DOI: 10.1002/stab.201820584

Nichtrostender Stahl im Bauwesen – Bemessung von Stahltragwerken aus nichtrostendem Stahl nach DIN EN 1993-1-4

Natalie Stranghöner
Nancy Baddoo
Sebastian Stehr

Tragwerke aus nichtrostendem Stahl kommen mehr und mehr zum Einsatz. Die aktuelle Bemessungsnorm zu nichtrostenden Stählen der Eurocode 3-Familie, DIN EN 1993-1-4, kann nun, nachdem auch der Nationale Anhang hierzu letztes Jahr veröffentlicht wurde, angewendet werden. In diesem Zusammenhang wurden im Rahmen des europäischen RFCS-Dissemination Projekts PUREST die Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen aktualisiert und stehen den Anwendern zusammen mit einer Kommentierung, online nutzbarer Bemessungssoftware sowie einem Webinar als Hilfestellungen zur kostenlosen Verfügung. Diese Hilfestellungen liefern Erläuterungen und ermöglichen den Ingenieuren aus der Praxis ein größeres Verständnis der Anwendungs- und Ausführungsregeln zur Auslegung und Konstruktion von Tragwerken aus nichtrostendem Stahl.

Stichworte: Nichtrostender Stahl; DIN EN 1993-1-4; Bemessungshilfen; Werkstoffauswahl; abZ Z-30.3-6

Normative Grundlage

Die Bemessung und Ausführung von Tragwerken aus nichtrostendem Stahl kann seit 2017 nach Eurocode 3 mit der überarbeiteten DIN EN 1993-1-4 [1] und dem zugehörigen nationalen Anhang DIN EN 1993-1-4/NA [2] geführt werden. Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung abZ Z-30.3-6 wurde in diesem Zusammenhang ebenfalls überarbeitet [3], die in ihren wesentlichen Teilen zur Bemessung und Ausführung auf DIN EN 1993-1-4 und DIN EN 1090-2 [4] verweist und weiterführende Regelungen spezifiziert. Die Anwendung der DIN EN 1993-1-4 und ihres zugehörigen Nationalen Anhangs DIN EN 1993-1-4/NA befindet sich allerdings zur Zeit noch in einer „Grauzone“, da die aktuelle Ausgabe der DIN EN 1993-1-4 über die Muster-Liste der Technischen Baustimmungen (MLTB) [5] derzeit in Deutschland noch nicht bauaufsichtlich eingeführt ist. Damit gilt formal noch die ehemalige – zwar an das EN-Normenpaket angepasste – bauaufsichtliche Zulassung abZ Z-30.3-6 in ihrer Ausgabe von April 2014 [6].

Die aktuelle Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) [7] berücksichtigt jetzt sowohl die aktuelle DIN EN 1993-1-4 als auch ihren zugehörigen Nationalen Anhang, womit beide als Technische Baubestimmungen anerkannt sind, allerdings ist sie noch nicht formal in den Ländern bauaufsichtlich eingeführt. Infolge der daraus resultierenden „Grauzone“ – einerseits formal noch nicht bauaufsichtlich eingeführt, da noch die MLTB gilt, andererseits aber als Technische Baubestimmung über die MVV TB anerkannt – kann im Einzelfall geprüft werden, ob die Regelungen der DIN EN 1993-1-4 in Kombination mit ihrem Nationalen Anhang und der ab Z-30.3-6 in ihrer neuesten Ausgabe angewendet werden können. Dies bedarf der Zustimmung der zuständigen Bauaufsichtsbehörde. Gemäß [8] ist allerdings davon auszugehen, dass die Länder keine Bedenken haben, wenn die MVV TB bereits angewendet wird. Aus technischer Sicht ist dies durchaus zu begrüßen.

