

**ISSF**

INTERNATIONAL  
STAINLESS STEEL



## Nichtrostende Duplex-Stähle



## Vorwort



Die ersten Versuche zur Herstellung von Duplex-Stählen wurden in den frühen 1930er Jahren angestoßen, wobei das schwedische Unternehmen Avesta eine bedeutende Rolle spielte. Nun da sich die Entwicklung der Duplex-Sorten zum neunzigsten Mal jährt, freue ich mich, das Vorwort zur neuen ISSF-Broschüre über diese Familie der nichtrostenden Stähle schreiben zu können. Sie ist eine äußerst nützliche Referenzveröffentlichung, die Informationen und Hinweise gibt, wie für bestimmte Projekte die richtigen nichtrostenden Duplex-Stähle ausgewählt werden. Zudem stellt sie einen fundierten Leitfaden für die

Auswahl geeigneter Sorten in Fällen dar, in denen nichtrostende Duplex-Stähle ursprünglich gar nicht zur Diskussion standen.

Diese Unterlage umfasst eine große inhaltliche Bandbreite zum Thema nichtrostende Duplex-Stähle. Darüber hinaus vermittelt eine detaillierte Übersicht über die vielfältigen Anwendungen neue Anstöße für weitere Einsatzmöglichkeiten. Die Broschüre schließt mit einem hilfreichen Leitfaden für die Verarbeitung nichtrostender Duplex-Stähle, der auch mit vielen Mythen aufräumt, die diesen Zweig der Familie von nichtrostenden Stählen umgeben.

Man kann mit Fug und Recht sagen, dass nichtrostende Duplex-Stähle ihr volles Potential noch gar nicht ausgeschöpft haben. Moderne Duplex-Stähle verbinden hohe Festigkeit mit hoher Korrosionsbeständigkeit und durchaus guter Umformbarkeit. Dadurch wird diese Familie der nichtrostenden Stähle zu einer wichtigen Gruppe von Kandidaten für die Werkstoffauswahl in anspruchsvollen Anwendungsfeldern, in denen Langlebigkeit bei gleichzeitig geringem Unterhalt erforderlich ist.

Ich möchte sowohl Bernard Héritier als auch Clara Herrera, die treibende Mitglieder des ISSF-Langprodukte-Komitees sind, für ihren engagierten Einsatz bei diesem Projekt danken. Der detailreiche Inhalt und die kohärente Struktur dieser Publikation sind zu wesentlichen Teilen ihrem Kenntnisreichtum und ihrer Expertise zu verdanken. Ich danke darüber hinaus Jo Claes für die praktische Umsetzung dieser Broschüre.

ISSF wendet sich mit dieser Broschüre an Hersteller, Werkstoffentscheider, Architekten, Erstausrüster und Händler – in der Überzeugung, ihnen damit einen nützlichen Leitfaden für die Materialauswahl und für eigene Marktförderungsaktivitäten an die Hand zu geben.

Tim Collins  
Generalsekretär  
International Stainless Steel Forum



# Inhalt

Vorwort	2	6 Anwendungen	21
1 Einleitung	4	6.1 Kunst	21
2 Normen und chemische Zusammensetzung	5	6.2 Architektur	22
2.1 Geltende Normen	5	6.3 Brücken	24
2.2 Chemische Zusammensetzung	5	6.4 Küstenschutz	27
3 Korrosionsbeständigkeit	6	6.5 Denkmalpflege	29
3.1 Flächenkorrosion	6	6.6 Tunnel	29
3.2 Loch- und Spaltkorrosion	9	6.7 Transportwesen	30
3.3 Umgebungsbedingte Rissbildung	10	6.8 Chemische Verfahrenstechnik	32
3.4 Ermüdungskorrosion	12	6.9 Papier- und Zellstoffherstellung	32
3.5 Abrasionskorrosion	13	6.10 Öl- und Gasindustrie	32
4 Physikalische Eigenschaften	14	6.11 Kernkraftwerke	34
5 Mechanische Eigenschaften	15	6.12 Erneuerbare Energien	34
5.1 Festigkeitseigenschaften	15	6.13 Wasserwirtschaft	36
5.2 Einsatztemperaturen	16	6.14 Marktübergreifende Anwendungen	38
5.3 Kaltverfestigung	18	7 Verarbeitung	39
5.4 Brandverhalten	19	7.1 Umformung	39
5.5 Erdbebensicherheit	20	7.2 Spanabhebende Bearbeitung	41
		7.3 Schweißen	42
		7.4 Qualitätssicherung	44
		8 Schlußfolgerungen	45
		9 Schrifttum	46
		10 Anhänge	55

# 1 Einleitung

Nichtrostende Duplex-Stähle stellen die jüngste Familie der nichtrostenden Stähle dar. Bereits in den 1930er Jahren fanden Versuche damit statt; ab den 1970er Jahren wurden sie in industriellem Maßstab hergestellt (Ref. 1.1 bis 1.6).

