

2.4 Beanspruchbarkeit von Verbindungen

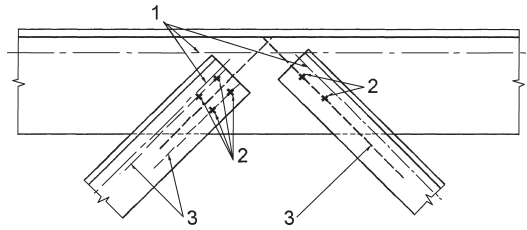
- (1) Die Beanspruchbarkeit einer Verbindung ist in der Regel anhand der Beanspruchbarkeiten ihrer Grundkomponenten zu bestimmen.
- (2) Für die Bemessung von Anschlüssen können linear-elastische oder elastisch-plastische Berechnungsverfahren angewendet werden.
- (3) Werden zur Aufnahme von Scherbeanspruchungen verschiedene Verbindungsmittel mit unterschiedlichen Steifigkeiten verwendet, so ist in der Regel dem Verbindungsmittel mit der höchsten Steifigkeit die gesamte Belastung zuzuordnen. Eine Ausnahme von dieser Regel ist in 3.9.3 angegeben.

2.5 Annahmen für die Berechnung

- (1) P Bei der Berechnung von Anschlüssen muss eine wirklichkeitsnahe Verteilung der Schnittgrößen angenommen werden. Für die Verteilung der Kräfte und Momente müssen die folgenden Annahmen getroffen werden:
 - a) die angenommene Verteilung der Kräfte und Momente steht im Gleichgewicht mit den im Anschluss angreifenden Schnittgrößen,
 - b) jedes Element des Anschlusses kann die ihm zugewiesenen Kräfte und Momente übertragen,
 - c) die Verformungen, welche durch diese Verteilung hervorgerufen werden, überschreiten nicht das Verformungsvermögen der Verbindungsmittel oder der Schweißnähte und der angeschlossenen Bauteile,
 - d) die angenommene Verteilung der Kräfte und Momente muss den Steifigkeitsverhältnissen im Anschluss entsprechen,
 - e) die Verformungen, die bei elastisch-plastischen Berechnungsmodellen aus Starrkörperverdrehungen und/oder Verformungen in der Tragwerksebene herühren, sind physikalisch möglich,
 - f) das verwendete Berechnungsmodell steht nicht im Widerspruch zu Versuchsergebnissen, siehe EN 1990.
- (2) Die Anwendungsregeln in dieser Norm erfüllen die Annahmen in 2.5(1).

2.6 Schubbeanspruchte Anschlüsse mit Stoßbelastung, Belastung mit Schwingungen oder mit Lastumkehr

- (1) Bei schubbeanspruchten Anschlüssen, die Stoßbelastungen oder erheblichen Belastungen aus Schwingungen ausgesetzt sind, sollten nur folgende Anschlussmittel verwendet werden:
 - Schweißnähte;
 - Schrauben mit Sicherung gegen unbeabsichtigtes Lösen der Muttern;
 - vorgespannte Schrauben;
 - Injektionsschrauben;



Legende

- 1 Schwerpunktsachsen
- 2 Verbindungsmittel
- 3 Bezugsachsen

Bild 2.1. Bezugsachsen

- andere Schrauben, die Verschiebungen der angeschlossenen Bauteile wirksam verhindern;
 - Niete.
- (2) Darf in einem Anschluss kein Schlupf auftreten (z. B. wegen Lastumkehr), sind in der Regel entweder gleitfeste Schraubverbindungen der Kategorie B oder C, siehe 3.4, Passschrauben, siehe 3.6.1, Niete oder Schweißnähte zu verwenden.
 - (3) In Windverbänden und/oder Stabilisierungsverbänden dürfen Schrauben der Kategorie A, siehe 3.4, benutzt werden.

2.7 Exzentrizitäten in Knotenpunkten

- (1) Treten in Knotenpunkten Exzentrizitäten auf, so sind in der Regel die Anschlüsse und die angeschlossenen Bauteile für die daraus resultierenden Schnittgrößen zu bemessen. Davon ausgenommen sind Konstruktionen, für die nachgewiesen wurde, dass dies nicht erforderlich ist, siehe 5.1.5.
- (2) Bei Anschlüssen von Winkel- oder T-Profilen mit einer oder zwei Schraubenreihen sind in der Regel die Exzentrizitäten nach 2.7(1) zu berücksichtigen. Exzentrizitäten in der Anschlussebene und aus der Anschlussebene heraus sind unter Berücksichtigung der Schwerpunktsachsen der Bauteile und der Bezugsachsen der Verbindung zu ermitteln, siehe Bild 2.1. Für den einschenklig Schraubenanschluss zugbeanspruchter Winkel kann das vereinfachte Bemessungsverfahren nach 3.10.3 angewendet werden.

Anmerkung: Der Einfluss der Exzentrizität auf druckbeanspruchte Winkelprofile in Gitterstäben ist in EN 1993-1-1, Anhang BB 1.2 geregelt.

Zu 2.4(3)

Die in 3.9.3 aufgeführte Ausnahme betrifft Hybridverbindungen von Schweißnähten und gleitfest vorgespannten Schrauben der Kategorie C (gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit), sofern das endgültige Anziehen der Schrauben nach der vollständigen Ausführung der Schweißarbeiten erfolgt.

Tabelle 3.1. Nennwerte der Streckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_{ub} von Schrauben

Schraubenfestigkeitsklasse	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

3 Schrauben-, Niet- und Bolzenverbindungen

3.1 Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben

3.1.1 Allgemeines

(1) Alle Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben müssen in der Regel die Anforderungen der Bezugsnormengruppe 4 in 1.2.4 erfüllen.

(2) Die Regelungen dieses Teils gelten für Schrauben der in Tabelle 3.1 angegebenen Festigkeitsklassen.

(3) Die Streckgrenzen f_{yb} und die Zugfestigkeiten f_{ub} sind für Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8 und 10.9 in Tabelle 3.1 angegeben. Für die Bemessung sind in der Regel diese Werte als charakteristische Werte anzusetzen.

Anmerkung: Im Nationalen Anhang darf die Anwendung bestimmter Schraubenklassen ausgeschlossen werden.

NDP DIN EN 1993-1-8/NA

zu 3.1.1(3) Anmerkung

Bauteile mit Außengewinden der Festigkeitsklassen 4.8, 5.8 und 6.8 sind für die Anwendung im Stahlbau nicht zulässig.

Gewindebolzen nach DIN EN ISO 13918 dürfen verwendet werden. DIN EN 1090-2:2018-09, 12.4.3 gilt entsprechend.

Es sind Gewindebolzen nach Tabelle NA.1 zu verwenden. Für Gewindebolzen, die nicht in Tabelle NA.1 aufgeführt sind, sind die Nachweise nach DIN EN 1090-2:2018-09, 5.6.11 zu erbringen.

Bei der Ermittlung der Beanspruchbarkeiten von Verbindungen mit Gewindebolzen sind für die Bolzenwerkstoffe die in Tabelle NA.1 angegebenen charakteristischen Werte zu verwenden.

Tabelle NA.1. Als charakteristische Werte für Werkstoffe von Gewindebolzen festgelegte Werte

	1	2	3	4
	Bolzen	nach	Streckgrenze $f_{y,b,k}$ N/mm ²	Zugfestigkeit $f_{u,b,k}$ N/mm ²
1	Festigkeitsklasse 4.8	DIN EN ISO 13918	340	420
2	S235J2+C450	DIN EN ISO 13918	350	450
3	S235JR, S235JO, S235J2, S355JO, S355J2	DIN EN 10025-2	Werte nach DIN EN 1993-1-1:2010-12, Tabelle 3.1	

NCI DIN EN 1993-1-8/NA

zu 3.13.1 Bolzenverbindungen – Allgemeines

Für Bolzen im Sinne des Abschnitts 3.13 verwendete Verbindungselemente und Werkstoffe müssen den Anforderungen der Bezugsnormengruppen 1 oder 4 entsprechen. Das NDP zu 3.1.1(3) ist zu beachten.

NCI DIN EN 1993-1-8/NA

zu Abschnitt 3.1.1 Verzinkte Schrauben

Andere metallische Korrosionsschutzüberzüge dürfen verwendet werden, wenn

- die Verträglichkeit mit dem Stahl gesichert ist und
 - eine wasserstoffinduzierte Versprödung vermieden wird und
 - ein adäquates Anziehverhalten nachgewiesen wird.
- Galvanisch verzinkte Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 dürfen nicht verwendet werden.

Anmerkung 1: Ein anderer metallischer Korrosionsschutzüberzug ist z. B. die galvanische Verzinkung. Die galvanische Verzinkung bei Schrauben reicht als Korrosionsschutz allein nur in trockenen Innenräumen (Korrosionskategorie C1 nach DIN EN ISO 12944-2) aus.

Anmerkung 2: Zur Vermeidung wasserstoffinduzierter Versprödung siehe auch DIN EN ISO 4042.

Zu NCI zu 3.1.1 Verzinkte Schrauben

Mit den Festlegungen im Nationalen Anhang soll bei höherfesten Schrauben der Festigkeitsklasse 10.9 der bestehenden Gefahr einer Wasserstoffversprödung begegnet werden. Neuere Untersuchungen zeigen, dass dies nicht mehr für Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 gilt.

3.1.2 Vorgespannte Schrauben

(1) Schraubengarnituren der Festigkeitsklassen 8.8 und 10.9, welche den Anforderungen der Bezugsnormengruppe 4 in 1.2.4 entsprechen, dürfen als vorgespannte Schrauben eingesetzt werden, sofern eine kontrollierte Vorspannung nach Bezugsnormengruppe 7 in 1.2.7 durchgeführt wird.

3.2 Niete

(1) Die Werkstoffkenngrößen, Abmessungen und Toleranzen von Stahl-Nieten müssen in der Regel die Anforderungen der Bezugsnormengruppe 6 in 1.2.6 erfüllen.

3.3 Ankerschrauben

(1) Für Ankerschrauben dürfen die folgenden Werkstoffe verwendet werden:

- Stahlsorten, welche den Anforderungen der Bezugsnormengruppe 1 in 1.2.1 entsprechen;
- Stahlsorten, welche den Anforderungen der Bezugsnormengruppe 4 in 1.2.4 entsprechen;
- Stahlsorten von Bewehrungsstählen, welche den Anforderungen nach EN 10080 entsprechen,

vorausgesetzt, dass der Nennwert der Streckgrenze bei scherbeanspruchten Ankerschrauben den Wert 640 N/mm^2 nicht überschreitet. Ohne Scherbeanspruchung liegt die obere Grenze bei 900 N/mm^2 .

3.4 Kategorien von Schraubenverbindungen

3.4.1 Scherverbindungen

(1) Schraubenverbindungen mit Scherbeanspruchung werden in der Regel für die Bemessung in folgende Kategorien unterteilt:

a) *Kategorie A: Scher-/Lochleibungsverbindung*

Zu dieser Kategorie gehören Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9. Vorspannung und besondere Oberflächenbehandlungen sind in der Regel nicht erforderlich. Der Bemessungswert der einwirkenden Scherkraft darf weder den Bemessungswert der Schertragfähigkeit nach 3.6 noch den Bemessungswert des Lochleibungswiderstandes nach 3.6 und 3.7 überschreiten.

b) *Kategorie B: Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit*

Zu dieser Kategorie gehören hochfeste vorgespannte Schrauben, welche die Anforderungen nach 3.1.2(1) erfüllen. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit darf in der Regel kein Gleiten auftreten. Der Bemessungswert der einwirkenden Scherkraft im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit darf in der Regel den Bemessungswert des Gleitwiderstandes nach 3.9 nicht überschreiten. Der Bemessungswert der einwirkenden Abscherkraft im Grenzzustand der Tragfähigkeit darf in der Regel den Bemessungswert der Schertragfähigkeit nach 3.6 und des Lochleibungswiderstandes nach 3.6 und 3.7 nicht überschreiten.

Zu 3.1.2(1)

Die Vorspannverfahren zur Aufbringung einer kontrollierten Vorspannung werden in Abschnitt 8.5 der DIN EN 1090-2 und im Anhang A des Nationalen Anhangs zur DIN EN 1993-1-8 geregelt und werden ausführlich im Kapitel 4 des Beitrags von Prof. Schmidt und Prof. Stranghöner im Stahlbau-Kalender 2011 behandelt [K35].