Die europäische Normenregelung für Stahlkonstruktionen aus nichtrostendem Stahl hat sich im Verlauf der letzten 20 Jahre stetig (weiter)entwickelt. Als im Jahr 2006 der Eurocode 3: Teil 1–4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen [9] veröffentlicht wurde, war dies die erste europäische Bemessungsnorm für nichtrostenden Stahl und gleichzeitig auch die weltweit einzige Bemessungsnorm, die warmgewalzte, geschweißte und kaltgeformte Produkte sowie die Bemessung für den Brandfall behandelte. DIN EN 1993-1-4 [9] war vergleichsweise kurz und enthielt ausschließlich ergänzende Regeln für solche Aspekte, für die die Regeln für Baustahl nicht anwendbar sind. Dies ist das Prinzip der Eurocode 3-Familie und gilt auch noch heute.

An einigen Stellen waren die Regeln der „alten“ DIN EN 1993-1-4 aus dem Jahr 2007 [9] aufgrund der wenigen verfügbaren Versuchsdaten sehr konservativ und/oder begrenzt [10]. Allerdings wurden Konstruktionen aus nichtrostendem Stahl in den letzten 10 bis 20 Jahren sowohl in Europa als auch weltweit deutlich öfter untersucht, wodurch viele wertvolle Informationen zusammengetragen wurden. Heutzutage ist die internationale Datenbank über Versuche an Konstruktionen aus nichtrostendem Stahl dreimal so groß wie zu der Zeit, als die ursprünglichen Regeln für nichtrostenden Stahl im Eurocode verfasst wurden. Aufgrund der Verfügbarkeit dieser neuen Forschungsergebnisse war es möglich, die Regeln der Ursprungsversion der DIN EN 1993-1-4 aus dem Jahr 2007 zu verbessern und in einer Revision im Jahre 2015 [1] zu veröffentlichen. Diese neuen Regeln ermöglichen u. a. eine weniger konservative Bemessung und erweitern grundsätzlich die Bandbreite der Stahlsorten, für die DIN EN 1993-1-4 gilt. Gerade aufgrund der hohen Kosten im Vergleich zu Baustahl sind effiziente Bemessungsverfahren wichtig für den Einsatz von nichtrostendem Stahl. Es sei aber ergänzt, dass sich diese vergleichsweise hohen Mate-

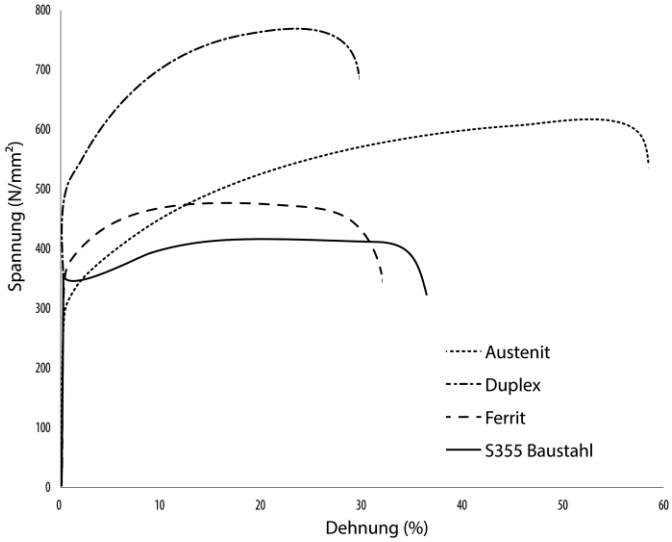

Bild 1. Vergleich des Materialverhaltens von nichtrostendem Stahl und Baustahl anhand von Spannung-Dehnung-Kurven