Ihre ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften und ihre Korrosionsbeständigkeit machten sie zur ersten Wahl für stark lastbeanspruchte Anwendungen in korrosiver Umgebung. Die Entwicklung der modernen Duplex-Stähle begann mit einigen wenigen Sorten, von denen die typischsten der Werkstoff UNS S31803 und später die Sorte S32205\* sind, letzterer als 2205 bekannt. In der Folge gab es Entwicklungen in zwei verschiedene Richtungen:

- noch korrosionsbeständigere sogenannte „Super-Duplex“- und „Hyper-Duplex“-Stähle für besonders aggressive Bedingungen,
- nichtrostende „Lean-Duplex“-Stähle mit hohen Anforderungen an die Festigkeit, bestimmt für mäßig korrosive Bedingungen wie z.B. im Bauwesen.

(\* ) Beide UNS-Sorten fallen in die Analysebandbreite der EN-Sorte 1.4462

Nichtrostende Duplex-Stähle zeichnen sich durch niedrige Unterhaltskosten und geringe lebensdauerbezogene Kosten aus, ebenso wie andere nichtrostende Stähle auch. Ihre hohe Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit sowie – wenn man ihren besonderen Eigenschaften Rechnung trägt – gute Verarbeitbarkeit haben ihnen in vielen neuen Anwendungen Anerkennung eingetragen, etwa in langlebigen Bauwerken (Fußgängerbrücken, Flutturen...) oder Anlagen der öffentlichen Infrastruktur (Meerwasserentsalzung, Wasser- und Energieversorgung...).

Nichtrostende Duplex-Sorten bilden eine Ergänzung zu anderen nichtrostenden Stählen, insbesondere zu austenitischen. In einigen Fällen sind Duplex-Stähle von Beginn an die naheliegende Wahl, in anderen erweisen sie sich als unerwartete Lösung von Korrosionsproblemen. Beispiele hierzu finden sich nachfolgend in dieser Broschüre.

Die vorliegende Publikation soll dazu anregen, nichtrostende Duplex-Stähle als Werkstoffoption für anstehende Projekte zu prüfen.



Schleusentor am Mont Saint Michel in Frankreich

## 2 Normen und chemische Zusammensetzung

### 2.1 Geltende Normen

Nichtrostende Duplex-Stähle sind als Produkte bzw. für spezifische Anwendungen in den wichtigsten Normenwerken erfasst, z.B. EN, ISO und ASTM (**Anhang 1**). Obwohl die Liste der UNS-Sorten recht lang ist, entfällt der größte Teil der aktuellen Produktion auf nur wenige Stähle.

### 2.2 Chemische Zusammensetzung

Nichtrostende Duplex-Stähle weisen eine Struktur aus rund 50 % ferritischem (raumzentriertem) und rund 50 % austenitischem (flächenzentriertem) Gefüge auf. Um diese Mischstruktur zu erzielen, werden Ferritbildner (Cr, Mo, Si, W...) und Austenitbildner (Ni, N, Mn) in ein ausgewogenes Verhältnis zueinander gebracht. Das Ferrit-Austenit-Gleichgewicht wird nicht nur von der Legierungszusammensetzung bestimmt, sondern auch von der Wärmebehandlung.

Die Einordnung der nichtrostenden Duplex-Stähle erfolgt nach ihrer Korrosionsbeständigkeit, die wiederum von den Legierungselementen abhängt. Die geläufigste Kennzahl hierfür ist die Wirksumme oder *Pitting Resistance Equivalent Number* (PREN; **Ref. 2.1**). Der PREN-Wert berechnet sich nach der Formel  $Cr + 3,3 Mo + 16 N$ , wobei Cr, Mo und N die Anteile von Chrom, Molybdän und Stickstoff in Gewichtsprozent angeben (**Ref. 2.2**; siehe hierzu auch **Abschnitt 3.2**).

- **Lean-Duplex-Sorten** (wie z.B. EN 1.4362/UNS S32304) haben einen PREN-Wert von 22 bis 27, einen vergleichsweise niedrigen Nickelgehalt und sind nicht oder nur niedrig mit Molybdän legiert. Sie eignen sich am besten für weniger aggressive Bedingungen.
- **Standard-Duplex-Stähle** (der verbreitetste Vertreter ist die Sorte EN 1.4462/UNS S32205) haben einen PREN-Wert zwischen 28 und 38, enthalten 22 % Chrom und 3 % Molybdän. Sie decken den mittleren Bereich der Korrosionsbeständigkeit ab.
- **Super-Duplex-Stähle** (z.B. die Sorte EN 1.4507/UNS S32520) liegen beim PREN-Wert im Bereich von 39 bis 45 und sind mit 25 % Chrom, 3,5 % Molybdän und 0,22 % bis 0,3 % Stickstoff legiert.
- **Hyper-Duplex-Stähle** haben einen PREN-Wert > 45 und sind für besonders aggressive Bedingungen bestimmt, meist in der Öl- und Gasindustrie.

Das Angebot an Duplex-Stählen ist heute sehr breit – zum einen aufgrund von Patenten, zum anderen, weil weitere Sorten entwickelt werden, um neuen Anforderungen, besonders in der Öl- und Gasindustrie, gerecht zu werden. Die Duplex-Sorten sind in **Anhang 2** aufgelistet. Normübergreifende Entsprechungen finden sich in **Anhang 3**.



