8.2  
Tabelle 8.1

Kapitel 8.3.2

Gl. 8.6

Gl. 8.26

**geglüht:**

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,0} / k_{E,\theta})} = 0,523 \times \sqrt{(0,214 / 0,565)} = 0,322$$

Gl. 8.14

$$\phi_0 = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_0 - \bar{\lambda}_\theta) + \bar{\lambda}_0^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,322 - 0,3) + 0,322^2) = 0,557$$

Gl. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{(\phi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2)}} = \frac{1}{0,557 + \sqrt{(0,557^2 - 0,322^2)}} = 0,989$$

Gl. 8.12

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A_g k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 3$$

Gl. 8.30

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

Gl. 8.31

$$\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi} = 0,989 \times 1436 \times 0,214 \times 210 / 1,0 = 63,8 \text{ kN} > 49,2 \text{ kN OK.}$$

Gl. 8.26

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} = 0,289 \times 1,1 / 1,0 \times 39,74 \times 10^3 \times 210 / 1000^2 = 2,65 \text{ kNm}$$

> 0,731 kNm OK.

Gl. 8.15

$$\psi = -0,487 / 0,731 = -0,666$$

Tabelle 8.3

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7\psi = 2,266$$

$$\mu_y = (1,2 \times 2,266 - 3) \times 0,322 + 0,44 \times 2,266 - 0,29 = 0,617 < 0,8$$

$$k_y = 1 - 0,617 \times 49,2 \text{ kN} / 63,8 \text{ kN} = 0,524 < 3$$

$$\frac{49,2}{63,8} + 0,524 \times \frac{0,731}{2,65} = 0,92 < 1,0 \quad \text{OK.}$$

**CP500 :**

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \sqrt{(k_{p0,2,0} / k_{E,\theta})} = 0,878 \times \sqrt{(0,171 / 0,565)} = 0,483$$

Gl. 8.14

$$\phi_0 = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda}_0 - \bar{\lambda}_\theta) + \bar{\lambda}_0^2) = 0,5 \times (1 + 0,49 \times (0,483 - 0,3) + 0,483^2) = 0,661$$

Gl. 8.13

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\phi_0 + \sqrt{(\phi_0^2 - \bar{\lambda}_0^2)}} = \frac{1}{0,661 + \sqrt{(0,661^2 - 0,483^2)}} = 0,899$$

Gl. 8.12

$$\chi_{min,fi} A_g k_{p0,2,0} f_y / \gamma_{M,fi} = 0,899 \times 1015 \times 0,171 \times 460 / 1,0 = 71,8 \text{ kN} > 49,2 \text{ kN OK.}$$

Gl. 8.26

$$M_{y,fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} [\gamma_{M0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} = 0,260 \times 1,1 / 1,0 \times 24,76 \times 10^3 \times 460 / 1000^2 = 3,26 \text{ kNm}$$

> 0,731 kNm OK.

Gl. 8.15

$$\psi = -0,487 / 0,731 = -0,666$$

Tabelle 8.3

$$\beta_{M,y} = 1,8 - 0,7\psi = 2,266$$

$$\mu_y = (1,2 \times 2,266 - 3) \times 0,483 + 0,44 \times 2,266 - 0,29 = 0,571 \leq 0,8$$

$$k_y = 1 - 0,571 \times 49,2 / 71,8 = 0,609$$

$$\frac{49,2}{71,8} + 0,609 \times \frac{0,731}{3,26} = 0,82 < 1,0 \quad \text{OK.}$$



<b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b>  <b>BERECHNUNGSVORLAGE</b>	Blatt 1 von 3													
	Titel	Bemessungsbeispiel 14 – Bestimmung der erhöhten Streckgrenze eines kaltgewalzten quadratischen Hohlprofils nach Anhang B der „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“												
	Auftraggeber	Research Fund for Coal and Steel	<table border="1"> <tr> <td>Erstellt</td> <td>SA</td> <td>Datum</td> <td>05/17</td> </tr> <tr> <td>Bearbeitet</td> <td>FW</td> <td>Datum</td> <td>05/17</td> </tr> <tr> <td>Bearbeitet</td> <td>LG</td> <td>Datum</td> <td>05/17</td> </tr> </table>	Erstellt	SA	Datum	05/17	Bearbeitet	FW	Datum	05/17	Bearbeitet	LG	Datum
Erstellt	SA	Datum	05/17											
Bearbeitet	FW	Datum	05/17											
Bearbeitet	LG	Datum	05/17											