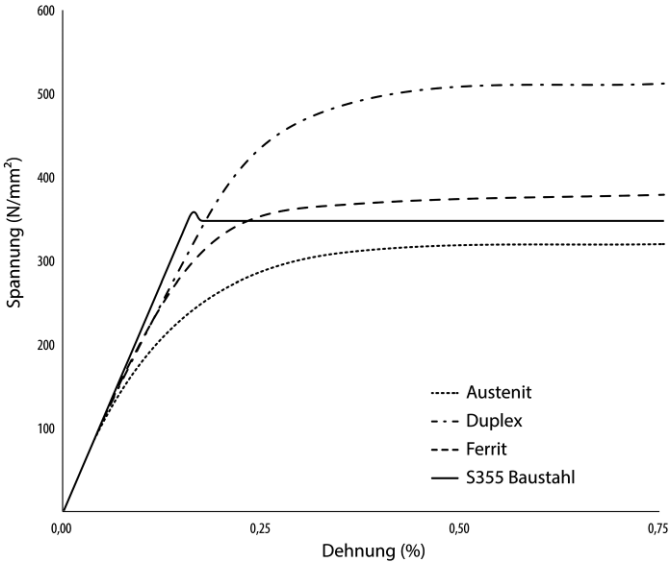

Bild 2. Vergleich der Spannung-Dehnung-Kurven von nichtrostendem Stahl und Baustahl im Bereich kleiner Dehnungen

rialkosten gerade bei Bauteilen in aggressiven Umgebungen durch größere Wartungsintervalle relativieren.

Entscheidendes Merkmal – Korrosionsbeständigkeit

Das entscheidende Merkmal, welches nichtrostenden Stahl von Baustahl unterscheidet, ist seine Korrosionsbeständigkeit. Diese erhält er aufgrund seiner transparenten und fest anhaftenden chromreichen Oxidschicht an der Stahloberfläche, der sogenannten Passivschicht. Sie entsteht ab einem Chromanteil von mindestens 10,5 % unter Anwesenheit von Sauerstoff und bildet sich auch nach Beschädigungen der Oberfläche erneut aus. Dank dieser Passivschicht können Bauteile aus nichtrostendem Stahl in vielen Umgebungen eingesetzt werden, ohne dass ein zusätzliches Beschichtungssystem verwendet werden muss.

Nichtrostender Stahl ist ein äußerst vielseitig einsetzbarer Werkstoff, welcher einzigartige Materialeigenschaften aufweist, die im Bauwesen durchaus ihren Nutzen finden. Dank dieser charakteristischen mechanischen Eigenschaften – u. a. ausgeprägte Kaltverfestigung sowie Duktilität – eignen sich vor allem nichtrostender austenitischer und nichtrostender Duplex-(austenitisch-ferritischer) Stahl besonders gut für Bauteile, die außergewöhnlichen Einwirkungen ausgesetzt sind. Nichtrostender austenitischer Stahl wird derzeit dabei am häufigsten im Bauwesen eingesetzt. Bei Anwendungen, für die höhere Festigkeiten von Vorteil sind, kommt jedoch vermehrt nichtrostender Duplex-Stahl zum Einsatz. Ein Vergleich des Spannung-Dehnung-Verhaltens von unterschiedlichen nichtrostenden Stahlsorten sowie von Baustahl ist in den Bildern 1 und 2 dargestellt.

Anwendungsmöglichkeiten und Beispiele

Folgende Anwendungsmöglichkeiten für nichtrostenden Stahl sind im Bauwesen typisch:

- Träger, Stützen, Bühnen und Verstärkungsbauteile 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, Absperrungen, Geländer, Kabelschächte und Dehnfugen bei Brückenbauwerken
- Küstenschutzanlagen, Pierkonstruktionen und weitere Konstruktionen in Küstennähe
- Verstärkungselemente in Betonbaukonstruktionen
- Fassaden, Dächer, Vordächer und Tunnelelemente
- Unterstützungskonstruktionen für Fassaden, Mauerwerk und Tunnelelemente etc.
- Sicherheitsabsperrungen, Geländer 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)
- explosions- und einschlagsresistente Konstruktionen, wie z. B. Sicherheitswände, Tore und Poller
- feuer- und explosionsresistente Wände, Kabelschächte und Laufbühnen an Offshore-Plattformen.