Champlain Brücke in Montreal, Canada. Foto: Infrastructure Canada

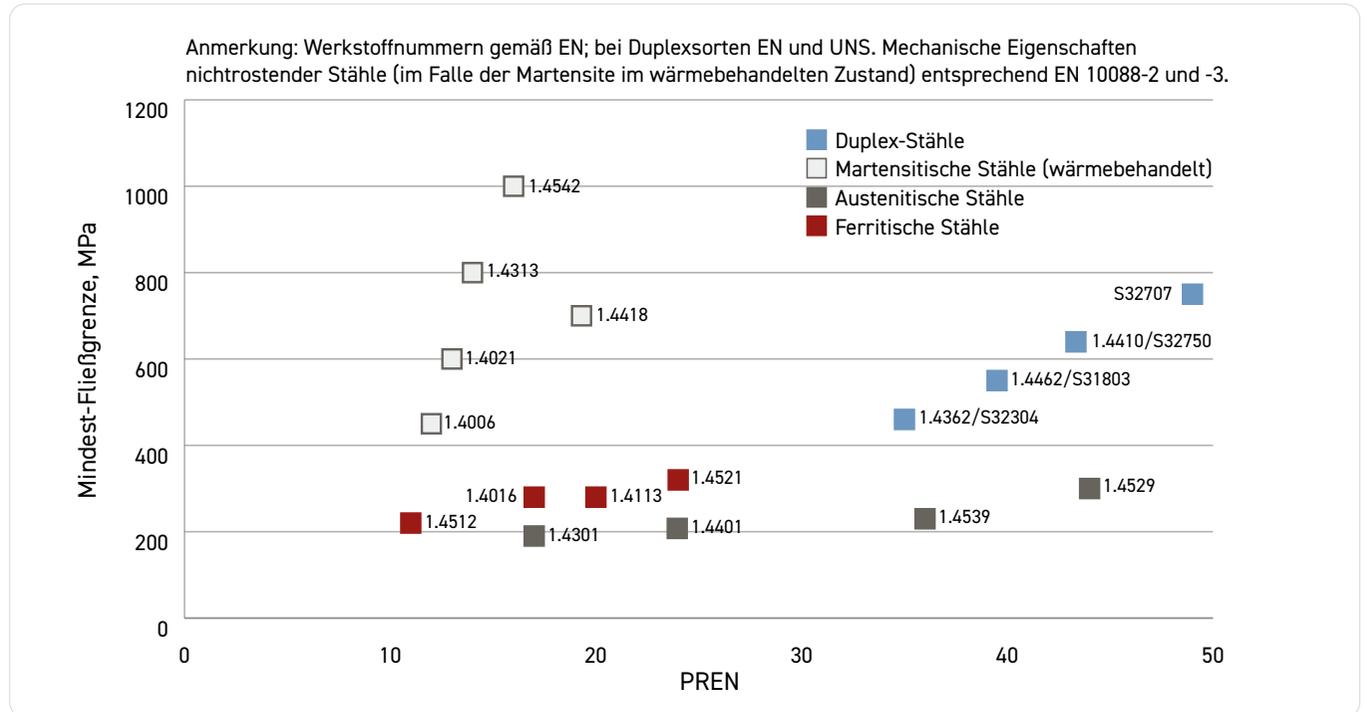
## 3 Korrosionsbeständigkeit

Nichtrostende Duplex-Stähle zeigen eine hohe Korrosionsbeständigkeit unter einer Vielzahl von Bedingungen wie oxidierenden Lösungen, schwefelsäurehaltigen Lösungen, organischen Säuren, verdünnten mineralischen Säuren und heißen alkalischen Lösungen. Der Grund hierfür liegt im hohen Legierungsgehalt an Chrom, Molybdän und Stickstoff. Sie zeichnen sich durch eine besondere Kombination von hoher Festigkeit und guter Korrosionsbeständigkeit aus (**Abb. 3.1**). Hierdurch lassen sich Bauteile schlanker bemessen sowie Werkstoff- und Verarbeitungskosten senken. Dieses Eigenschaftsprofil führte dazu, dass nichtrostende Duplex-Stähle in Anwendungsbereichen wie der Öl- und Gasindustrie, in Reaktoren und Tanks, in der Wasserbehandlung, der Meerwasserentsalzung und in Wärmetauschern eingesetzt werden.

### 3.1 Flächenkorrosion

Allgemeine oder Flächenkorrosion bezeichnet den gleichmäßigen Querschnittsverlust über die Gesamtheit oder den überwiegenden Teil der Fläche. Sie tritt auf, wenn der Werkstoff starken Säuren ausgesetzt ist (wobei organische Säuren weniger aggressiv sind als anorganische), heißen alkalischen Medien oder anderen Substanzen, die in der chemischen Industrie verwendet werden. Bestimmte in geringen Mengen vorkommende Chemikalien oder Verunreinigungen (wie Chloride und Fluoride) sowie abrasiv wirkende Feststoffe lassen die Korrosionsrate steigen. Andere Verunreinigungen verringern sie hingegen. In extrem aggressiven Medien ist die Passivschicht möglicherweise nicht mehr imstande, einsetzende Korrosion vollständig zu verhindern.