Zu 3.4

Die Kategorisierung von Schraubverbindungen erfolgt nach DIN EN 1993-1-8 wie auch schon in DIN 18800-1 in Abhängigkeit von der Ausführung und den Beanspruchungen. Neu ist im Vergleich zur DIN 18800-1 die Kategorie C „Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit“. Anders als bei Verbindungen der Kategorie B „Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit“ (DIN 18800: GV/GVP-Verbindung) muss bei Verbindungen der Kategorie C sichergestellt werden, dass der Gleitwiderstand $F_{s,Rd}$ auch unter Bemessungslasten nicht überwunden wird.

Die zur DIN EN 1993 gehörende Ausführungsnorm DIN EN 1090-2 bietet für die Ermittlung des Gleitwiderstandes auch Haftreibungszahlen $\mu \geq 0,20$ für unbehandelte, oder lediglich durch Drahtbürsten oder durch Flammstrahlen gereinigte Oberflächen an, so dass auf die nach DIN 18800-7 [K7] noch zwingend erforderliche Vorbehandlung der Kontaktflächen verzichtet werden kann, wenn die erforderlichen Nachweise für die gleitfest vorgespannten Verbindungen mit den reduzierten Haftreibungszahlen geführt werden können. Auf die Haftreibungszahlen sowie die erforderlichen Oberflächenbehandlungen wird in Abschnitt 3.9 noch eingegangen.

Tabelle 3.2. Kategorien von Schraubenverbindungen

Kategorie	Nachweiskriterium	Anmerkungen
Scherverbindungen		
A Scher-/Lochleibungsverbindung	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden.
B Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. Gleitwiderstand für Gebrauchstauglichkeit siehe 3.9.
C Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $\Sigma F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. Gleitwiderstand für Tragfähigkeit siehe 3.9. $N_{net,Rd}$ siehe 3.4.1(1)c).
Zugverbindungen		
D Nicht vorgespannt	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Keine Vorspannung erforderlich. Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9 dürfen verwendet werden. $B_{p,Rd}$ siehe Tabelle 3.4.
E Vorgespannt	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	In der Regel sind hochfeste Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9 zu verwenden. $B_{p,Rd}$ siehe Tabelle 3.4.
Der Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft $F_{t,Ed}$ sollte Beiträge aus Abstützkräften berücksichtigen, siehe 3.11. Schrauben unter Scher- und Zugbeanspruchung gelten in der Regel die Kriterien, die in Tabelle 3.4 angegeben sind.		

Zu Tabelle 3.2

Die Gleichungen zur Ermittlung der Beanspruchbarkeiten von einzelnen Schrauben und Nieten sind in Tabelle 3.4 zusammengestellt. Neu ist im Vergleich zur DIN 18800-1 der für zugbeanspruchte Schrauben geforderte Nachweis gegen Durchstanzen ($B_{p,Rd} \geq F_{t,Ed}$), der aber in der Regel bei sinnvoll aufeinander abgestimmten Blechdicken und Schraubendurchmessern nicht maßgebend wird. Das Durchstanzen kann als Schubversagen der Bleche interpretiert werden, wobei der Durchmesser d_m des „kritischen Rundschnittes“ mit dem Mittelwert aus Eckmaß und Schlüsselweite der Schraube angesetzt wird.

Zusätzlich ist für die verbundenen Bauteile in Scherverbindungen der *Kategorien A und B* nach DIN EN 1993-1-1 nachzuweisen, dass die plastische Beanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts und die Zugbeanspruchbarkeit des Nettoquerschnitts längs der kritischen Risslinie größer ist als der Bemessungswert der einwirkenden Normalkraft. Für Stahlsorten bis S460 ist die Zugbeanspruchbarkeit nach DIN EN 1993-1-1 [K14] Gleichung (6.6) und (6.7) zu bestimmen. Kommen Stahlsorten über S460 bis S700 zum Einsatz, muss nach DIN EN 1993-1-12 der Teilsicherheitsbeiwert γ_{M2} in Gleichung (6.7) durch γ_{M12} ersetzt werden. Empfohlen wird in DIN EN 1993-1-12: $\gamma_{M12} = \gamma_{M2} = 1,25$. Die Empfehlung ist im Nationalen Anhang bestätigt worden.

Wenn für Bauwerke in Erdbebengebieten eine Kapazitätsbemessung gefordert wird, ist sicherzustellen, dass die plastische Zugbeanspruchbarkeit des Bruttoquerschnitts maßgebend wird, vgl. [K46]. Auf den Einsatz von Stahlsorten über S460 sollte dann jedoch verzichtet werden.

Bei Schraubverbindungen der *Kategorie C* ist die Zugbeanspruchbarkeit ausschließlich mit dem maßgebenden Nettoquerschnitt nach DIN EN 1993-1-1 Gleichung (6.8) zu bestimmen.

Für unsymmetrisch angeschlossene Bauteile wie z. B. an nur einem Schenkel angeschlossene Winkel und bei indirekten Anschlüssen gelten die Gleichungen (6.6) bis (6.8) der DIN EN 1993-1-1 nicht. Die Zugbeanspruchbarkeit ist hier nach DIN EN 1993-1-8, Absatz 3.10.3 bzw. 3.10.4, zu bestimmen. Die dort angegebenen Regeln gelten nur für Stahlsorten bis S460 und sind nicht auf höherfeste Stahlsorten übertragbar.

c) *Kategorie C: Gleitfeste Verbindung im Grenzzustand der Tragfähigkeit*

Zu dieser Kategorie gehören hochfeste vorgespannte Schrauben, welche die Anforderungen nach 3.1.2(1) erfüllen. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit darf kein Gleiten auftreten. Der Bemessungswert der einwirkenden Scherkraft im Grenzzustand der Tragfähigkeit darf den Bemessungswert des Gleitwiderstandes nach 3.9 und des Lochleibungswiderstandes nach 3.6 und 3.7 nicht überschreiten.

Zusätzlich darf bei Zugverbindungen der Bemessungswert des plastischen Widerstands des Nettoquerschnitts im kritischen Schnitt durch die Schraubenlöcher $N_{\text{net,Rd}}$ (siehe EN 1993-1-1, 6.2) nicht überschritten werden.

In Tabelle 3.2 sind die Bemessungsnachweise für diese Verbindungskategorien zusammengefasst.

3.4.2 Zugverbindungen

(1) Zugbeanspruchte Schraubenverbindungen werden in der Regel für die Bemessung in folgende Kategorien unterteilt:

a) *Kategorie D: nicht vorgespannt*

Zu dieser Kategorie gehören Schrauben der Festigkeitsklassen 4.6 bis 10.9. Vorspannung ist nicht erforderlich. Diese Kategorie darf bei Verbindungen, die häufig veränderlichen Zugbeanspruchungen ausgesetzt sind, nicht verwendet werden. Der Einsatz in Verbindungen, die durch normale Windlasten beansprucht werden, ist dagegen erlaubt.

b) *Kategorie E: vorgespannt*

Zu dieser Kategorie gehören hochfeste vorgespannte Schrauben der Festigkeitsklassen 8.8 oder 10.9, die nach Bezugsnormengruppe 7 in 1.2.7 kontrolliert vorgespannt werden.

In Tabelle 3.2 sind die Bemessungsregeln für diese Verbindungskategorien zusammengefasst.

Anmerkung: Wird die Vorspannung nicht für den Gleitwiderstand eingesetzt, sondern aus anderen Gründen für die Ausführung oder als Qualitätsmaßnahme (z. B. für die Dauerhaftigkeit) gefordert, dann kann die Höhe der Vorspannung im Nationalen Anhang festgelegt werden.

NDP

DIN EN 1993-1-8/NA

zu 3.4.2(1) Anmerkung

Die Vorspannkraft F_V wird wie folgt angesetzt und ist mit den Verfahren nach DAST-Richtlinie 024 aufzubringen:

$$F_V \leq F_{p,C}$$

3.5 Rand- und Lochabstände für Schrauben und Niete

(1) Die Grenzwerte für Rand- und Lochabstände für Schrauben und Niete sind in Tabelle 3.3 angegeben.

(2) Zu Grenzwerten für Rand- und Lochabstände für Konstruktionen unter Ermüdungsbelastung, siehe EN 1993-1-9.

Zu 3.5(2)

Wird bei dem Ermüdungsnachweis nach DIN EN 1993-1-9 auf das Nennspannungskonzept zurückgegriffen, müssen die Anschlüsse folgende Mindestrand- und Lochabstände aufweisen:

$$e_1 \geq 1,5d_0; \quad e_2 \geq 1,5d_0$$

$$p_1 \geq 2,5d_0; \quad p_2 \geq 2,5d_0$$

Werden kleinere Rand- und Lochabstände ausgeführt, fehlen entsprechende Kerbfälle in DIN EN 1993-1-9 und es muss der Ermüdungsnachweis auf anderem Wege (z. B. über das Konzept der Strukturspannungen) erbracht werden.

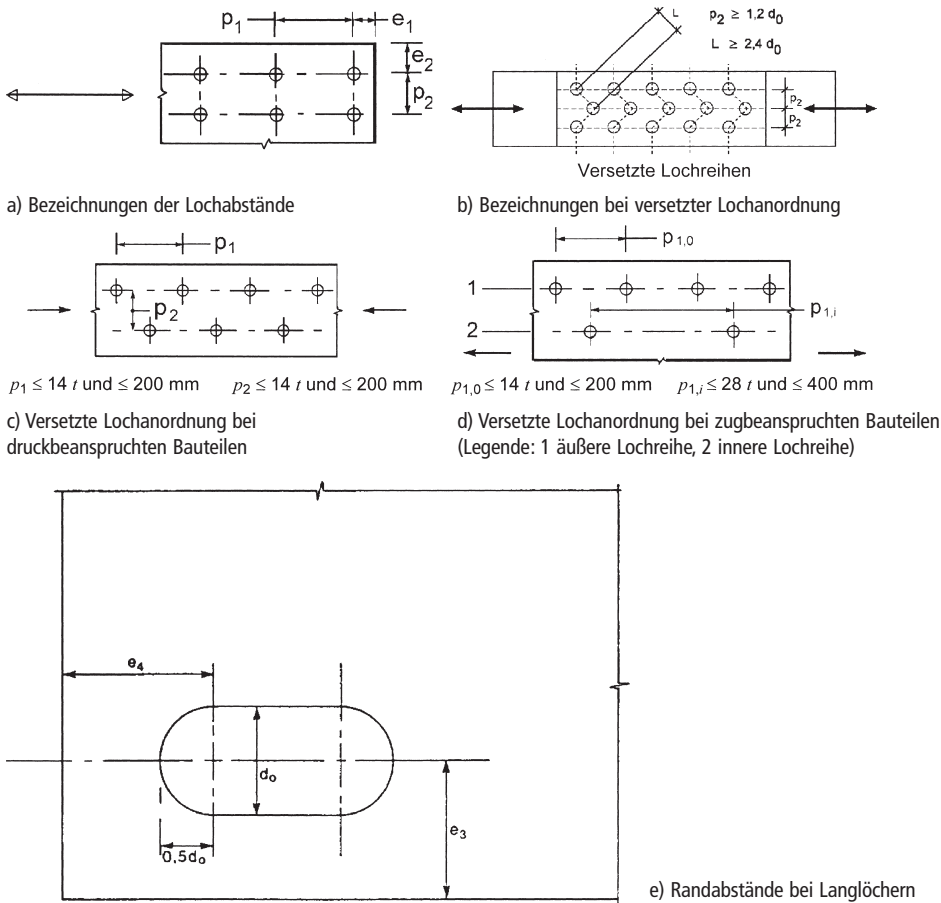


Bild 3.1. Loch- und Randabstände von Verbindungsmitteln

NCI DIN EN 1993-1-8/NA

zu 3.5 Schraubverbindungen mit Bauteilen mit Innengewinden und Bauteilen mit Außengewinden
 Regelungen zur Einschraubtiefe bei geschraubten Verbindungen mit z. B. Gewindestangen, Sacklochverbindungen etc. sind DAST-Richtlinie 024 zu entnehmen.
 Anmerkung 1: Sacklochverbindungen dürfen nur mit speziellem Nachweis (Verfahrensprüfung) vorgespannt werden, siehe DAST-Richtlinie 024.

Bemessungswert der Vorspannkraft, $F_{p,Cd}$, wie folgt anzusetzen:

$$F_{p,Cd} = 0,7 f_{ub} A_s / \gamma_{M7} \quad (3.1)$$

3.6 Tragfähigkeiten einzelner Verbindungsmittel

3.6.1 Schrauben und Niete

- (1) Die Bemessungswerte der Tragfähigkeit einzelner Verbindungsmittel unter Scher- und/oder Zugbeanspruchung sind in Tabelle 3.4 angegeben.
- (2) Bei vorgespannten Schrauben, welche den Anforderungen nach 3.1.2(1) entsprechen, ist in der Regel der

Zu 3.6

In DIN EN 1993-1-8 werden grundsätzlich alle Nachweise sowohl für die Verbindungsmittel als auch für die verbundenen Querschnittsteile im Anschlussbereich auf f_u -Niveau mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M2} = 1,25$ geführt.