Bild 3 zeigt das Kuppeldach einer neuen Harnstoff- und Ammoniumnitratgewinnungsanlage in Polen während der Bauphase. Das Bauwerk besteht u. a. aus 144 gebogenen lasergeschweißten IPE 270-Trägern mit einer Spannweite von je 15 m sowie warmgewalzten U- und Winkelprofilen. Alle Profile (insgesamt ca. 95 t) wurden aus nichtrostendem austenitischen Stahl der Sorte 1.4404 hergestellt.

Bild 4 zeigt die Herstellung und Montage von vier 174 m überspannenden Brückenträgern aus 600 t nichtrostendem Duplex-Stahl der Sorte 1.4462. Die ca. 1 m hohen Träger ersetzen im Zuge einer Verstärkungsmaßnahme an einer stark befahrenen Eisenbahnbrücke in Stockholm die bisherigen Träger aus Baustahl. Der Projektträger, die Stockholmer Verkehrsbetriebe (Stockholm Public Trans-

Bild 3. Dachkonstruktion aus nichtrostendem Stahl einer Harnstoff- und Ammoniumnitratgewinnungsanlage in Polen während der Bauphase (Quelle: Montanstahl GmbH)

Bild 4. Herstellung (links) und Montage (rechts) von Brückenträgern aus nichtrostendem Stahl für eine Eisenbahnbrücke in Stockholm (Quelle: Lars Hamrebjörk, Swedish Institute of Steel Construction SBI)

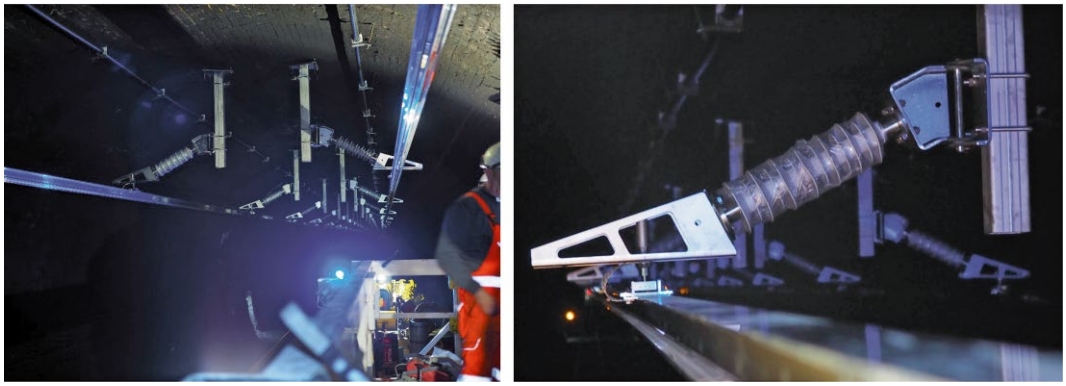

Bild 5. Unterstützende Stahlkonstruktion eines Starrkopf-Stromschienensystems (ROCS) im Severn-Tunnel im Rahmen des Ausbaus der Hauptbahnverbindung zwischen London und Südwales mit elektrischen Oberleitungen (Quelle: Furrer+Frey AG)

port), hat sich aufgrund seines geringen Instandhaltungsbedarfs explizit für nichtrostenden Stahl entschieden.

Tunnel sind spezielle Umgebungen, an denen jedoch auch Bau- und Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden. Betrachtet man dabei die gesamten Lebenszykluskosten, lohnen sich die höheren Materialkosten für nichtrostenden Stahl. Als Teil des Great Western Electrification Projects, in dessen Rahmen u. a. die Hauptbahnverbindung zwischen London und Südwales mit elektrischen Oberleitungen ausgestattet wurde, ist beispielsweise in insgesamt fünf Tunneln für die unterstützende Stahlkonstruktion eines Starrkopf-Stromschienensystems (Rigid Overhead Conductor Rail System (ROCS)) nichtrostender austenitischer Stahl der Sorte 1.4404 verwendet worden, um damit eine Lebensdauer von bis zu 80 Jahren mit minimalem Wartungsaufwand zu gewährleisten. Für den ca. 7 km langen Gleisabschnitt durch den Severn-Tunnel kamen höher legierte nichtrostende Stahlsorten zum Einsatz (Superaustenite der Sorte 1.4529 und Super-Duplex-Stahl der Sorte 1.4410), da die Umgebung aufgrund des Eindringens von Chloriden aus dem salzhaltigen Wasser der Severn-Mündung hier deutlich aggressiver ist (Bild 5).