<p><b>BEMESSUNGSBEISPIEL 14</b> – Bestimmung der erhöhten Streckgrenze eines kaltgewalzten quadratischen Hohlprofils nach Anhang B der „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“</p> <p>In diesem Beispiel wird die erhöhte, mittlere Streckgrenze <math>f_{ya}</math> eines kaltgewalzten quadratischen Hohlprofils (QHP) gemäß dem Verfahren nach Anhang B bestimmt. Die Berechnungen werden mit einem QHP 80×80×4 aus austenitischem nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4301 geführt. Die Biegetragfähigkeit wird sowohl mit der Mindeststreckgrenze <math>f_y</math> als auch mit der erhöhten, mittleren Streckgrenze <math>f_{ya}</math> berechnet und dann verglichen.</p> <p><b>Erhöhte, mittlere Streckgrenze</b></p> <p>Für kaltgewalzte Hohlprofile (RHP und QHP) aus nichtrostendem Stahl ergibt sich die erhöhte, mittlere Streckgrenze <math>f_{ya}</math> zu:</p> $f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}$ <p><b>Querschnittswerte</b></p> <p>Geometrische Werte eines QHP 80×80×4 (aus Versuchen):</p> <p><math>h = 79,9 \text{ mm}</math>                      <math>b = 79,6 \text{ mm}</math>  <math>t = 3,75 \text{ mm}</math>                        <math>A = 1099 \text{ mm}^2</math>  <math>W_{el} = 25967 \text{ mm}^3</math>                <math>W_{pl} = 30860 \text{ mm}^3</math>  <math>r_i = 4,40 \text{ mm}</math> (<math>r_i</math> kann, falls nicht bekannt, mit <math>2t</math> angenommen werden)</p> $A_{c,rolled} = \left( n_c \pi \frac{t}{4} \right) (2r_i + t) + 4n_c t^2$ $A_{c,rolled} = \left( 4 \times \pi \times \frac{3,75}{4} \right) \times (2 \times 4,40 + 3,75) + 4 \times 4 \times 3,75^2 = 373 \text{ mm}^2$ <p><b>Materialeigenschaften</b></p> <p><math>f_y = 230 \text{ N/mm}^2</math> und <math>f_u = 540 \text{ N/mm}^2</math> (für kaltgewalzte Bleche mit <math>t \leq 8 \text{ mm}</math>)  <math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math>  <math>\epsilon_{p0,2} = 0,002 + f_y/E = 0,00315</math>  <math>\epsilon_u = 1 - f_y/f_u = 0,57</math></p>	<p>Gl. B.2</p> <p>Anhang B</p> <p>Gl. B.14</p> <p>Tabelle 2.2</p> <p>Kapitel 2.3.1</p> <p>Gl. B.10</p> <p>Gl. C.6</p>
---	---

**Erhöhte Streckgrenze in den Ecken und in den ebenen Abschnitten**

Die erhöhte, mittlere Streckgrenze der Eckbereiche  $f_{yc}$  wird wie folgt bestimmt:

$$f_{yc} = 0,85K (\varepsilon_c + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{und} \quad f_y \leq f_{yc} \leq f_u$$

Gl. B.4

Die erhöhte, mittlere Streckgrenze in den ebenen Abschnitten  $f_{yf}$  wird wie folgt bestimmt:

$$f_{yf} = 0,85K (\varepsilon_f + \varepsilon_{p0,2})^{n_p} \quad \text{und} \quad f_y \leq f_{yf} \leq f_u$$

Gl. B.5

**Plastische Verformungen durch Kaltumformung in den Ecken und in den ebenen Abschnitten**

Dehnung in den Ecken  $\varepsilon_c$ :

$$\varepsilon_c = \frac{t}{2(2r_i + t)}$$

Gl. B.7

$$\varepsilon_c = \frac{3,75}{2 \times (2 \times 4,40 + 3,75)} = 0,149$$

Dehnung in den ebenen Abschnitten  $\varepsilon_f$ :

$$\varepsilon_f = \left[ \frac{t}{900} \right] + \left[ \frac{\pi t}{2(b + h - 2t)} \right]$$

Gl. B.8

$$\varepsilon_f = \left[ \frac{3,75}{900} \right] + \left[ \frac{\pi \times 3,75}{2 \times (79,6 + 79,9 - 2 \times 3,75)} \right] = 0,043$$