Die Regeln zur Ermittlung der Abscher- und Zugtragfähigkeit von Schrauben können auch auf andere Gewindeteile und runde Stäbe aus Vollmaterial übertragen werden. Nach DIN EN 1090-2, Abschnitt 8.2.2 ist der kleinste zulässige Nenndurchmesser für Stahlbauerschraubungen M12.

Tabelle 3.3. Grenzwerte für Rand- und Lochabstände

Rand- und Lochabstände, siehe Bild 3.1	Minimum	Maximum ^{1), 2), 3)}		
		Stahlkonstruktionen unter Verwendung von Stahlsorten nach EN 10025, ausgenommen Stahlsorten nach EN 10025-5		Stahlkonstruktionen unter Verwendung von Stahlsorten nach EN 10025-5
		Stahl, der dem Wetter oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt ist	Stahl, der nicht dem Wetter oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt ist	Ungeschützter Stahl
Randabstand e_1	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Der größte Wert von: $8t$ oder 125 mm
Randabstand e_2	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Der größte Wert von: $8t$ oder 125 mm
Randabstand e_3 bei Langlöchern	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Randabstand e_4 bei Langlöchern	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Lochabstand p_1	$2,2d_0$	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t_{\min}$ oder 175 mm
Lochabstand $p_{1,0}$		Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm		
Lochabstand $p_{1,i}$		Der kleinste Wert von: $28t$ oder 400 mm		
Lochabstand p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t$ oder 200 mm	Der kleinste Wert von: $14t_{\min}$ oder 175 mm

1) Keine Beschränkung der Maximalwerte für Rand- und Lochabstände, außer:
— bei druckbeanspruchten Bauteilen zur Verhinderung des lokalen Beulens und zur Vermeidung von Korrosion von Bauteilen (die Grenzwerte sind in der Tabelle angegeben), die dem Wetter oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt sind;
— bei zugbeanspruchten Bauteilen zur Vermeidung von Korrosion (die Grenzwerte sind in der Tabelle angegeben).

2) Der Widerstand druckbeanspruchter Bleche gegen lokales Beulen zwischen den Verbindungsmitteln ist in der Regel nach EN 1993-1-1 unter Verwendung der Knicklänge $0,6 p_1$ zu berechnen. Lokales Beulen braucht nicht nachgewiesen werden, wenn p_1/t kleiner als 9ϵ ist. Der Randabstand quer zur Krafrichtung darf in der Regel die Anforderungen gegen lokales Beulen von druckbeanspruchten einseitig gestützten Flanschen nicht überschreiten, siehe EN 1993-1-1. Der Randabstand in Krafrichtung wird von dieser Anforderung nicht betroffen.

3) t ist die Dicke des dünnsten außen liegenden Blechs.

4) Die Grenzwerte für Langlochabmessungen sind in Bezugsnormengruppe 7 in 1.2.7 angegeben.

5) Bei versetzt angeordneten Schraubenreihen darf der minimale Lochabstand auf $p_2 = 1,2d_0$ reduziert werden, sofern der Minimalabstand L zwischen zwei Verbindungsmitteln größer oder gleich als $2,4d_0$ ist, siehe Bild 3.1b).

Zu Tabelle 3.3

Nach DIN EN 1993-1-8 gelten die gleichen unteren Grenzwerte für die Rand- und Lochabstände wie nach DIN 18800-1. Bei den oberen Grenzwerten ist zu differenzieren zwischen wetterfesten Baustählen nach DIN EN 10025-5 und den weiteren in DIN EN 10025 geregelten Stahlsorten, bei denen zusätzlich zu berücksichtigen ist, ob die Stahlkonstruktion der Witterung oder anderen korrosiven Einflüssen ausgesetzt ist. Die oberen Grenzwerte der

Rand- und Lochabstände werden nach DIN EN 1993-1-8 generell in Abhängigkeit von der Dicke t des dünnsten außen liegenden Bleches unter Berücksichtigung absoluter Grenzwerte formuliert. Der Durchmesser der verwendeten Schrauben bzw. der zugehörige Lochdurchmesser bleiben unberücksichtigt. Verglichen mit DIN 18800-1 fallen die maximalen Rand- und Lochabstände nach DIN EN 1993-1-8 in der Regel etwas kleiner aus.

Wetterfeste Baustähle müssen zur Ausbildung einer korrosionshemmenden Sperrschicht einem Wechsel von Feuchte und Trockenheit unterzogen werden. Bei geschraubten Verbindungen kann Kondensation und Kapillarwirkung zur Dauerfeuchtigkeit in den Spalten führen und in Folge zu Korrosion. Durch Einhalten der Rand- und Lochabstände werden die Spalte hinreichend gepresst und die Korrosion wird mangels Sauerstoffzufuhr unterbunden.

Neu sind in DIN EN 1993-1-8 die konstruktiven Regeln für versetzte Lochreihen und für Langlöcher, siehe Bild 3.1. Die Abmessungen der Langlöcher müssen den Anforderungen der DIN EN 1090-2, Tabelle 11 genügen. Hiernach ist zu differenzieren zwischen kurzen Langlöchern (Längen gestaffelt von 16 mm bei M12 bis 37 mm bei M27) und langen Langlöchern (Länge gleich dem 1,5fachen Nenndurchmesser), für die in Querrichtung die gleichen Anforderungen gelten wie für normale runde Löcher.

Anforderungen an die oberen Grenzwerte für Rand- und Lochabstände sind nur zu berücksichtigen, wenn die Stahlkonstruktion korrosiven Einflüssen ausgesetzt ist oder wenn bei Druckbeanspruchungen ein lokales Beulen ausgeschlossen werden muss. Auf den Nachweis gegen lokales Beulen darf verzichtet werden, wenn die Lochabstände p_1 folgender Bedingung genügen: $p_1 \geq 9 \cdot e \cdot t = 9 \cdot \sqrt{235/f_y} \cdot t$. Andernfalls ist der Nachweis nach DIN EN 1993-1-1 entsprechend der Fußnote 2) zur Tabelle 3.3 zu führen.

Die größten Lochleibungstragfähigkeiten werden bei folgenden Rand- und Lochabständen erreicht:

$$e_1 \geq 3,0 d_0; \quad e_2 \geq 1,5 d_0$$

$$p_1 \geq 3,75 d_0; \quad p_2 \geq 3,0 d_0$$

Dies entspricht mit Ausnahme des erforderlichen Lochabstandes in Krafrichtung den konstruktiven Anforderungen der DIN 18800-1 (dort: $p_1 \geq 3,50 d_0$) um die höchstmögliche Lochleibungstragfähigkeit zu erreichen.

Zu Tabelle 3.4

In Tabelle 3.4 sind die Gleichungen zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit einzelner Schrauben und Niete mit Scher- und/oder Zugbeanspruchungen zusammengefasst. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen nicht von der DIN 18800-1, nur bei kombinierten Scher- und Zugbeanspruchungen ist von der bekannten Kreisgleichung abgewichen und eine lineare Interaktionsbeziehung eingeführt worden. Die lineare Interaktionsbeziehung geht auf experimentelle Untersuchungen an der TU Delft und der University of Manchester zurück, die in der Background Dokumentation zur DIN EN 1993-1-8 [K37] statistisch ausgewertet wurden. Die lineare Interaktionsbeziehung definiert eine untere Grenzkurve für kombinierte Scher- und Zugbeanspruchungen, bei der im Gegensatz zu der Kreisgleichung nach DIN 18800-1 alle Versuchsergebnisse auf der sicheren Seite liegen, vgl. Bild 4 in [K44]. Bei der statistischen Auswertung wurde die Beanspruchbarkeit der Schrauben auf Zug immer auf Basis der Spannungsquerschnittsfläche A_s bestimmt, unabhängig davon, ob der Schaft oder das Gewinde in der Scherfuge lag. Dies ist auch bei der Nachweisführung für kombinierte Scher- und Zugbeanspruchungen nach DIN EN 1993-1-8 zu berücksichtigen und es darf im Interaktionsnachweis nicht mehr wie nach Element (810) der DIN 18800-1 die ggf. höhere Zugtragfähigkeit für den Schaftquerschnitt zugrunde gelegt werden, selbst wenn dieser in der Scherfuge liegt.

Geringfügige Änderungen im Vergleich zur DIN 18800-1 wurden bei dem Beiwert α_v eingeführt, mit dem das Verhältnis von Scher- zu Zugfestigkeit erfasst wird. Dieser darf für die nach dem Nationalen Anhang zugelassenen Schraubenfestigkeitsklassen 4.6, 5.6, 8.8 und 10.9 mit $\alpha_v = 0,6$ angesetzt werden. Die einzige Ausnahme bilden 10.9er Schrauben, wenn das Gewinde in der Scherfuge liegt, dann ist mit $\alpha_v = 0,5$ zu rechnen.

Bei der Ermittlung der Lochleibungstragfähigkeit $F_{b,Rd}$ ist entsprechend der Fußnote a zur Tabelle 3.4 eine Abminderung zu berücksichtigen, wenn statt normalem Lochspiel (siehe Autorenhinweis zu 3.6.1 (9)) ein großes Lochspiel vorliegt ($\beta = 0,80$) oder wenn die Schrauben in Langlöcher quer zur Krafrichtung eingesetzt werden ($\beta = 0,60$).

Eine umfassende Darstellung der Hintergründe und die Herleitungen der Gleichungen zur Bestimmung der Beanspruchbarkeiten findet sich auch in [43].

Für das Zusammenwirken von Verbindungsmitteln in einem Anschluss sind weitere Regeln in DIN EN 1993-1-8 formuliert, die zusätzlich zu berücksichtigen sind (siehe u. a. 3.8 und 3.12).

Für versetzt angeordnete Löcher darf der Lochabstand L wie in Bild 3.1 b) angegeben für die Ermittlung der Lochleibungstragfähigkeit angenommen werden.

Der Nachweis eines Bleches gegen Durchstanzen ist für zugbeanspruchte Schraubenverbindungen zu führen. Das Durchstanzen ist vergleichbar dem Schubversagen eines Bleches im kritischen Rundschnitt mit dem Durchmesser d_m als Mittelwert aus Eckmaß e und Schlüsselweite s der Schraube, Bild III.3.2. Die Beanspruchbarkeit wird mit der Blechdicke t des betrachteten Bleches nachgewiesen und nicht mit der in Tabelle 3.4 angegebenen Blechdicke t_p der Unterlegscheibe.

$$t_p > \frac{k_2 A_s f_{ub}}{0,6\pi d_m f_w}$$

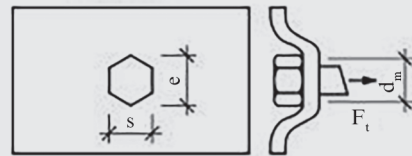


Bild III.3-2. Durchstanzen

Für den Nachweis des Durchstanzens bei Senkkopfschrauben ist für d_m der äußere Kreisdurchmesser des Schraubenkopfes anzusetzen. Für t_p ist die Restblechdicke am Schraubenkopfaußendurchmesser des betrachteten Bleches anzusetzen. Außerdem ist ein Vergleichsspannungsnachweis unter Berücksichtigung der zusätzlichen Beanspruchung aus Ringzug zu führen.

Senkkopfschrauben werden in DIN EN 14399-7 behandelt. Da diese Norm nicht in der Bezugsnormengruppe von DIN EN 1993-1-8 genannt ist, ist eine pauschale Nachweisführung gemäß DIN 1993-1-8 nicht zulässig. Für den besonderen Fall der Zugbeanspruchung/Vorspannung in der Senkschraube wird in DIN EN 14399-7 jedoch auf DIN EN 1993-1-8 verwiesen, wodurch der Ansatz der in DIN EN 1993-1-8 gegebenen Beanspruchbarkeit auf Zug erlaubt ist.

der 0,05%-Dehngrenze aus ihrem Datensatz herzuleiten. Da die 0,05%-Dehngrenze allerdings nur zur Berechnung des n -Wertes benötigt wird und dieser alternativ direkt anhand von Tabelle 5 bestimmt werden kann, ist die Kenntnis von $\sigma_{0,05}$ nicht zwingend.