Auch wenn nichtrostender Stahl und Baustahl viele Gemeinsamkeiten hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften aufweisen, sind aufgrund des nichtlinearen Spannung-Dehnung-Verhaltens von nichtrostendem Stahl teilweise abweichende Bemessungsregeln erforderlich. Durch die Nichtlinearität werden jedoch hauptsächlich lokales/globales Knicken/Beulen sowie bestimmte Grenzen bei der Querschnittsklassifizierung beeinflusst.

Änderungen der Bemessungsregeln

Die wesentlichste Änderung an den Bemessungsregeln in der Revision der DIN EN 1993-1-4 von 2015 betraf die Querschnittsklassifizierung: einige Grenzwerte der Breite-zu-Dicke-Verhältnisse wurden erhöht, um sie denen für Baustahl anzupassen. Außerdem wurde eine weniger konservative Bemessung der Schubtragfähigkeit (wichtig für z. B. Träger in Brücken, da dieses Anwendungsgebiet immer bedeutender wird) und eindeutigere Angaben zur Bemessung von kaltverfestigtem, nichtrostendem Stahl eingearbeitet.

Einer der größten Unterschiede zwischen nichtrostendem Stahl und Baustahl ist die große Auswahl an nichtrostenden Stahlsorten, wobei sich diese im Wesentlichen bezüglich ihrer speziellen Legierung und der daraus resultierenden Korrosionsbeständigkeit unterscheiden. Eine weitere bedeutende Änderung in der aktuellen Ausgabe der DIN EN 1993-1-4 betrifft die Einführung eines schrittweisen Verfahrens zur Werkstoffauswahl. Dieses Verfahren beinhaltet die folgenden Schritte:

- Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF (Corrosion Resistance Factor) für die vorherrschenden Bedingungen und
- Bestimmung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC (Corrosion Resistance Class) in Abhängigkeit vom Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF.

Der Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF hängt vom Ausmaß der Umweltbelastung in der betrachteten Umgebung ab und wird wie folgt bestimmt:

$$CRF = F1 + F2 + F3 \quad (1)$$

mit

F1 Risiko der Exposition gegenüber Chloriden aus Salzwasser oder Tausalzen
F2 Risiko der Exposition gegenüber Schwefeldioxid
F3 Reinigungskonzept oder die Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen

Der Korrosionsbeständigkeitsfaktor berücksichtigt alle Korrosionsarten von nichtrostendem Stahl, einschließlich Lochfraß-, Spalt- und Spannungsrisskorrosion, welche die Tragfähigkeit von Bauteilen beeinträchtigen. Dieses Verfahren der Werkstoffauswahl ist so ausgelegt, dass bei einem Bauteil aus nichtrostendem Stahl theoretisch keine Korrosion mehr auftreten kann, welche die Tragfähigkeit mindert. Allerdings können unter bestimmten Bedingungen optische Korrosionserscheinungen (Verfärbungen oder geringer oberflächlicher Lochfraß) auftreten. Diese können unansehnlich und bei Fällen, in denen das äußere Erscheinungsbild von Bedeutung ist, inakzeptabel sein, aber sie wirken sich nicht negativ auf die Tragfähigkeit aus.