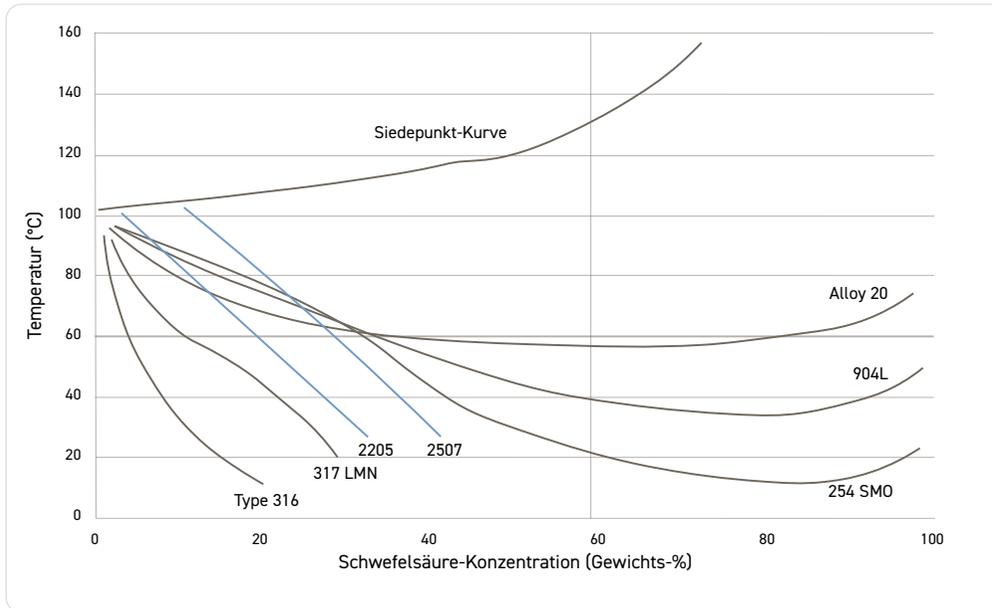
Erforderlich sind Werkstoffe mit sehr geringer Korrosionsrate, in der Regel weniger als 0,1 mm/Jahr. Korrosionstabellen für nichtrostenden Stahl, die eine Vielzahl von Chemikalien verzeichnen, können erste Anhaltspunkte für die Legierungsauswahl geben.



**Abb. 3.1** Zusammenhang zwischen Lochkorrosionsbeständigkeit und Mindest-Fließgrenze (**Abschnitt 3.2**)

Unter industriellen Bedingungen können allerdings auch noch weitere Faktoren zur Korrosion beitragen: Belüftung, Temperaturänderungen, intermittierender Betrieb, Durchflussraten, Verunreinigungen usw.

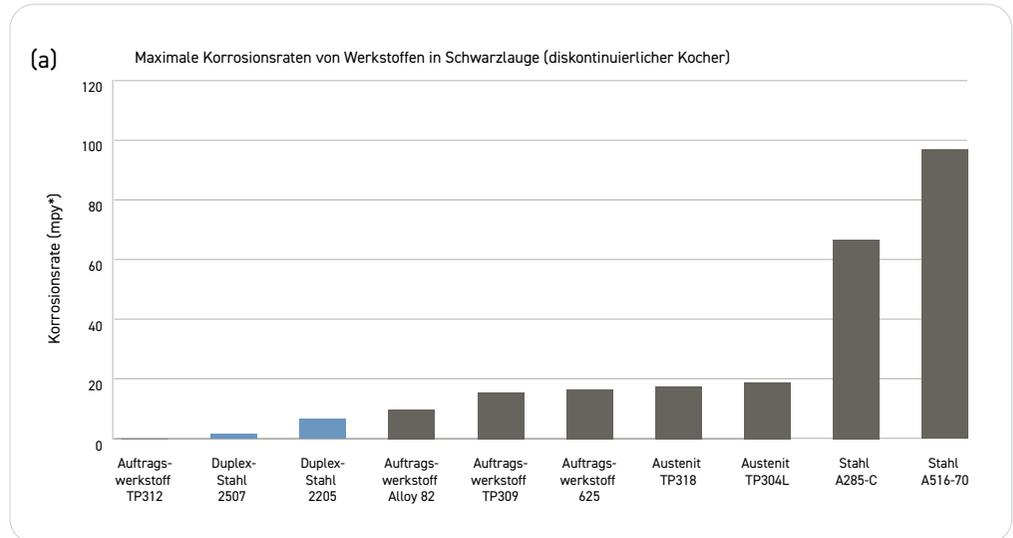
Zu beachten ist, dass der PREN-Wert NICHT dazu geeignet ist, Korrosion vorherzusagen oder nichtrostende Stähle in eine Rangfolge der Flächenkorrosionsanfälligkeit zu bringen. So trägt z.B. Molybdän in Medien mit hohem pH-Wert nicht zur Korrosionsbeständigkeit bei. Zahlreiche industrielle Verfahren laufen unter Einsatz von Schwefelsäure ab. Nichtrostende Duplex-Stähle müssen gegen die Säure und die Temperatur des Mediums beständig sein. Lean-Duplex-Stähle eignen sich für weniger aggressive Bedingungen. Bei höherer Säurekonzentration oder Temperatur ist möglicherweise der Standard-Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S32205) die beste Lösung. In manchen Fällen ist er besser geeignet als die austenitischen Sorten EN 1.4406 (ASTM 316LN) oder EN 1.4439 (ASTM 317LMN).