2.5 Anmerkungen zu Abschnitt 5.1.2.3: Kaltumgeformte Profile – Werkstoffeigenschaften

Kaltumgeformte Profile und kaltgewalzte Bänder weisen erhöhte Festigkeitskennwerte in den kaltumgeformten bzw. kaltgewalzten Bereichen auf. Sowohl der Kaltwalzprozess des Bandes als auch der Kaltumformprozess zur Profilherstellung erzeugen plastische Verformungen im Material, die zu einer Kaltverfestigung mit einhergehender Erhöhung der Streckgrenze und Zugfestigkeit führen. Aufgrund der während des Umformprozesses entlang eines Profils unterschiedlich hoch eingepprägten plastischen Dehnungen entstehen entlang des Profilquerschnitts auch unterschiedlich hohe Festigkeitssteigerungen. Dieser Umstand ist bei nichtrostenden Stählen stärker ausgeprägt als bei kaltumgeformten Baustählen, da nichtrostende Stähle per se ein stärker ausgeprägtes nichtlineares Materialverhalten bereits im elastischen Bereich sowie ein starkes Verfestigungsverhalten aufweisen.

Der Umstand der infolge der Kaltverfestigung bei kaltumgeformten Profilen erhöhten Festigkeitskennwerte kann bei der Bemessung gewinnbringend eingesetzt werden. Hierzu wurden umfangreiche Untersuchungen mit dem Ziel der Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der erhöhten Festigkeitskennwerte zur Berücksichtigung in der Bemessung von nichtrostenden Stählen von *Afshan, Rossi* und *Gardner* [49, 56] durchgeführt, das nun in prEN 1993-1-4 implementiert wurde. Das Modell zur Bestimmung der erhöhten Streckgrenze f_{ya} von kaltumgeformten Querschnitten als Basis zur Ermittlung der Widerstandsgrößen wurde erstmals bereits in [4] vorgestellt, seinerzeit allerdings noch mit dem Hinweis darauf, dass die Knicklinien der DIN EN 1993-1-4 noch angepasst werden müssen. Dies ist zwischenzeitlich in DIN EN 1993-1-4/A2 [2] und prEN 1993-1-4 erfolgt.

Nach [56] gehen in die Ermittlung der erhöhten Streckgrenze f_{ya} eines kaltumgeformten Profils sowohl die Materialeigenschaften der flachen als auch der gekrümmten Querschnittsanteile anteilig ein. Die Regelungen in prEN 1993-1-4 wurden auf Basis der Materialeigenschaften des nicht umgeformten Bandmaterials hergeleitet. Während bei gekanteten Profilen die erhöhte Festigkeit vor allem in den Eckbereichen zu finden ist, treten bei kaltgewalzten Profilen, wie z. B. Kastenprofilen, Festigkeitssteigerungen sowohl in den Eckbereichen als auch in den flachen Profilabschnitten auf. Die Festigkeitssteigerung hängt auch von der Art des Werkstoffs ab. So können kaltgewalzte Profile aus nichtrostendem austenitischen Stahl eine Erhöhung der Streckgrenze um bis zu 48% aufweisen. Exemplarisch

Tabelle 6. Festigkeitssteigerung für ausgewählte Profile

	f_{ya}/f_y [-]	
	Austenit	Duplex
Quadratische Hohlprofile (SHS)		
100 × 100 × 3 mm	1,33	1,07
100 × 100 × 6 mm	1,48	1,15
300 × 300 × 5 mm	1,22	1,02
300 × 300 × 8 mm	1,32	1,07
Runde Hohlprofile (CHS)		
Ø 103 × 2,5 mm	1,11	1
Ø 103 × 5 mm	1,23	1,02
Ø 304 × 2,5 mm	1	1
Ø 304 × 6 mm	1,08	1
Winkel aus gekanteten Blechen		
100 × 120 × 6 mm	1,07	1,02
110 × 100 × 10 mm	1,11	1,03
180 × 180 × 10 mm	1,06	1,02
C-Profile aus gekanteten Blechen		
160 × 80 × 5 mm	1,05	1,02
80 × 40 × 8 mm	1,18	1,06

sind in Tabelle 6 die Festigkeitssteigerungen für ausgewählte quadratische und runde Hohlprofile sowie für Profile aus gekanteten Blechen, Winkel und C-Profile, aufgeführt, aus denen der Nutzen des Ansatzes deutlich wird.

2.6 Anmerkungen zu Abschnitt 5.1.3: Bruchzähigkeit – Werkstoffwahl zur Vermeidung von Sprödbruch

2.6.1 Allgemeines

Die Regelungen zur Werkstoffwahl zur Vermeidung von Sprödbruch in DIN EN 1993-1-4 waren bisher unzureichend. Für nichtrostende austenitische Stähle waren sie nicht umfassend und für nichtrostende Duplex- und ferritische Stähle nicht korrekt. Für nichtrostende ferritische Stähle verweist DIN EN 1993-1-4 auf DIN EN 1993-1-10 [57], was schlichtweg falsch ist, da DIN EN 1993-1-10 nichtrostende ferritische Stähle überhaupt nicht abdeckt. Die der DIN EN 1993-1-10 hinterlegte Master Curve wurde nicht auf ihre Gültigkeit für nichtrostende ferritische Stähle überprüft. Hier herrschte also dringender Handlungsbedarf, in prEN 1993-1-4 eine experimentell und wissenschaftlich abgesicherte Regelung zu entwickeln und zu implementieren. Da DIN EN 1993-1-10 auf Kohlenstoffstähle be-

schränkt ist, wurde sich zwischen den auf europäischer Ebene tätigen Working Groups für die beiden europäischen Normen EN 1993-1-4 und EN 1991-1-10 darauf verständigt, dass dezidierte Regelungen zur Vermeidung von Sprödbuch für nichtrostende Stähle in EN 1993-1-4 enthalten sein sollen.

Aufgrund der unterschiedlichen Mikrostruktur der drei nichtrostenden Stahlfamilien (Austenit, Duplex und Ferrit) weisen sie auch ein unterschiedliches Verhalten in Bezug auf Sprödbuch auf, was in der Folge dazu führt, dass für die Stahlfamilien auch unterschiedliche Regelungen zur Vermeidung von Sprödbuch erforderlich sind.

2.6.2 Nichtrostende austenitische Stähle

Nichtrostende austenitische Stähle weisen in ihrem Grundmaterial per se erst einmal ein gutmütiges Tieftemperaturverhalten auf, da sie keine Übergangstemperatur besitzen, bei der es zum Abfall der Kerbschlagarbeit und damit der Zähigkeit bei tiefen Temperaturen kommt. Für Betriebstemperaturen bis -50°C kann davon ausgegangen werden, dass nichtrostende austenitische Stähle eine ausreichende Zähigkeit aufweisen, sodass keine weiteren Betrachtungen erforderlich sind. prEN 1993-1-4 macht hier allerdings eine Ausnahme für die Stähle 1.4301, 1.4307, 1.4311, 1.4318 und 1.4306 mit einer Blechdicke > 10 mm im stark kaltverfestigten Zustand. Für diese niedrig legierten austenitischen Stähle („Lean Austenite“) besteht bei der Kaltumformung die Gefahr der Umwandlung von Austenit in Martensit, was die Zähigkeit im umgeformten Bereich verringern könnte. Dies tritt bei den höher legierten austenitischen Stählen nicht auf. Aus diesem Grund ist für diese Stähle im kaltverfestigten Zustand die Kerbschlagarbeit mit den Werten nachzuweisen, die in DIN EN 10088-4 und -5 für die Stahlsorten im nicht kaltverfestigten Zustand gefordert werden. Bei Betriebstemperaturen kleiner als -50°C ist nachzuweisen, dass nach allen Fertigungsschritten die Kerbschlagarbeit bei der Betriebstemperatur mindestens 40 J beträgt. Mit diesen spezifischeren Regeln soll sichergestellt werden, dass die verfügbare Zähigkeit beim Schweißen, der Wärmebehandlung und/oder der Kaltumformung des Grundmaterials nicht abnimmt.

2.6.3 Nichtrostende ferritische Stähle

Nichtrostende ferritische Stähle können sich wie Kohlenstoffstähle spröde verhalten, werden i. d. R. aber nur in Dicken bis 5 mm eingesetzt. Dies ist auch der untere Grenzwert für die Blechdicke, der in den Tabellen mit den zulässigen Blechdicken der DIN EN 1993-1-10 für Kohlenstoffstähle verwendet wird. Bei größeren Blechdicken bleibt derzeit nichts anderes übrig, als eine gesonderte Betrachtung auf bruchmechanischer Basis nach dem verwendeten Modell der DIN EN 1993-1-10 durchzuführen.

2.6.4 Nichtrostende Duplex-Stähle

Nichtrostende Duplex-Stähle werden bereits heutzutage vermehrt als tragende geschweißte Bauteile in Brücken mit großen Bauteildicken zum Einsatz in kalten Umgebungen eingesetzt, in denen sie Ermüdungsbeanspruchungen ausgesetzt sind. Da nichtrostende Duplex-Stähle ein Temperaturübergangsverhalten aufweisen, das mit dem von Kohlenstoffstählen vergleichbar ist, ist es insbesondere wichtig, Regelungen zur Werkstoffwahl zur Vermeidung von Sprödbuch für diese Stahlsorten zu entwickeln: sie haben eine hohe Zähigkeit bei „normalen“ Umgebungstemperaturen, eine niedrige Zähigkeit bei sehr niedrigen Temperaturen und ein Temperaturübergangsbereich dazwischen. Die Produktnormen für nichtrostende Stähle DIN EN 10088-4 und DIN EN 10088-5 legen die erforderliche Mindest-Charpy-Zähigkeiten nur bei Raumtemperatur fest, z. B. beträgt für Bleche und Bänder aus 1.4362 und 1.4462 die Mindest-Charpy-Zähigkeit 100 J in Längsrichtung und 60 J in Querrichtung. Im Rahmen zukünftiger Überarbeitungen der DIN EN 10088-4 und -5 sollten dringend Mindest-Charpy-Zähigkeitswerte bei niedrigen Temperaturen aufgenommen werden – vergleichbar zu den Regelungen für Baustähle nach der Normenfamilie der DIN EN 10025.

Langenberg et al. [58] haben erstmals untersucht, ob das der DIN EN 1993-1-10 zugrunde gelegte bruchmechanische Berechnungsmodell [59, 60] einschließlich des Wallin Master Curve-Konzepts auch auf Bauteile aus nichtrostendem Duplex-Stahl anwendbar ist. Hierzu wurden Kerbschlagbiege- und Bruchmechanikversuche an den nichtrostenden Duplex-Stählen 1.4462, 1.4362 und 1.4162 mit einer Dicke von 30 mm und 50 mm für Grundwerkstoffe und Schweißnähte ausgewertet. Auf dieser Basis wurden erstmalig maximal zulässigen Erzeugnisdicken für das der DIN EN 1993-1-10 hinterlegte Konstruktionsdetail des Brückenträgers mit Quersteife (s. Bild 6), ermittelt [58].