Nichtrostende Stähle werden gemäß dem Verfahren zur Werkstoffauswahl in insgesamt fünf Korrosionsbeständigkeitsklassen eingeteilt, wobei CRC V die Korrosionsbeständigkeitsklasse mit der größten Korrosionsbeständigkeit ist (z. B. für stark korrosive Umgebungen in Schwimmhallen). Die endgültige Auswahl einer spezifischen Stahlsorte innerhalb einer Korrosionsbeständigkeitsklasse hängt noch von weiteren Faktoren ab, wie z. B. von der Festigkeit bzw. der Verfügbarkeit der erforderlichen Produktform. Somit reicht es grundsätzlich aus, wenn ein Konstrukteur die Korrosionsbeständigkeitsklasse sowie die Bemessungsfestigkeit für ein Material, z. B. CRC II und $f_y = 450\ N/mm^2$, angibt.

Europäisches Dissemination-Vorhaben PUREST – Aktualisierte Bemessungshilfen zu nichtrostenden Baustählen verfügbar

Mit der Veröffentlichung der Revision der DIN EN 1993-1-4 im Jahr 2015 waren alle sich auf diese Norm bis dahin existierenden Hilfsmittel für Ingenieure technisch überholt. Um die Praxis jedoch weiterhin bei der Anwendung der neuen Bemessungsregeln zu unterstützen, wurden aktuelle Informationen zur Bemessung im Rahmen des vom Research Fund for Coal and Steel (RFCS) geförderten europäischen Dissemination-Vorhabens PUREST „Promotion of new Eurocode rules for structural stainless steel“ (709600) zusammengestellt. An diesem Vorhaben, das im Juli 2016 begann und nach 18 Monaten im Dezember 2017 endete, waren Partner aus Deutschland (Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen), Belgien, Spanien, Portugal, der Tschechischen Republik, Finnland, Schweden, Polen und Italien beteiligt. Koordiniert wurde das Forschungsvorhaben in Großbritannien von The Steel Construction Institute (SCI) mit Unterstützung durch Imperial College London und Arup.

Die Maßnahmen innerhalb dieses Vorhabens richteten sich hauptsächlich an Bemessungsingenieure und enthalten folgendes:

- Überarbeitung und Erweiterung der *Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen* [11] in der 4. Auflage (2017) (Design Manual for Structural Stainless Steel)
- Übersetzung des „Design Manual for Structural Stainless Steel“ aus dem englischen Original in insgesamt neun europäische Sprachen
- Entwicklung einer online nutzbaren Bemessungssoftware sowie von Versionen für mobile Endgeräte (www.steel-stainless.org/designmanual)
- Nationale Seminare für Interessierte aus Praxis und Wissenschaft sowie Aufzeichnungen von Webinaren für die akademische Lehre.

In Deutschland wird die 4. Auflage (2017) der Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen [11] von der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER) als Sonderdruck 863 (ISBN 978-1-85942-228-1) herausgegeben (s. Bild 6). Die Bemessungshilfen bestehen dabei aus zwei Teilen: den Empfehlungen und den Bemessungsbeispielen; zusätzlich findet sich auf der Internetseite des For-

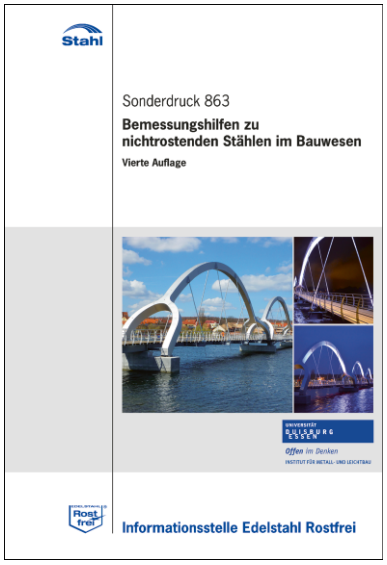

Bild 6. Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen (Design Manual for Structural Stainless Steel)

schungsvorhabens (www.steel stainless.org/designmanual) ein Kommentar in englischer Sprache:

- Die Empfehlungen (Recommendations) enthalten Hilfestellungen sowie wichtige Informationen zur Bemessung in Bezug auf die Werkstoffauswahl, die Dauerhaftigkeit, die Materialeigenschaften, die Bemessungsregeln und bestimmte Herstellungsaspekte.
- Die Bemessungsbeispiele (Design Examples) zeigen die mögliche Anwendung der Empfehlungen.
- Der englische Kommentar (Commentary) erläutert, worauf die Regelungen beruhen, wie sie hergeleitet wurden und gibt weitere Hintergrundinformationen sowie Referenzen an.