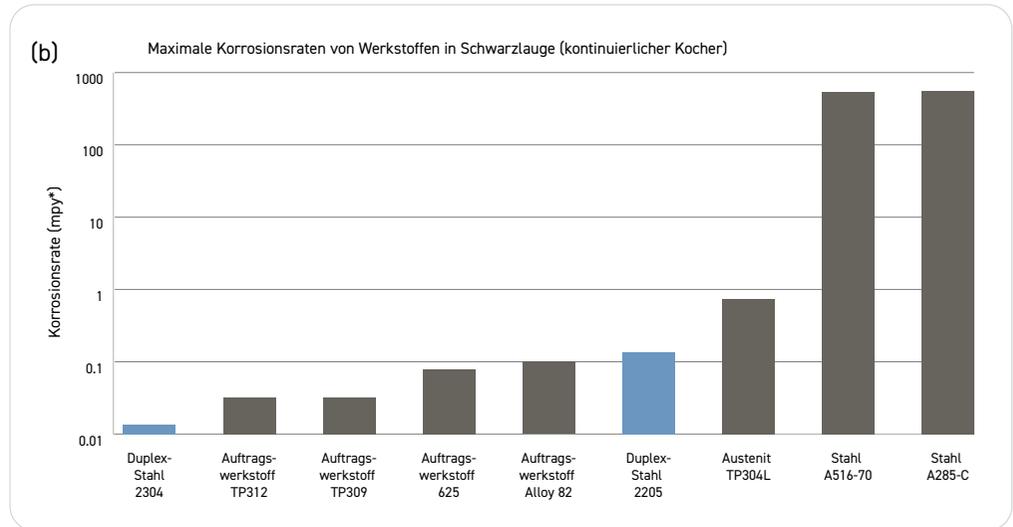
**Abb. 3.2** Korrosion in unbelüfteter Schwefelsäure, 0,1 mm/Jahr;  
 Isokorrosionsdiagramm (Labortests mit Schwefelsäure in Reagenzqualität)  
 Quelle: Hersteller-Datenblätter 254 SMO® Outokumpu

Für noch aggressivere Bedingungen sind Super-Duplex-Stähle vorzuziehen (**Abb. 3.2**). Für einige Medien sind Laboruntersuchungen und Betriebserfahrungen erforderlich, um die Eignung verschiedener Sorten vergleichend zu bewerten. So werden z.B. in der Papier- und Zellstoffherstellung für kontinuierliche und diskontinuierliche Kocher unterschiedliche Werkstoffe wie Stahl, nichtrostender Stahl und Nickelbasislegierungen eingesetzt. **Abbildung 3.3** zeigt die maximalen Korrosionsraten, die bei Korrosionsuntersuchungen im Labor in Schwarzlauge bei 170 °C auftraten. In dieser Anwendung zeigen nichtrostende Duplex-Stähle eine ausgezeichnete Beständigkeit gegen Flächenkorrosion und sind diesbezüglich sogar einigen Nickelbasislegierungen überlegen.

Starke Alkalien wie Ätznatron (NaOH) oder Ätzkali (KOH) sind unabhängig von ihrer Konzentration nicht sonderlich korrosiv, solange die Temperatur unter 100 °C liegt. Bei höheren Temperaturen, bei denen das Risiko der Risskorrosion hoch ist, empfehlen sich Standard-Duplex-Stähle oder Lean-Duplex-Stähle.



(\*) mpy = mils per year, in der Öl- und Gasindustrie gebräuchliche Einheit der Korrosionsrate; 1 mil = 1/1000 Zoll = 0,0254 mm