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Baustahl und nichtrostendem Duplex-Stahl besteht – wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits ausgeführt – u. a. darin, dass nichtrostender Duplex-Stahl keine ausgeprägte Streckgrenze wie die meisten Kohlenstoffstähle hat, sondern eine kontinuierliche Streckgrenze besitzt und bereits unterhalb der 0,2%-Dehngrenze nichtlineares Materialverhalten aufweist. Dies ist bei der Ermittlung der zulässigen Blechdicke zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden von Langenberg et al. [58] differenzierte Untersuchungen zum Einfluss einer ausgeprägten und kontinuierlichen Streckgrenze am Beispiel eines Baustahls und Duplex-Stahls mit jeweils einer Streckgrenze von 460 MPa, einem Elastizitätsmodul von 200 000 MPa und einer T_{27J} -Temperatur von -50°C durchgeführt. Die Berücksichtigung von Stählen mit ausgeprägter und kontinuierlicher Streckgrenze erfolgt dabei durch die Zugrundelegung unterschiedlicher Grenzkurven im Fatigue Assessment Diagramm (FAD) [58]. Die Grenzkurve für kontinuierliches Fließen fällt

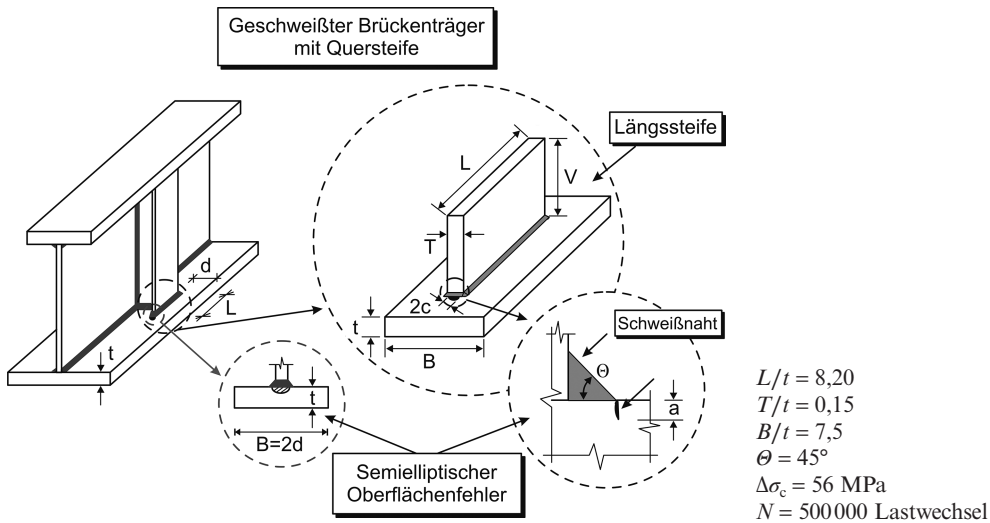


Bild 6. Grundlegendes Detail der DIN EN 1993-1-10: Typischer Brückenträger mit Quersteife und semielliptischem Oberflächenfehler am Rand der Schweißnaht (s. a. [58–60])

oberhalb des Niveaus von $L_r = 0,5$ (mit L_r : Plastizitätsparameter) schneller ab als die für eine ausgeprägte Fließgrenze. Damit ergibt sich für kleinere zulässige Blechdicken ein geringerer Wert der normalisierten Rissantriebskraft K_r [58]. Die Untersuchung hat gezeigt, dass für einen Werkstoff mit ausgeprägter Streckgrenze eine gute Übereinstimmung zwischen den erzielten zulässigen Blechdicken und den in DIN EN 1993-1-10 ausgewiesenen zulässigen Blechdicken gefunden werden kann. Die für den Werkstoff mit kontinuierlicher Streckgrenze durchgeführte Analyse ergab etwa 10% geringere zulässige Blechdicken beim höchsten Spannungsniveau der DIN EN 1993-1-10 von $0,75 f_y$, bei dem Spannungsniveau $0,5 f_y$ ergaben sich nur noch geringfügig geringere zulässige Blechdicken und bei der niedrigsten Spannung von $0,25 f_y$ war der Unterschied vernachlässigbar.

Auf dieser Basis wurden in Anlehnung an den aktuellen Bearbeitungsstand der prEN 1993-1-10 [61] die zulässigen Erzeugnisdicken für Duplex-Stähle in Abhängigkeit von vier Bruchzähigkeitsanforderungen TR1 bis TR4 ermittelt. Die Bruchzähigkeitsanforderung beschreibt dabei die Mindest-Kerbschlagarbeit bei einer bestimmten Temperatur, die vom Werkstoff erfüllt sein muss. In den Tabellen 5.3 und 5.4 der prEN 1993-1-4 sind die resultierenden Erzeugnisdicken getrennt für die Ausführungsklassen EXC3/4 und EXC1/2 zusammengestellt. Hierbei wurden die maximal zulässigen Erzeugnisdicken für EXC1/2 auf Grundlage von 50000 Lastwechseln und für EXC 3/4 auf Grundlage von 500 000 Lastwechseln abgeleitet. Da für nichtrostenden Duplex-Stahl bisher keine Großbauteilversuche zur Verifizierung des für Baustahl angewandten Sicherheitsbeiwerts von $\Delta T_R = +7 \text{ K}$, [59–61], vorliegen, wurde der Sicherheitsbeiwert auf $\Delta T_R = +0 \text{ K}$ erhöht.

Die Angaben zu den zulässigen Erzeugnisdicken in den Tabellen 5.3 und 5.4 gelten nicht für kaltgeformte Profile und Bleche aus Duplex-Stahl, da für diese bisher keine Untersuchungen vorliegen.

Weitere Untersuchungen zum Spröbruchverhalten von nichtrostendem Duplex-Stahl laufen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags in einem Forschungsvorhaben am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen [62]. In diesem Forschungsvorhaben soll die Anwendbarkeit des bruchmechanischen Konzepts der DIN EN 1993-1-10 für nichtrostenden Duplex-Stahl auf eine breitere Basis gestellt werden. Die zulässigen Erzeugnisdicken der prEN 1993-1-4 werden mit den Ergebnissen des laufenden Forschungsvorhabens kontinuierlich abgeglichen und, falls erforderlich, noch vor der Veröffentlichung der prEN 1993-1-4 angepasst.

2.7 Anmerkungen zu Abschnitt 5.1.4: Eigenschaften in Dickenrichtung

DIN EN 1993-1-4 verweist fälschlicherweise hinsichtlich der Eigenschaften in Dickenrichtung auf DIN EN 1993-1-10, deren Regelungen allerdings nur auf Baustähle aus Kohlenstoffstahl anzuwenden sind. Dies wurde jetzt in prEN 1993-1-4 korrigiert.

Nichtrostende austenitische und Duplex-Stähle weisen keine Terrassenbruchgefahr auf, weshalb für diese auch keine Regelungen angegeben werden müssen. Untersuchungen an nichtrostenden austenitischen und Duplex-Stählen (1.4307, 1.4462, 1.4162 und 1.4404) mit Dicken zwischen 10 mm und 130 mm haben gezeigt [63], dass die Z-Werte der Brucheinschnürung nach DIN EN 10164 [64] bei über 1000 Versuchen in allen Fällen über 50% und im Durchschnitt zwischen 54%

und 75% lagen. Daraus lässt sich schließen, dass für diese Stähle die höchste Anforderung an Baustähle mit der Güteklasse Z35 und einem Z-Wert von 35% problemlos und routinemäßig bei der Produktion erfüllt werden kann. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Anwendungsbereich von DIN EN 10164 explizit nichtrostende Stähle ausschließt. Da aber keine vergleichbare Norm für nichtrostende Stähle zur Verfügung steht, wurde diese dennoch für die Durchführung und Bewertung der Versuche herangezogen.

Für nichtrostende ferritische Stähle gibt es keine vergleichbaren Untersuchungen. Aufgrund des geringen Schwefelgehalts nichtrostender (ferritischer) Stähle ist das Auftreten von Terrassenbrüchen jedoch unwahrscheinlich. Ferner ist auch nur die ferritische Sorte 1.4003 in großem Umfang in Form von Blechen erhältlich. Sie wird aber selten in Dicken von mehr als 20 mm verwendet. Auch wenn es höchst unwahrscheinlich ist, dass nichtrostende ferritische Stähle in Bauteilen eingesetzt werden, in denen Terrassenbrüche auftreten können, schien es dennoch erforderlich, in prEN 1993-1-4 einen Verweis auf prEN 1993-1-10 bezüglich der Auswahl der Eigenschaften in Dickenrichtung zu geben. Der Verweis ist allerdings nur bedingt hilfreich, da prEN 1993-1-10 wiederum auf DIN EN 10164 verweist und diese für nichtrostende Stähle „eigentlich“ nicht anwendbar ist, siehe Ausführungen zuvor.

2.8 Werkstoffauswahl und Dauerhaftigkeit (Anhang A der prEN 1993-1-4:2022)

Die Werkstoffauswahl und Dauerhaftigkeit wird im Anhang A der prEN 1993-1-4 geregelt. Dies war so auch in DIN EN 1993-1-4 der Fall. Gegenüber den Regelungen in DIN EN 1993-1-4 haben sich nur wenige Änderungen ergeben, weswegen auf eine Wiedergabe der Regelungen in Form „neuer Normentext“ hier verzichtet wird. Da die Regelungen allerdings von besonderer Bedeutung für die Praxis im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit einer Konstruktion aus nichtrostendem Stahl sind, sollen die Regelungen an dieser Stelle dennoch umfangreich erläutert werden. Auf die wenigen Änderungen in prEN 1993-1-4 im Vergleich zur DIN EN 1993-1-4 wird dabei an entsprechender Stelle jeweils eingegangen.

Der Hauptgrund, sich für die Verwendung des im Verhältnis zum Baustahl wesentlich teureren nichtrostenden Stahls zu entscheiden, ist seine gute Korrosionsbeständigkeit. Das Erscheinungsbild bei optischen Anforderungen bleibt lange erhalten und ein aufwendiger Korrosionsschutz mit Ausbesserungen während der Lebensdauer entfällt. Leider zeigt die Praxis immer wieder, dass diese Erwartungen nicht erfüllt werden, da grundlegende Dinge bei der Werkstoffauswahl nicht beachtet wurden. prEN 1993-1-4, Anhang A regelt die Vorgehensweise bei der Auswahl geeigneter nichtrostender Stahlsorten für tragende Bauteile in Bezug auf die Korrosionsbeständigkeit. Nicht berücksichtigt werden in prEN 1993-1-4, Anhang A dabei:

- Verfügbarkeit der Stahlsorte und Erzeugnisformen,
- Anforderungen an die Oberfläche, z. B. aus architektonischer Sicht oder aus Hygienegründen und
- verwendete Füge- und Verbindungsverfahren.

Die endgültige Ausführung der Oberfläche kann einen erheblichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit haben. Je glatter die Oberfläche ist und je geringer die Rautiefen sind, umso höher ist der Widerstand gegen Korrosion. Wenn bestimmte optische Anforderungen an Bauteile bestehen, sollte die dafür geeignete Oberflächenbeschaffenheit nach DIN EN 10088-4 oder DIN EN 10088-5 spezifiziert werden, siehe dazu auch Abschnitt 7.3.1.

Im Anhang A der prEN 1993-1-4 wird vorausgesetzt, dass bei Anwendung der Norm folgende Bedingungen erfüllt sind:

- in der betrachteten Umgebung herrscht ein annähernd neutraler pH-Bereich von pH 4 bis pH 10,
- die Bauteile sind nicht Bestandteil von chemischen Prozessanlagen oder chemischen Prozessen ausgesetzt und
- die Bauteile sind nicht ständig oder häufig in Kontakt mit Meerwasser.

Falls die Bedingungen nicht erfüllt sind, wird empfohlen, den Rat eines Experten einzuholen.

prEN 1993-1-4 behandelt nicht den Einsatz von nichtrostenden Stählen in Beton, Mauerwerk und Holz. Damit betrifft die Einschränkung des Einsatzes der prEN 1993-1-4 auf eine Umgebung mit einem maximalen pH-Wert von pH 10 auch nicht diesen Einsatzbereich (Beton, Mauerwerk und Holz), in dem höhere pH-Werte vorhanden sind. Langjährige Erfahrungen und umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass nichtrostende Stähle sehr wohl für Bewehrungen und Verankerungen in diesem Bereich gut geeignet sind, was in der abZ/aBG Z-30.3-6 Berücksichtigung findet. Um nichtrostende Stähle für Befestigungen in Beton oder Mauerwerk einsetzen zu können, sind DIN EN 1992-1-1 [65] und DIN EN 1996-1-1 [66], jeweils in Verbindung mit den Nationalen Anhängen, bei der Werkstoffauswahl zu beachten. Entsprechendes gilt für die Anwendung in Kombination mit Holz.

Für die Festlegung geeigneter Stahlsorten ist die Exposition der Bauteile gegenüber bestimmten Umwelteinflüssen zu bestimmen. prEN 1993-1-4 verwendet dafür ein Punktesystem, auf welches nachfolgend näher eingegangen wird.

Das Verfahren zur Werkstoffauswahl erfolgt in drei Schritten:

- Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors CRF,
- Ermittlung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC in Abhängigkeit vom Korrosionsbeständigkeitsfaktor und
- Auswahl einer Stahlsorte, die mindestens der ermittelten Korrosionsbeständigkeitsklasse zugeordnet ist. Stähle aus einer höheren Korrosionsbeständigkeitsklasse zu verwenden ist möglich, aber in der Regel nicht wirtschaftlich.