Neben der Überarbeitung der Bemessungsregeln im Hinblick auf die aktuelle Version der DIN EN 1993-1-4 wurden in den Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen auch aktuelle Informationen zu nichtrostenden ferritischen Stählen hinzugefügt. Nichtrostende ferritische Stähle kommen üblicherweise in Blechdicken bis maximal 4 mm zum Einsatz und bieten eine korrosionsbeständige Alternative zu dünnwandigen Konstruktionen aus Baustahl. Weiterhin wurden zwei neue Bemessungsmethoden eingearbeitet, einerseits zur Nutzung der Kaltverfestigung durch das Kaltumformen von Bauteilen während der Fertigung (eine Festigkeitssteigerung von ca. 50 % ist typisch für die Kantenbereiche von kaltumgeformten Querschnitten und auch in flachgewalzten Bereichen steigt die Festigkeit) und andererseits zur Berechnung der gesteigerten Querschnittstragfähigkeit mit Hilfe der „Continuous Strength Method“, welche die vorteilhaften Einflüsse der Kaltverfestigung berücksichtigt.

Alle im Rahmen des Forschungsvorhabens PUREST erstellten Unterlagen zur Bemessung stehen ab Anfang 2018 auf der Internetseite www.steel stainless.org/designmanual zur Verfügung. Die deutsche Ausgabe der Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen ist zusätzlich auf den Internetseiten der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (www.edelstahl-rostfrei.de) und des Instituts für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen (www.uni-due.de/iml) zu finden.

Literatur

[1] DIN EN 1993-1-4:2015-10, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen; Deutsche Fassung EN 1993-1-4:2006 + A1:2015.

[2] DIN EN 1993-1-4/NA:2017-01, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen.

[3] AbZ Z-30.3-6:2017-05, Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik, Zulassungsbescheid vom 12.5.2017.

[4] DIN EN 1090-2:2011-10, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008+A1:2011.

[5] MLTB – Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen. Stand Juni 2015 zzgl. Änderungen MLTB von 2016. www.dibt.de.

[6] AbZ Z-30.3-6:2014-04, Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutsches Instituts für Bautechnik, Zulassungsbescheid vom 22.4.2014.

[7] MVV TB – Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. Stand August 2017. www.dibt.de.

[8] *Achelis, J.*: Das neue Bauordnungsrecht und seine technische Konkretisierung, DIBt-PRAXISFORUM, Novellierung des Bauordnungsrechts, DIBt, Berlin, 6. November 2017, https://www.dibt.de/de/, DIBt/data/tagungen/DIBt-Praxisforum_2017_Tagungsband.pdf (Stand 23.11.2017).

[9] DIN EN 1993-1-4:2007-02, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln – Ergänzende Regeln zur Anwendung von nichtrostenden Stählen; Deutsche Fassung EN 1993-1-4:2006.

[10] *Baddoo, N.*: Stainless steel in construction. New Steel Construction, UK, January 2018, S. 26–29.

[11] Bemessungshilfen zu nichtrostenden Stählen im Bauwesen (Design Manual for Structural Stainless Steel), 4. Aufl. 2017, Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER), Düsseldorf, Sonderdruck 863.

Autoren dieses Beitrages:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner,
natalie.stranghoener@uni-due.de,
Sebastian Stehr, M.Sc.,
sebastian.stehr@uni-due.de,
Universität Duisburg-Essen,
Institut für Metall- und Leichtbau,
Universitätsstraße 15,
45141 Essen

Nancy Baddoo MA CEng FICE,
n.baddoo@steel-sci.com,
SCI – The Steel Construction Institute,
Silwood Park,
Ascot, Berkshire UK, SL5 7QN,
Großbritannien