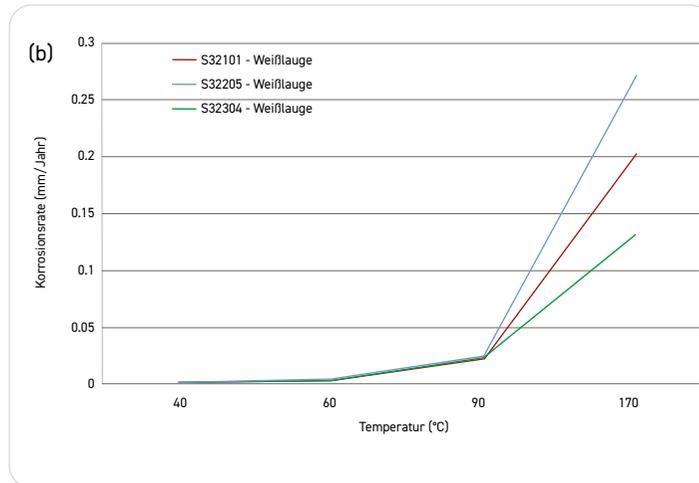
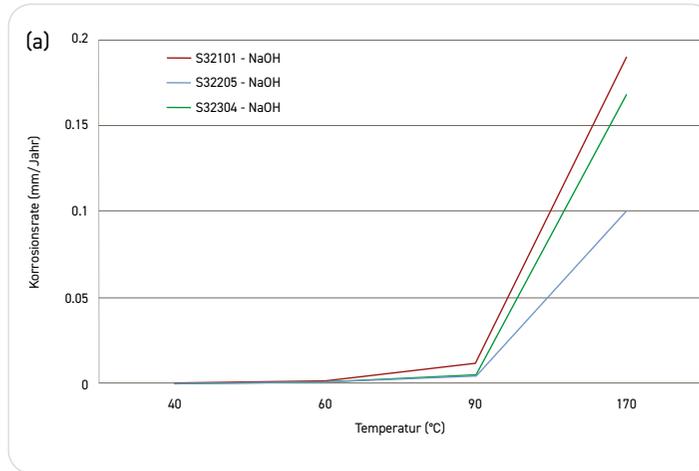


**Abb. 3.3** Maximale Korrosionsraten bei Labormessungen an Metallen und Legierungen in Laugen von  
 (a) diskontinuierlichen Kochern (Batch-Kochern) und  
 (b) kontinuierlichen Kochern bei 170 °C (Ref. 3.5.); zu beachten ist die logarithmische Skala

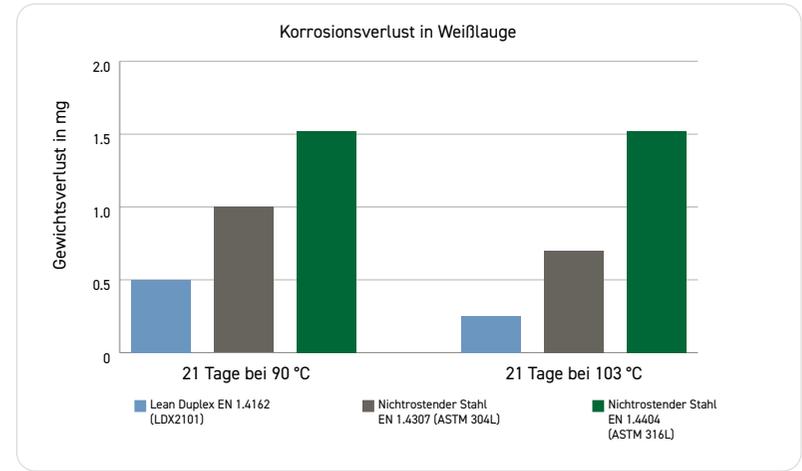


Super-Duplex-Sorten kommen bei Temperaturen bis 150 °C zur Anwendung. Derartige ätzende Bedingungen bei hohen Temperaturen treten bei der Herstellung von Alkalien, in Ölraffinerien, in der Papier- und Zellstoffindustrie sowie bei der Verarbeitung von Aluminiumoxid (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) auf. Die Flächenkorrosion in Ätzsoda und sulfidhaltiger ätzender Lösung (Weißlauge) beläuft sich im Falle von Duplexsorten selbst bei 170 °C auf weniger als 0,3 mm/Jahr. Allerdings erhöhen Sulfdzusätze die Korrosionsrate bei nichtrostenden Duplex-Stählen, speziell bei molybdänhaltigen Sorten wie EN 1.4462 (UNS S32205; **Abb. 3.4 und 3.5**).

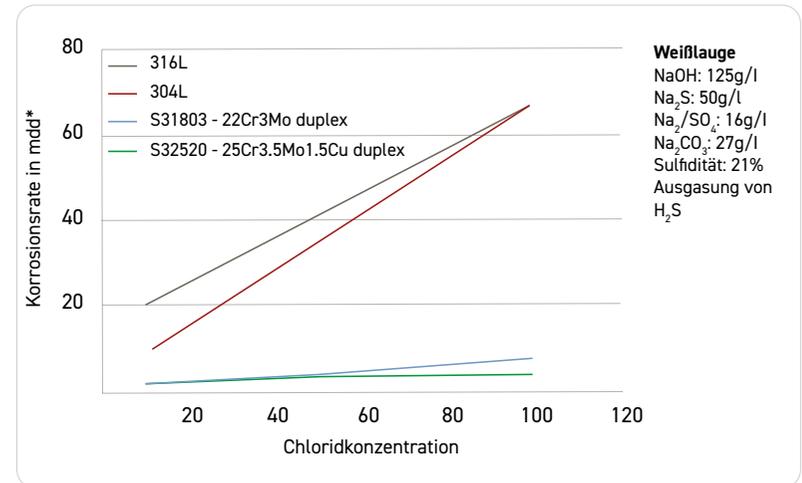
In der Papierherstellung sind Sulfide ein korrosionsfördernder Faktor (**Abb. 3.6**). Der Prozess zur Herstellung von Zellulose aus Holz (das Kraft-Verfahren) umfasst das Aufschließen von Holzhäcksel unter Druck bei 170 °C mittels einer Lauge, die 20 % Soda enthält und der Natriumsulfid (Na<sub>2</sub>S), Natriumkarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) und Spuren von Natriumthiosulfat (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) zugesetzt sind. Während des Aufschließens bei Temperaturen zwischen 70 °C und 170 °C ändert sich die chemische Zusammensetzung des Mediums: Es nimmt zusätzlich zu den Polysulfiden organische Verunreinigungen auf. Die Duplex-Familie zeigt in Weißlauge mit 20 % Ätznatron sowie Chloriden und Schwefel gute Beständigkeit gegen Flächen- und Spannungsrisskorrosion.