Grundsätzlich wird in Innen- und Außenbereiche unterschieden. Als Innenbereich gelten beheizte und/oder belüftete geschlossene Räume. Gebäude mit großen Öffnungen, wie z. B. Parkhäuser und Verladerrampen zählen in der Regel nicht dazu. Zum Außenbereich gehören alle Bereiche, die nicht dem Innenbereich zuzuordnen sind. Für die Verwendung von nichtrostenden Stählen in Schwimmhallenatmosphäre gelten spezielle Anforderungen, die im Weiteren noch erläutert werden. Der Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF ist abhängig von der die Bauteile umgebenden Atmosphäre und wird wie folgt bestimmt:

$$CRF = F_1 + F_2 + F_3.$$

Dabei ist

- F_1 das Risiko der Exposition gegenüber Chloriden aus Salzwasser oder Auftausalzen. Bei Meerwasser spielen dabei die entsprechende Küstenregion in Europa und der Abstand zum Meer eine Rolle. Ebenfalls Einfluss hat die Hauptwindrichtung und ob sich z. B. Bauwerke, Wald oder Geländeerhebungen zwischen dem Meer und den Bauteilen befinden, was aber aus Gründen der Handhabbarkeit nicht weiter berücksichtigt wird
- F_2 das Risiko der Exposition gegenüber Schwefeldioxid, z. B. durch Industrie oder Abgase, und die Reinigungsvorgaben oder die Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen
- F_3 die Reinigungsvorgaben oder die Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen

Für die Bestimmung von F_1 , F_2 und F_3 gilt Tabelle 7. Der Wert von F_1 für Anwendungen an der Küste hängt vom jeweiligen Standort in Europa ab und wird aus Erfahrungen mit bestehenden Konstruktionen, Korrosionstestdaten und Chloridverteilungsdaten abgeleitet. Die große Bandbreite an Umgebungen in Europa bedeutet, dass der berechnete Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF in einigen Fällen konservativ sein kann. Bei der Bewertung sollten Faktoren berücksichtigt werden, die die Chloridablagerung verringern können, wie z. B. die Nähe zum offenen Meer, der Schutz durch die Topografie des Geländes oder durch Bauwerke, die vorherrschende Windrichtung und die Aktivität von brechenden Wellen. Im Nationalen Anhang kann daher festgelegt werden, ob eine weniger strenge CRF -Einstufung gewählt werden darf, wenn gesicherte lokale Betriebserfahrungen oder Testergebnisse dieses rechtfertigen.

Zu beachten ist, dass sich für unterschiedliche Teile einer Konstruktion verschiedene CRF -Einstufungen ergeben können, z. B. wenn einige Bereiche Regen ausgesetzt sind und andere nicht. Jeder Expositionsfall sollte daher separat bewertet werden.

Das Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC gilt nur für den Baubereich und setzt voraus, dass die Bauteile frei sind von Anlauffarben, Fremdstoffen erzeugenden Partikeln usw., s. Abschnitt 7.3.11. In Tabelle 8 sind die verschiedenen Stahlsorten den fünf Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC

I bis V (für geringe bis sehr starke Korrosionsbelastung) in Abhängigkeit vom Korrosionsbeständigkeitsfaktor CRF zugeordnet. Eine Übertragung auf Gebiete außerhalb Europas ist nicht ohne Weiteres möglich.

Gegenüber der aktuellen Ausgabe der DIN EN 1993-1-4 wurden in prEN 1993-1-4 drei ferritische nichtrostende Stähle in die Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC II zusätzlich aufgenommen, womit für einen großen Anwendungsbereich kostengünstige Alternativen gegenüber den austenitischen und Duplex-Stahlsorten gewählt werden können. Weiterhin haben Untersuchungen gezeigt, dass die Duplex-Stahlsorte 1.4662 aus CRC III in CRC IV aufrücken kann.

Es folgt eine Beispielrechnung für die Auswahl geeigneter Stahlsorten für Befestigungselemente von Kabeltrassen in einem nicht zwangsbelüfteten Straßentunnel, bei dem Auftausalze eingesetzt oder eingetragen werden können:

- $F_1 = -10$ (Straßentunnel mit Einsatz von Auftausalzen),
- $F_2 = -5$ (mittleres Expositionsrisiko für Schwefeldioxid durch Fahrzeugabgase, da ohne Zwangsbelüftung) und
- $F_3 = -7$ (keine Reinigung, kein Abwaschen durch Regen).

Damit folgt: $CRF = -10 - 5 - 7 = -22$. Daraus ergibt sich die Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC V mit den zugehörigen Stahlsorten nach Tabelle 8.

Exemplarisch sind die Auswirkungen einer falschen Werkstoffauswahl in Bild 7 dargestellt. Für die dort gezeigten Komponenten einer Verbindung aus einem Straßentunnel wurden die in Tabelle 9 aufgelisteten Stahlsorten verwendet. Dieses Beispiel zeigt, dass die Auswahl ungeeigneter Stahlsorten die Tragsicherheit von Konstruktionen durchaus gefährden kann.

Eine ganz besondere Aufmerksamkeit erfordert die Auswahl von nichtrostenden Stahlsorten für den Einsatz in Schwimmhallen. Aufgrund der möglichen hohen Chloridgehalte in Schwimmhallenatmosphären besteht die Möglichkeit der flächigen Korrosion, des Lochfraßes und der Spaltkorrosion, allerdings nicht – wie fälschlicherweise in DIN EN 1993-1-4 angegeben – nur die Gefahr der Spannungsrissskorrosion (spontanes Ver-



Bild 7. Komponenten einer Befestigung aus einem Straßentunnel bei falscher Werkstoffauswahl (© Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin)

sagen unter Zugbeanspruchung). Der diesbezügliche Hinweis in DIN EN 1993-1-4 wurde in prEN 1993-1-4 entfernt. Ferner war der Ausschluss der in DIN EN 1993-1-4 benannten Duplex-Stähle in der Kategorie der tragenden Bauteile mit regelmäßiger Reinigung nicht korrekt. Bei diesen Bauteilen ist die Chlorid-Konzent-

ration sehr gering, sodass die Initiierung von Lochfraß ebenfalls sehr gering und das Risiko der Spannungsrisikokorrosion bei den Duplex-Stählen nahezu gar nicht gegeben ist. Für die Auswahl der in Schwimmhallenatmosphäre verwendbaren Stahlsorten gelten die Angaben in Tabelle 10.

Tabelle 7. Bestimmung des Korrosionsbeständigkeitsfaktors $CRF = F_1 + F_2 + F_3$ nach prEN 1993-1-4

Risiko der Exposition gegenüber Chloriden aus Salzwasser oder Auftausalzen (Streusalz), F_1

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 mit Einsatz von Auftausalzen oder wo Fahrzeuge Auftausalze in den Tunnel mit einbringen können.
-10	sehr hohes Expositionsrisiko	$M \leq 0,25 \text{ km}$ ^{a)} Nordseeküste Deutschlands und alle Küstenregionen der Ostsee.
-15	sehr hohes Expositionsrisiko	$M \leq 0,25 \text{ km}$ ^{a)} Atlantikküste Portugals, Spaniens und Frankreichs. Küste des Ärmelkanals und der Nordseeregionen des Vereinigten Königreichs, Frankreichs, Belgiens, den Niederlanden und Südschwedens. Alle anderen Küstenregionen des Vereinigten Königreichs, Norwegens, Dänemarks und Irlands. Mittelmeerküste.

Anmerkung: M ist der Abstand vom Meer und S ist der Abstand von Straßen mit Einsatz von Auftausalzen.

^{a)} Die Entfernung $M < 0,25 \text{ km}$ setzt voraus, dass das Bauwerk nicht durch die Bodentopografie geschützt ist. Wenn die Topografie einen teilweisen Schutz für das Bauwerk bietet, kann erfahrungsgemäß eine Stahlsorte von einer Korrosionsbeständigkeitsklasse niedriger verwendet werden. Beispiele für einen solchen Schutz sind Bauwerke über Buchten oder Flussmündungen mit begrenzter Wellenhöhe, physische Barrieren wie Bäume, Hügel und andere Gebäude innerhalb der 0,25-km-Zone.

Risiko der Exposition gegenüber Schwefeldioxid, F_2

0	niedriges Expositionsrisiko	Mittelwert der Gaskonzentration $< 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$
-5	mittleres Expositionsrisiko	Mittelwert der Gaskonzentration $10\text{--}90 \mu\text{g}/\text{m}^3$
-10	hohes Expositionsrisiko	Mittelwert der Gaskonzentration $90\text{--}250 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Anmerkung: In den europäischen Küstenregionen ist die Schwefeldioxidkonzentration üblicherweise gering. Im Landesinneren ist die Schwefeldioxidkonzentration entweder gering oder mittel. Ein hohes Expositionsrisiko ist ungewöhnlich und stets mit besonderen Standorten der Schwerindustrie oder spezifischen Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Straßentunneln, verbunden. Die Schwefeldioxidkonzentration darf in Übereinstimmung mit dem Verfahren in EN ISO 9225 [65] bewertet werden. Ferritische nichtrostende Stähle zeigen eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Schwefeldioxid.

Reinigungskonzept oder Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen, F_3

0	Vollständige Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen
-2	Spezifische Reinigungsvorgaben
-7	Kein Abwaschen durch Regen oder keine spezifische Reinigung

Anmerkung 1: Wenn $F_1 + F_2 \geq 0$, dann ist $F_3 = 0$.

Anmerkung 2: 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 eine Reinigung festgelegt, sollte sie für alle Teile des Bauwerks gelten und nicht nur für die leicht zugänglichen und gut sichtbaren Bauteile.

Tabelle 8. Zuordnung der Stahlsorten zu den Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC in Abhängigkeit vom Korrosionsbeständigkeitsfaktor *CRF* nach prEN 1993-1-4

<i>CRF</i>	CRC ^{a), b), c)}	Stahlsorte	Gefügeart		
<i>CRF</i> = 1	I gering	1.4003	ferritisch		
		1.4016	ferritisch		
		1.4512	ferritisch		
0 ≥ <i>CRF</i> > -7	II mäßig	1.4301	austenitisch		
		1.4306	austenitisch		
		1.4307	austenitisch		
		1.4311	austenitisch		
		1.4318	austenitisch		
		1.4482	austenitisch-ferritisch		
		1.4541	austenitisch		
		1.4567	austenitisch		
		1.4621	ferritisch		
		1.4622	ferritisch		
		1.4509	ferritisch		
		1.4521	ferritisch		
-7 ≥ <i>CRF</i> > -15	III mittel	1.4062	austenitisch-ferritisch		
		1.4162	austenitisch-ferritisch		
		1.4362	austenitisch-ferritisch		
		1.4401	austenitisch		
		1.4404	austenitisch		
		1.4429	austenitisch		
		1.4432	austenitisch		
		1.4435	austenitisch		
		1.4571	austenitisch		
		1.4578	austenitisch		
		-15 ≥ <i>CRF</i> ≥ -20	IV stark	1.4439	austenitisch
				1.4462	austenitisch-ferritisch
1.4539	austenitisch				
1.4662	austenitisch-ferritisch				
<i>CRF</i> < -20	V sehr stark	1.4410	austenitisch		
		1.4501	austenitisch		
		1.4507	austenitisch		
		1.4529	austenitisch		
		1.4547	austenitisch		
		1.4565	austenitisch		

- a) Die Stahlsorte einer höheren Klasse darf anstelle der durch den *CRF* vorgegebenen Klasse verwendet werden.
- b) Die Korrosionsbeständigkeitsklassen sind nur für die Anwendung mit diesem Auswahlverfahren für Stahlsorten vorgesehen und gelten nur für Konstruktionen mit tragender Funktion.
- c) Die Bruchzähigkeit von ferritischen nichtrostenden Stählen sollte für externe Anwendungen nachgewiesen werden.

Tabelle 9. Stahlsorten mit zugehöriger Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC der Befestigungskomponenten aus Bild 7

Komponente	Stahlsorte	CRC	Einschätzung
Schraube	1.4567	II	keine ausreichende CRC gewählt; es ist starke, die Tragfähigkeit gefährdende Korrosion aufgetreten
Mutter	1.4301	II	
Rechteckscheibe	1.4404	III	
Unterlegscheibe	1.4529	V	richtige Auswahl, keine Korrosion

Neben der Wahl der Stahlsorten aus den zutreffenden Korrosionsbeständigkeitsklassen sind zur Vermeidung von Korrosionsschäden zusätzlich konstruktive Gesichtspunkte zu beachten. Ist z. B. eine regelmäßige Reinigung oder Abwaschen durch Regen berücksichtigt, müssen auch alle Bauteile, die der Korrosionsbeanspruchung ausgesetzt sind, bei der Reinigung oder durch den Regen erreicht werden. Weiterhin ist schon bei der Planung zu beachten, dass es nicht zur Kontaktkorrosion kommen kann. Die elektrisch leitende Verbindung von unterschiedlichen Metallen sollte vermieden werden, wenn in diesem Bereich Feuchtigkeit (Elektrolyt) auftreten kann (z. B. auch durch Kondensation) und die Fläche des unedleren Metalls nicht sehr groß ist gegenüber der Fläche des edleren Metalls (in den meisten Fällen der nichtrostende Stahl). So können zwar Schrauben aus nichtrostenden Stählen in der Regel zur Verbindung von feuerverzinkten Stahlbauteilen eingesetzt werden, aber nicht umgekehrt. Da insbesondere bei der Ausführung von Konstruktionen die Kontaktkorrosion verhindert werden soll, wird in Abschnitt 7.3.13 ausführlich darauf eingegangen.