**Parameter für das Materialmodell**

$$n_p = \frac{\ln(f_y/f_u)}{\ln(\varepsilon_{p0,2}/\varepsilon_u)}$$

Gl. B.12

$$n_p = \frac{\ln(230/540)}{\ln(0,00315/0,57)} = 0,164$$

$$K = \frac{f_y}{\varepsilon_{p0,2}^{n_p}}$$

Gl. B.11

$$K = \frac{230}{(0,00315)^{0,164}} = 591,6 \text{ N/mm}^2$$

**Erhöhte Streckgrenze in den Ecken und in den ebenen Abschnitten**

Die erhöhte, mittlere Streckgrenze in den Ecken  $f_{yc}$  wird wie folgt bestimmt:

Gl. B.4

$$\begin{aligned} f_{yc} &= 0,85 \times 591,6 \times (0,149 + 0,00315)^{0,164} \\ &= 369 \text{ N/mm}^2 \quad \text{und} \quad 230 \leq 369 \leq 540 \end{aligned}$$

Die erhöhte, mittlere Streckgrenze in den ebenen Abschnitten  $f_{yf}$  wird wie folgt bestimmt:

Gl. B.5

$$\begin{aligned} f_{yf} &= 0,85 \times 591,6 \times (0,043 + 0,00315)^{0,164} \\ &= 304 \text{ N/mm}^2 \quad \text{und} \quad 230 \leq 304 \leq 540 \end{aligned}$$

**Erhöhte, mittlere Streckgrenze des Querschnitts**

$$f_{ya} = \frac{f_{yc} A_{c,rolled} + f_{yf}(A - A_{c,rolled})}{A}$$

$$= \frac{369 \times 373 + 304 \times (1099 - 373)}{1099} = 326 \text{ N/mm}^2$$

Gl. B.2

**Querschnittsklassifizierung**

Die Querschnittsklassifizierung mit der Mindeststreckgrenze  $f_y$ :

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{230} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,986$$

Tabelle 5.2

$$\frac{c}{t} = \frac{(79,9 - 3 \times 3,75)}{3,75} = 18,3 < 32,5 = 33\varepsilon$$

Der Querschnitt wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

Die Querschnittsklassifizierung mit der erhöhten, mittleren Streckgrenze  $f_{ya}$ :

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5} = \left[ \frac{235}{326} \times \frac{200\,000}{210\,000} \right]^{0,5} = 0,829$$

Tabelle 5.2

$$\frac{c}{t} = \frac{(79,9 - 3 \times 3,75)}{3,75} = 18,3 < 27,4 = 33\varepsilon$$

Der Querschnitt wird der Querschnittsklasse 1 zugeordnet.

**Querschnitt unter Biegebeanspruchung**

Für Querschnitte der Klasse 1 und 2 gilt:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$$

Gl. 5.29

Querschnittstragfähigkeit mit der Mindeststreckgrenze  $f_y$ :

$$M_{c,Rd} = \frac{30860 \times 230}{1,1} = 6,45 \text{ kNm}$$

Querschnittstragfähigkeit mit der erhöhten, mittleren Streckgrenze  $f_{ya}$ :

$$M_{c,Rd} = \frac{30860 \times 326}{1,1} = 9,15 \text{ kNm}$$

Die Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung erhöht sich um 42 %, wenn eine erhöhte Festigkeit, die durch die Verfestigung beim Kaltumformen entsteht, berücksichtigt wird.

Anmerkung: Bemessungsbeispiel 15 zeigt anhand der „Continuous Strength Method“ aus Anhang D die Erhöhung der Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung, die durch den positiven Einfluss der Verfestigung im Betrieb entsteht.



<p><b>„Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steels“ (PUREST)</b></p> <p><b>BERECHNUNGSVORLAGE</b></p>	Blatt 1 von 2		
	<p><b>Titel</b> Bemessungsbeispiel 15 – Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung eines kaltgewalzten quadratischen Hohlprofils nach der „Continuous Strength Method“ gemäß Anhang D der „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“</p>		
	<p><b>Auftraggeber</b> Research Fund for Coal and Steel</p>	Erstellt SA	Datum 05/17
Bearbeitet FW		Datum 05/17	
Bearbeitet LG		Datum 05/17	