**Abb. 3.4** Korrosionsraten einiger Duplex-Stähle in  
(a) 3,75 M NaOH und  
(b) 3,75 M NaOH + 0,64 M Na<sub>2</sub>S (Weißlauge-)Lösung bei unterschiedlichen Prüftemperaturen (Ref. 3.12)



**Abb. 3.5** Korrosionsrate in Weißlauge (Ref. 3.13)



(\*) Milligramm pro Quadratdezimeter und Tag

**Abb. 3.6** Korrosionsraten in Weißlauge – Kraft-Verfahren (Ref. 2.2)

Flächenkorrosionstest in der Papier- und Zellstoffindustrie: Die Proben unterliegen dem Leidenforst-Effekt und haben eine Temperatur von 140 °C; die Lauge von 80 °C.

## 3.2 Loch- und Spaltkorrosion

**Lochkorrosion** ist eine Form der Lokalkorrosion, die Löcher oder Aushöhlungen in einem Metall verursacht. Lochkorrosion kann zerstörerischer sein als Flächenkorrosion, weil sie schwer vorherzusagen, zu erkennen oder konstruktiv zu vermeiden ist.

Die Beständigkeit eines Stahls gegen Lochkorrosion hängt stark von seiner chemischen Zusammensetzung ab und wird durch unterschiedliche Parameter wie Temperatur, Cl-Gehalt, pH-Wert sowie die Anwesenheit eines Oxidationsmittels beeinflusst.

Legierungselemente mit ausgeprägter Wirkung auf die Lochkorrosionsbeständigkeit sind Chrom, Molybdän und Stickstoff. Die folgende, weit verbreitete empirische Formel beschreibt die Beständigkeit nichtrostender Stähle gegen Lokalkorrosion in chloridhaltigen Medien:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N}.$$

(Bei den Prozentangaben handelt es sich um Gewichtsprozent.)

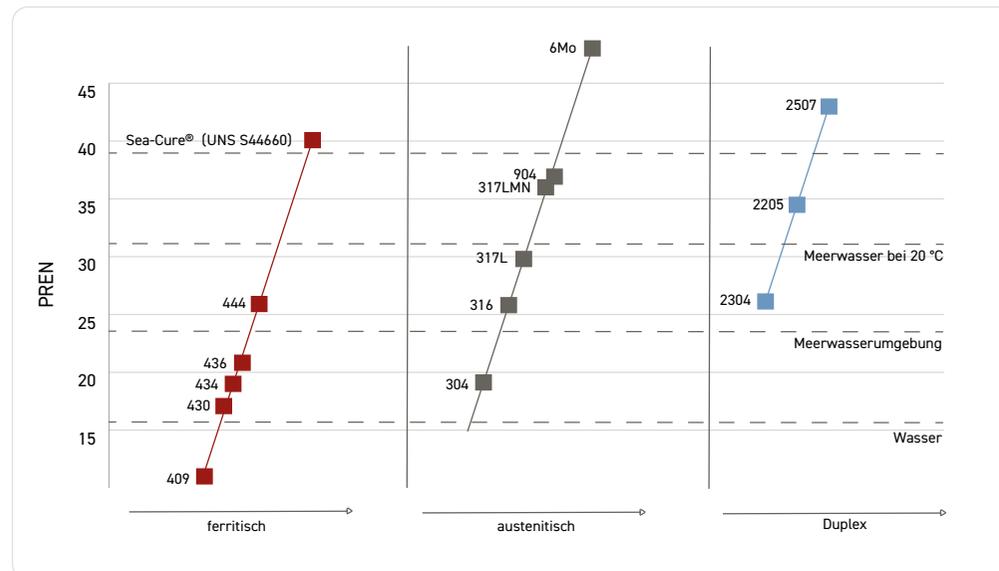


Abb. 3.7 PREN-Rangfolge (Ref. 3.1 und 3.14)

Daneben gibt es andere Formeln, die auch die Wirkung weiterer Elemente wie W und Mn berücksichtigen. W hat eine günstige Wirkung auf die Lochkorrosionsbeständigkeit, Mn setzt sie herab.

$$\text{PREN}_W = \% \text{Cr} + 3,3 \times (\% \text{Mo} + 0,5 \% \text{W}) + 16 \times \% \text{N}$$

$$\text{PREN}_{Mn} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N} - \% \text{Mn}$$