Zur Vermeidung von interkristalliner Korrosion (IK) sollten dickwandige Schweißteile nicht aus IK anfälligen Stählen (Kohlenstoffgehalt > 0,03%, die nicht mit Titan stabilisiert sind), wie 1.4016, 1.4301, 1.4401 und 1.4420 hergestellt werden. Eine Grenzdicke festzulegen ist schwierig, da dabei mehrere Faktoren eine Rolle spielen. Materialstärken bis 10 mm gelten aber nicht als kritisch.

Um eine langfristige Korrosionsbeständigkeit zu erzielen und optische Anforderungen dauerhaft zu erfüllen, ist eine sorgfältige Ausführung der Bauteile und Konstruktionen aus nichtrostenden Stählen, wie in Abschnitt 7 beschrieben, unerlässlich.

2.9 Verbindungsmittel

2.9.1 Mechanische Verbindungsmittel

Zur kraftübertragenden mechanischen Verbindung von Bauteilen aus nichtrostenden Stählen kommen in der Regel Schrauben, Muttern und Scheiben aus nichtrostenden Stählen zum Einsatz. Während sie ebenso zum Fügen von Baustahlkomponenten geeignet sind, ist von

Tabelle 10. Stahlsorten für Schwimmhallenatmosphäre nach prEN 1993-1-4

Tragende Bauteile in Schwimmhallenatmosphäre	Korrosionsbeständigkeitsklasse (CRC)
Tragende Bauteile, die regelmäßig gereinigt werden	CRC III oder CRC IV
Tragende Bauteile, die nicht regelmäßig gereinigt werden	CRC V (außer 1.4410, 1.4501 und 1.4507)
Alle Befestigungs-, Verbindungsmittel und Gewindeteile	CRC V (außer 1.4410, 1.4501 und 1.4507)

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

Der Nationale Anhang ist im Hinblick auf abweichende und/oder ergänzende Regelungen zu beachten.

der Verwendung von Schrauben und Muttern aus Kohlenstoffstählen in Verbindung mit nichtrostenden Stahlbauteilen, auch beim Anschluss an Teile aus Baustählen, abzuraten, da es hier leicht zu Bimetallkorrosion kommen kann.

Wie allgemein üblich, werden auch bei Schrauben aus nichtrostendem Stahl die Gewinde entweder zerspanend oder umformend hergestellt. Beim Zerspanen erfolgt ein Herausschneiden des Gewindes aus dem Material, was insbesondere bei nicht mehr scharfen Schneidwerkzeugen zu einer rauen Oberfläche führen kann. Damit sind solche Schrauben anfälliger gegen Fressen und Korrosion als Schrauben mit glatt ausgeführten Gewinden. Ein Gewindeschneiden ist heutzutage nur noch bei Kleinserien und Sonderanfertigungen üblich. Das gängigste Verfahren ist das Gewinderollen. Dabei wird das Gewinde spanlos in das Material eingeformt. Gerollte Gewinde haben in der Regel eine glatte Oberfläche. Durch das Umformen kommt es beim Rollprozess zu einer deutlichen Kaltverfestigung im Gewindebereich, insbesondere bei Schrauben aus nichtrostendem austenitischem Stahl. Das hat zur Folge, dass bei Schrauben aus nichtrostendem austenitischem Stahl die Tragfähigkeit im Gewindeteil höher ist als im Bereich des glatten Schaftes, obwohl der Schaftquerschnitt größer ist als der Spannungsquerschnitt des Gewindes. Bild 8 zeigt eine Schraube M16 × 80 A2-70 vor und nach dem Zugversuch. Im Gegensatz zu einer Schraube aus Kohlenstoffstahl trat hier das Versagen im Schaft- und nicht im Gewindebereich auf. Bei Schrauben, die

mittels Schneiden hergestellt werden, führt dies natürlich zwangsläufig auch zu anderen Eigenschaften der Schrauben.

Schrauben und Muttern aus nichtrostendem Stahl sind in DIN EN ISO 3506-1 [68] und -2 [69] geregelt. Die Normen enthalten Angaben zu den mechanischen Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung von Schrauben und Muttern aus nichtrostenden ferritischen (Stahlgruppe F), austenitischen (Stahlgruppe A), austenitisch-ferritischen (Duplex, Stahlgruppe D) und martensitischen (Stahlgruppe C) Stählen. Damit sind in DIN EN ISO 3506-1 und -2 erstmals auch Schrauben und Muttern aus Duplex-Stählen sowie höhere Festigkeitsklassen als 80 geregelt, was in der Praxis bereits seit längerer Zeit zur Anwendung kommt. Für die Verwendung im Baubereich sind von den aufgeführten Stahlsorten bisher nur die Schrauben und Muttern aus austenitischen Stählen zulässig, da die bauaufsichtlich eingeführte Schirmproduktnorm für nicht vorspannbare Garnituren, DIN EN 15048-1 aus dem Jahre 2007 [70], noch keine Garnituren aus Duplex-Stählen berücksichtigt. Es ist aber davon auszugehen, dass bei einer Überarbeitung der Normen auch Schrauben und Muttern aus Duplex-Stählen aufgrund ihrer guten Eigenschaften dort mit aufgenommen werden. Technisch spricht nichts dagegen, SB-Schraubengarnituren aus Duplex-Stählen im bauaufsichtlichen Bereich einzusetzen. In Deutschland sind derartige Verbindungselemente bereits in der abZ/aBG Z-30.3-6 geregelt.

In DIN EN ISO 3506-1 und -2 werden die relevanten Schraubenwerkstoffe in die Stahlsorten F1, A1 bis A8 und D2 bis D8 eingeteilt. Diese sind sie jedoch nicht mit konkreten Werkstoffnummern untersetzt, sondern es gibt vorgegebene Grenzwerte bei der chemischen Zusammensetzung. Damit gibt es keine eindeutige Übereinstimmung mit der Einteilung der Stähle in Korrosionsbeständigkeitsklassen. In Tabelle 11 erfolgt eine Zuordnung der im Baubereich gängigen Stahlsorten zu den Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC I bis V, wobei Überschneidungen nicht ausgeschlossen sind.

Die Einstufung der verschiedenen Schrauben-Festigkeiten erfolgt in die Festigkeitsklassen 50, 70, 80 und 100 mit den in prEN 1993-1-4, Tabelle 5.5 angegebenen

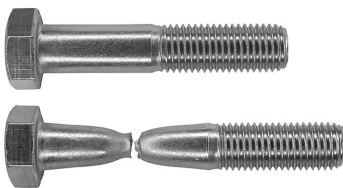


Bild 8. Schraube M16 × 80 A2-70 aus nichtrostendem austenitischem Stahl vor und nach dem Zugversuch
(© ibvm, Fredersdorf)

Tabelle 11. Zuordnung der Schrauben-Stahlsorten zu den Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC der prEN 1993-1-4

Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC	Austenitisch	Duplex
I	–	–
II	A2/A3	–
III	A4/A5	D4
IV	A8	D6
V	A8	D8

charakteristischen Festigkeitskennwerten. Die Festigkeitsklassen weichen damit von den für Schrauben aus Kohlenstoffstahl üblichen Klassen 4.6, 5.6, 8.8 und 10.9 deutlich ab.

In grober Näherung können die Festigkeitsklassen der Schrauben aus nichtrostendem Stahl mit denen der Schrauben aus Kohlenstoffstahl wie folgt verglichen werden:

- 50 entspricht in etwa 4.6,
- 70 entspricht in etwa (großzügig) 5.6,
- 80 entspricht in etwa 8.8 und
- 100 entspricht in etwa 10.9.

prEN 1993-1-4 empfiehlt, dass die Korrosionsbeständigkeit von Schrauben, Muttern und Scheiben mindestens gleich oder höher sein sollte als jene der verbundenen Bauteile. Bisher waren nach der Vorgängerversion der aktuellen DIN EN ISO 3506-1 und -2 nur Schrauben und Muttern bis A4 geregelt, was der Korrosionsbeständigkeitsklasse CRC III entspricht. Mit der aktuellen Neuausgabe der Norm stehen jetzt auch Stahlsorten zur Verfügung, die CRC IV und V zugeordnet sind. Dies wurde einerseits bei der Neuausgabe der abZ/aBG Z-30.3-6 [12] berücksichtigt, andererseits wurden dort auch sechs weitere Stahlsorten für die Verbindungselemente aufgenommen. Erstmals steht damit auch ein nichtrostender ferritischer Stahl für Schrauben und Muttern zur Verwendung in Umgebungen mit geringer Korrosionsbelastung zur Verfügung.

In DIN EN ISO 3506-1 und -2 sind Schrauben und Muttern bis zu einem Nenndurchmesser bis einschließlich M39 geregelt. In der Praxis werden jedoch durchaus auch größere Schraubendurchmesser als M39 benötigt, was in der abZ/aBG Z30.3-6 [12] berücksichtigt ist (s. Tabelle 12).

Die Angaben in Tabelle 12 sind zwar mit Schraubenherstellern und -lieferanten abgestimmt, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass viele Stahlsorten und insbesondere die großen Nenndurchmesser nicht ohne Weiteres geliefert werden können.

Am besten verfügbar sind für Standardanwendungen von Schrauben und Muttern für die Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC I und II die Stahlsorte A2 und für die Korrosionsbeständigkeitsklassen bis CRC III die Stahlsorte A4; die gängigste Festigkeitsklasse ist 70. Die

**Bild 9.** Schraubenkopf mit Angaben zur Stahlsorte, Festigkeitsklasse und SB-Kennzeichnung (Foto: Bumax)

Angabe zur Stahlsorte und Festigkeitsklasse sowie die SB-Kennzeichnung für Schraubengarnituren als nicht Vorspannbare Garnituren nach DIN EN 15048-1 [70] müssen sich auch auf dem Schraubenkopf und der Mutter befinden, siehe exemplarisch Bild 9.

2.9.2 Vorgespannte Schrauben(-verbindungen)

prEN 1993-1-4 gibt erstmalig Regeln zur Bemessung von gleitfesten Verbindungen aus nichtrostendem Stahl mit vorgespannten Schraubengarnituren aus nichtrostendem austenitischen oder Duplex-Stahl der Festigkeitsklassen 80 und 100 an. Da Schraubengarnituren aus nichtrostendem Stahl als Vorspannbare Garnituren weder normativ geregelt noch auf dem Markt mit definierter Schmierung zum Vorspannen erhältlich sind, wie es bei den Vorspannbaren Schraubengarnituren aus Kohlenstoffstahl über die Schirmproduktnorm DIN EN 14399-1 [71] der Fall ist, sind Schraubengarnituren zum Vorspannen aus nichtrostendem Stahl speziell zu prüfen. Dies muss über eine Verfahrensprüfung erfolgen, innerhalb derer nicht nur die Produkteigenschaften der Komponenten (Schraube, Mutter, Scheiben) geprüft werden müssen, soweit dies nicht bereits darüber erledigt ist, dass SB-Garnituren verwendet werden, sondern auch die Eignung zum Vorspannen sowie die Anziehparameter inkl. Wahl einer geeigneten Schmierung und deren Applikation, Erfassung von Vorspannkraftverlusten, Vermeidung von Kaltschweißeffekten („Fressen“) sowie Regelungen zur Prüfung und Kontrolle festgelegt werden müssen. In Deutschland kann solch eine Verfahrensprüfung in Anlehnung an die Regelungen der DAST-Richtlinie 024 [72] erfolgen. Auf europäischer Ebene gibt es bisher keine Regelungen, sie sollen aber über die Generierung einer Technical Specification (CEN/TS) geschaffen werden, weshalb prEN 1993-1-4 hierauf in der Anmerkung auch hinweist. Zurzeit kommen nur ISO-Metallbauschraubengarnituren infrage. Üblicherweise werden Schrauben mit/ohne Schaft nach DIN EN ISO 4014/4017 [73, 74] mit Muttern nach DIN EN ISO 4032 [75] und Scheiben nach DIN EN ISO 7089/7090 [76, 77] kombiniert; andere Bauteilkomponenten sind aber durchaus auch möglich und

Tabelle 12. Schraubengrößen in Abhängigkeit vom Werkstoff und der Festigkeitsklasse