<p><b>BEMESSUNGSBEISPIEL 15 – Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung eines kaltgewalzten quadratischen Hohlprofils nach der „Continuous Strength Method“ gemäß Anhang D der „Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen“</b></p> <p>In diesem Bemessungsbeispiel wird der Bemessungswert der Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung eines kaltgewalzten QHP 80x80x4 aus austenitischem nichtrostendem Stahl der Sorte 1.4301 mit der „Continuous Strength Method“ (CSM) nach Anhang D ermittelt.</p> <p><b>Querschnittswerte</b></p> <p>Die Querschnittswerte sind Bemessungsbeispiel 14 zu entnehmen.</p> <p><b>Materialeigenschaften</b></p> <p><math>f_y = 326 \text{ N/mm}^2</math> * und <math>f_u = 540 \text{ N/mm}^2</math></p> <p><math>E = 200000 \text{ N/mm}^2</math> und <math>\nu = 0,3</math></p> <p><math>\epsilon_y = f_y/E = 0,0016</math></p> <p><math>\epsilon_u = 1 - f_y/f_u = 0,40</math></p> <p>* Um den zusätzlichen Anstieg der Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung zu veranschaulichen, der aus der CSM resultiert und der zusätzlich zu dem Anstieg entsteht, der durch die Verwendung der erhöhten, mittleren Streckgrenze des Querschnitts resultiert (Kaltverfestigung), wird die erhöhte, mittlere Streckgrenze aus Beispiel 14 als Ausgangswert verwendet. Alternativ kann auch die Mindeststreckgrenze verwendet werden.</p> <p><b>Bezogene Schlankheit des Querschnitts</b></p> $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cr,p}}}$ $f_{cr,p} = \frac{k_\sigma \pi^2 E t^2}{12(1 - \nu^2) \bar{b}^2} = \frac{4 \times \pi^2 \times 200000 \times 3,75^2}{12 \times (1 - 0,3^2) \times (79,7 - 2(3,75 + 4,40))^2} = 2530 \text{ N/mm}^2$ $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{326}{2530}} = 0,36 (< 0,68)$	<p>Tabelle 2.2</p> <p>Kapitel 2.3.1</p> <p>Gl. C.6</p> <p>D.3.2</p> <p>Gl. D.4 und Tabelle 5.3</p>
---	--

**Verformungsgrenze des Querschnitts**

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} \leq \min\left(15, \frac{C_1 \epsilon_u}{\epsilon_y}\right) \quad \text{für } \bar{\lambda}_p \leq 0,68$$

Gl. D.2

Nach Tabelle D.1 gilt:  $C_1 = 0.1$  für austenitische nichtrostende Stähle.

Tabelle D.1

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \frac{0,25}{0,36^{3,6}} = 9,9 \leq \min\left(15, \frac{0,1 \times 0,40}{0,0016} = 25\right)$$

$$\Rightarrow \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = 9,9$$

**Steigung Verfestigung**

Nach Tabelle D.1 gilt:  $C_2 = 0,16$  für austenitische nichtrostende Stähle.

Tabelle D.1

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{C_2 \epsilon_u - \epsilon_y} = \frac{540 - 326}{0,16 \times 0,40 - 0,0016} = 3429 \text{ N/mm}^2$$

Gl. D.1

**Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung**

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \left[ 1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left( \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) - \left( 1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left( \frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^\alpha \right]$$

Gl. D.9

$\alpha = 2,0$  für QHP

Tabelle D.2

$$M_{c,Rd} = M_{csm,Rd} = \frac{30860 \times 326}{1,1} \times \left[ 1 + \frac{3429}{200000} \times \frac{25967}{30860} \times (9,9 - 1) - \left( 1 - \frac{25967}{30860} \right) / (9,9)^{2,0} \right]$$

$$M_{c,Rd} = 10,31 \text{ kNm}$$

Die nach Kapitel 5 bestimmte Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung beträgt 6,45 kNm. Mit der Berücksichtigung der Verfestigung anhand einer erhöhten, mittleren Streckgrenze (Kaltverfestigung) aus Beispiel 14 beträgt die Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung bereits 9,15 kNm. Mit dem zusätzlichen Anstieg durch die Verfestigung im Betrieb, berechnet mit der CSM, kann die Querschnittstragfähigkeit unter Biegebeanspruchung auf 10,31 kNm gesteigert werden. Bezogen auf den ersten Wert entspricht dies einer Erhöhung von ca. 60%.





Informationsstelle Edelstahl Rostfrei  
Postfach 102205  
40013 Düsseldorf  
[www.edelstahl-rostfrei.de](http://www.edelstahl-rostfrei.de)