Stahlbezeichnung			Gefüge	Sorte	Korrosions- beständig- keitsklasse CRC	Max. verfügbarer Nenndurchmesser für Verbindungselemente ²⁾ nach DIN EN ISO 3506-1 sowie für Muttern nach DIN EN ISO 3506-2 Festigkeitsklasse			
Lfd. Nr. ¹⁾	Werkstoff- nummer	Kurzname				50	70	80	100
2	1.4016	X6Cr17	ferritisch	F1	I gering	≤ M24	–	–	–
4	1.4301	X5CrNi18-10	austenitisch	A2	II mäßig	≤ M64	≤ M45	≤ M39	–
6	1.4307	X2CrNi18-9	austenitisch	A2		≤ M64	≤ M45	≤ M39	–
7	1.4567	X3CrNiCu18-9-4	austenitisch	A2		≤ M39	≤ M39	≤ M39	–
8	1.4541	X6CrNiTi18-10	austenitisch	A3		≤ M64	≤ M39	≤ M39	–
12	1.4401	X5CrNiMo17-12-2	austenitisch	A4	III mittel	≤ M64	≤ M45	≤ M39	≤ M39
13	1.4404	X2CrNiMo17-12-2	austenitisch	A4		≤ M64	≤ M45	≤ M39	≤ M39
14	1.4578	X3CrNiCuMo17-11-3-2	austenitisch	A4		≤ M39	≤ M39	≤ M39	≤ M39
15	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	austenitisch	A5		≤ M64	≤ M45	≤ M39	≤ M39
19	1.4435	X2CrNiMo18-14-3	austenitisch	A4		≤ M36	≤ M36	≤ M36	≤ M30
20	1.4362	X2CrNiN23-4	Duplex	D4		–	≤ M64	≤ M39	≤ M39
21	1.4062	X2CrNiN22-2	Duplex	D4		–	≤ M39	≤ M39	≤ M39
22	1.4162	X2CrMnNiN21-5-1	Duplex	D4		–	≤ M39	≤ M39	≤ M39
23	1.4662	X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	Duplex	D4		–	≤ M39	≤ M39	≤ M39
24	1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	austenitisch	A8		IV stark	≤ M64	≤ M39	≤ M39
25	1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	Duplex	D6	–		≤ M64	≤ M39	≤ M39
26	1.4539	X1NiCrMoCu25-20-5	austenitisch	A8	≤ M64		≤ M45	≤ M39	≤ M39
27	1.4565	X2CrNiMnMoN25-18-6-5	austenitisch	– ³⁾	V sehr stark	≤ M64	≤ M64	≤ M39	≤ M39
28	1.4529	X1NiCrMoCuN25-20-7	austenitisch	A8		≤ M64	≤ M45	≤ M39	≤ M39
29	1.4547	X1CrNiMoCuN20-18-7	austenitisch	A8		≤ M39	≤ M39	≤ M39	≤ M39
30	1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	Duplex	D8		–	≤ M39	≤ M39	≤ M39
31	1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	Duplex	D8		–	≤ M39	≤ M39	≤ M39
32	1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	Duplex	D8		–	≤ M39	≤ M39	≤ M39

¹⁾ gemäß Anlage 1, Tabelle 1 der abZ/aBG Z-30.3-6

²⁾ Nach DIN EN ISO 3506 umfasst der Begriff Verbindungselemente Schrauben mit Schaft und mit Gewinde bis Kopf, Stiftschrauben und Gewindebolzen

³⁾ Da derzeit keine normativen Festlegungen gelten, sind diese Stähle mit der Werkstoff-Nummer zu kennzeichnen.

werden in der Praxis auch eingesetzt. Wichtig ist, dass gehärtete Scheiben mit einer Härte \geq HV 300 gewählt werden, um Kaltschweißeffekte (Fressen) weitestgehend zu vermeiden. Je größer der Schraubendurchmesser und die Festigkeitsklasse ist, desto größer wird die aufzubringende Vorspannkraft und die Neigung zu Kaltschweißeffekten nimmt zu. Ein Vorspannen von M12/M16-Garnituren aus nichtrostendem Stahl ist bei Wahl einer geeigneten Schmierung unkritisch. Für

Schraubengarnituren aus nichtrostendem Stahl ab Schraubendurchmesser M20 wird die Herausforderung größer, Kaltschweißeffekte sicher zu vermeiden. In diesen Fällen sind in der Regel besondere Maßnahmen bezüglich der Kombination Schraubendurchmesser, Festigkeitsklasse, Schmiermittel, Härte der Scheiben und Vorspannkraftniveau zu treffen. Weitergehende Ausführungen sind Abschnitt 6.3.5 und u. a. [78–85] zu entnehmen.

2.9.3 Schweißzusatzwerkstoffe

Schweißzusätze für das Schweißen nichtrostender Stähle müssen bezüglich der Streckgrenze, der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung, der Kerbschlagarbeit und der Korrosionsbeständigkeit mindestens den Anforderungen des Grundmaterials entsprechen. Abbrandbedingt kann sogar ein höherer Anteil an Legierungselementen erforderlich sein, um ein entsprechendes Schweißgut zu erhalten. Der Hinweis aus DIN EN 1993-1-4, dass für austenitische Stähle im kaltverfestigten Zustand das Schweißgut auch geringere mechanische Werte aufweisen kann als der Grundwerkstoff (Undermatching), z. B. zur Verbesserung der Duktilität, ist in der prEN 1993-1-4 nicht mehr enthalten. Geeignete Schweißzusatzwerkstoffe nach abZ/aBG Z-30.3-6 sind

in Tabelle 13 angegeben. Die mechanischen Eigenschaften ausgesuchter Schweißzusatzwerkstoffe nach DIN EN ISO 3581 [86] enthält Tabelle 14.

In Schweißverbindungen aus verschiedenen austenitischen Stahlsorten dürfen die Schweißzusätze sowohl der einen als auch der anderen Stahlsorte eingesetzt werden. Bei anderen Mischverbindungen, z. B. mit Baustählen, sind gegebenenfalls andere Schweißzusatzwerkstoffe erforderlich, als in Tabelle 13 aufgeführt sind. Die Festlegung, welche Schweißzusatzwerkstoffe zu verwenden sind, trifft die Schweißaufsichtsperson, soweit das nicht schon durch den Planer erfolgt ist. Es ist durchaus üblich, nichtrostenden Stahl an Baustahl zu schweißen, es sind allerdings die geeigneten Schweißzusätze zu verwenden.

Tabelle 13. Schweißzusatzwerkstoffe nach abZ/aBG Z-30.3-6

Grundwerkstoff Werkstoffnummer	Schweißzusatzwerkstoff		
	Stabelektroden nach DIN EN ISO 3581 [86]	Drahtelektroden, Stäbe und Drähte nach DIN EN ISO 14343 [87]	Fülldrahtelektroden nach DIN EN ISO 17633 [88]
1.4003	19 9 L 18 8 Mn	19 9 L 18 8 Mn	19 9 L 18 8 Mn
1.4301	19 9 19 9 L 19 9 Nb	19 9 L 19 9 Nb	19 9 L 19 9 Nb
1.4307	19 9 L	19 9 L	19 9 L
1.4541	19 9 L 19 9 Nb	19 9 L 19 9 Nb	19 9 L 19 9 Nb
1.4318	19 9 L 19 9 Nb	19 9 L 19 9 Nb	19 9 L 19 9 Nb
1.4401	19 12 2 19 12 3 L 19 12 3 Nb	19 12 3 L 19 12 3 Nb	19 12 3 L 19 12 3 Nb
1.4404	19 12 3 L	19 12 3 L	19 12 3 L
1.4571	19 12 3 L 19 12 3 Nb	19 12 3 L 19 12 3 Nb	19 12 3 L 19 12 3 Nb
1.4539	NiCr22Mo9Nb ¹⁾	20 25 5 Cu N L NiCr22Mo9Nb ²⁾	–
1.4439	18 16 5 N L	18 16 5 N L	18 16 5 N L
1.4362, 1.4462 1.4662	22 9 3 N L	22 9 3 N L	22 9 3 N L
1.4062, 1.4162	22 9 3 N L 23 7 N L	22 9 3 N L 23 7 N L	22 9 3 N L 23 7 N L
1.4529	NiCr23Mo16 ¹⁾ NiCr22Mo9Nb ¹⁾	NiCr23Mo16Cu2 ²⁾ NiCr22Mo9Nb ²⁾	–
1.4547	NiCr22Mo9Nb ¹⁾	NiCr22Mo9Nb ²⁾	–

¹⁾ nach DIN EN ISO 14172 [89]

²⁾ nach DIN EN ISO 18274 [90]

Tabelle 14. Mechanische Eigenschaften von Schweißzusatzwerkstoffen nach DIN EN ISO 3581 [86]

Schweißzusatzwerkstoff	Streckgrenze [N/mm ²]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Mindestbruchdehnung [%]
19 9	350	550	30
19 9 L	320	510	30
19 9 Nb	350	550	25
19 12 2	350	550	25
19 12 3 L	320	510	25
19 12 3 Nb	350	550	25
22 9 3 N L	450	550	20

3 Tragwerksberechnung

3.1 Neuer Normtext

7 Tragwerksberechnung

7.1 Tragwerksmodellierung für die Berechnung

(1) Die Festlegungen von EN 1993-1-1:2022, Abschnitt 7, sollten auf nichtrostende Stähle angewendet werden, sofern sie nicht durch die besonderen Festlegungen dieses Dokuments abgeändert oder ersetzt werden.

7.2 Berechnung des gesamten Tragwerkes

7.2.1 Berücksichtigung von Einflüssen nach

Theorie II. Ordnung

(1) Eine Berechnung nach Theorie II. Ordnung ist nicht erforderlich, wenn die Anforderungen von EN 1993-1-1:2022, Gleichung (7.1) und Gleichung (7.2), erfüllt sind.

Anmerkung: Der Wert von k_0 in EN 1993-1-1:2022, Gleichung (7.1), beträgt $1/\bar{\lambda}_0^2$, wobei $\bar{\lambda}_0$ die bezogene Grenzschlankheit nach Tabelle 8.3 ist, es sei denn, der Nationale Anhang enthält einen anderen Wert.

7.3 Imperfektionen

7.3.1 Äquivalente Vorkrümmung für die Tragwerks- und Bauteilbemessung

(1) Bei der elastischen Berechnung nach Theorie II. Ordnung und der Fließgelenkberechnung nach Theorie II. Ordnung darf die äquivalente Vorkrümmung e_0 von Bauteilen für Biegeknicke nach EN 1993-1-1:2022, 7.3.3.1, bestimmt werden.

(2) Bei der Fließzonenberechnung nach Theorie II. Ordnung mit entweder einem bi-linearen Werkstoffmodell (siehe 7.4.3.3) oder dem nichtlinearen Werkstoffmodell (siehe 7.4.3.4), das in prEN 1993-1-14:2022, 5.3.3 für nichtrostenden Stahl angegeben ist, darf die äquivalente Vorkrümmung e_0 für Biegeknicke nach Gleichung (7.1) bestimmt werden:

$$e_0 = \frac{\alpha L}{150} \quad (7.1)$$

Dabei ist

L die Bauteillänge;

α der Imperfektionsbeiwert in Abhängigkeit von der maßgebenden Knicklinie nach Tabelle 8.3.

7.3.2 Imperfektionen auf der Grundlage der Knickbiegelines nach der Elastizitätstheorie

(1) Bei der elastischen Berechnung nach Theorie II. Ordnung und der Fließgelenkberechnung nach Theorie II. Ordnung (siehe 7.4.3.2) darf die Form der maßgebenden Knickbiegeline nach der Elastizitätstheorie η_{cr} des Tragwerkes als einzige globale Imperfektion und örtlich begrenzte Imperfektion nach EN 1993-1-1:2022, 7.3.6, angesetzt werden. Der Stich dieser Imperfektion sollte mit Gleichung (7.2) ermittelt werden:

$$e_{0,m} = \alpha_{\eta,m} (\bar{\lambda}_m - \bar{\lambda}_0) \frac{M_{Rk,m}}{N_{Rk,m}} \quad (7.2)$$

Dabei ist

m der Index, der den maßgebenden Querschnitt des Gesamttragwerkes oder des nachzuweisenden Bauteils bezeichnet. Der Index m gibt an, dass der Wert oder die Eigenschaft zum maßgebenden Querschnitt gehört;

$\bar{\lambda}_m = \sqrt{\frac{N_{Rk,m}}{N_{cr,m}}}$ der bezogene Schlankheitsgrad des

Bauteils, berechnet für den maßgebenden Querschnitt m ;

$N_{cr,m} = \alpha_{cr} N_{Ed,m}$ der Wert der kritischen Normalkraft im Querschnitt m und auch die kritische Normalkraft des Ersatzstabs;

α_{cr} der kleinstmögliche Vergrößerungsfaktor der Normalkräfte N_{Ed} der Bauteile, um die ideale Verzweigungslast des Tragwerkes zu erreichen;