Steigt der Gehalt an Cr und Mo, die eine positive Wirkung auf die Lochkorrosionsbeständigkeit haben, muss auch der Legierungsanteil der Austenitbildner erhöht werden, damit das Verhältnis von 50 % Ferrit und 50 % Austenit erhalten bleibt. Als unerwünschte Nebenwirkung können sich in bestimmten Temperaturbereichen schnell intermetallische Phasen bilden, die den mechanischen Eigenschaften sehr abträglich sind (Abb. 5.2 und 5.3). Um sie zu vermeiden, sind einige Besonderheiten bei Verarbeitung, Wärmebehandlung und Schweißen von hochlegierten Sorten, d.h. Super- und Hyper-Duplex-Stählen, zu berücksichtigen. Allerdings lohnt sich der

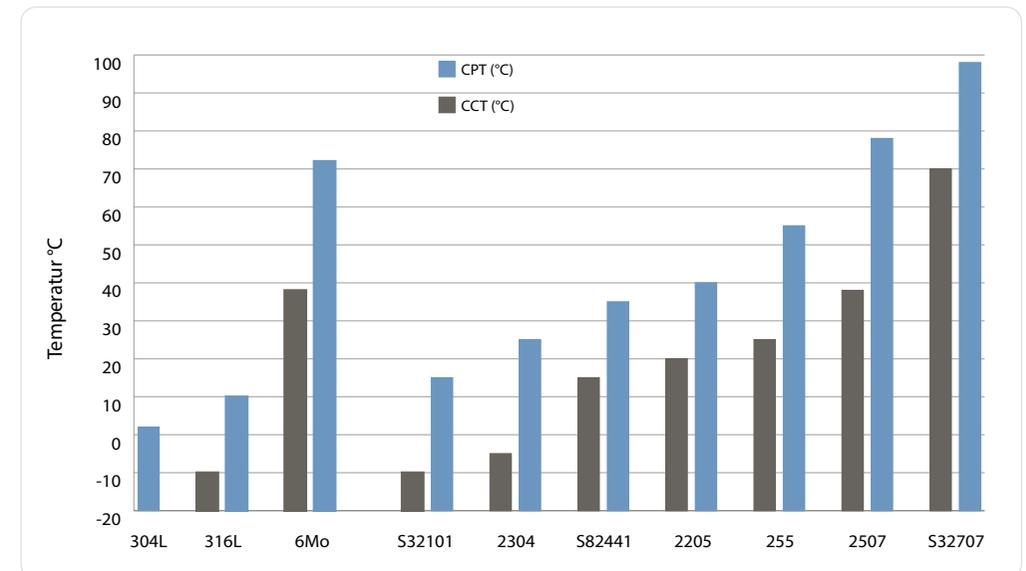


Abb. 3.8 CPT\* und CCT\* für austenitischen und Duplex-Stahl (ermittelt in 6%iger Eisenchloridlösung gemäß ASTM G48, Ref. 2.1) (\*) Definitionen auf Seite 10

Zusatzaufwand, da sie in der Regel wesentlich kostengünstiger sind als superaustenitische Stähle oder Nickelbasislegierungen. **Abbildung 3.7** zeigt eine Rangordnung der Familien nichtrostender Stähle nach ihren PREN-Werten.

Lochkorrosion lässt sich quantifizieren, indem man die sog. **kritische Lochfraßtemperatur (Critical Pitting Temperature, CPT)** nach ASTM G48, Methode E, oder ASTM G150 ermittelt. CPT bezeichnet die niedrigste Temperatur (°C), bei der Lochkorrosion auftritt. Nichtrostende Stähle mit höherem CPT-Wert sind beständiger gegen Lochkorrosion.

Eine andere Art von Lokalkorrosion ist die **Spaltkorrosion**. Sie tritt in umschlossenen Räumen, Lücken oder Spalten auf, die nur eine eingeschränkte Verbindung mit ihrer Umgebung haben. Solche Zwischenräume können zwischen zwei Metallen oder auch einem metallischen und einem nichtmetallischen Werkstoff entstehen, z.B. bei Dichtungen, Unterlegscheiben, Kupplungen, Schraubenköpfen, überlappenden und Klemmverbindungen. ASTM G48, Methode F, oder ASTM G78 ermöglichen die Bestimmung der **kritischen Spaltkorrosionstemperatur (Critical Crevice Temperature, CCT)**.

**Abbildung 3.8** zeigt die CPT- und CCT-Werte für verschiedene nichtrostende austenitische und Duplex-Stähle in 6 % Eisenchlorid. Lean-Duplex-Sorten zeigen eine höhere Korrosionsbeständigkeit als die austenitischen Sorten EN 1.4301/1.4307 (ASTM 304/304L) sowie die meisten ferritischen Stähle und sind gegenüber dem Werkstoff EN 1.4404 (ASTM 316L) unter bestimmten Bedingungen gleichwertig oder besser. Für korrosivere Bedingungen oder heiße oxidierende und chloridhaltige Lösungen können als Alternativen zu hochlegierten austenitischen Sorten die Duplexsorte EN 1.4462 (UNS S32205) oder Super-Duplex-Stähle eingesetzt werden. Hyper-Duplex-Stähle verbinden hohe Festigkeit mit CPT- und CCT-Werten, die höher liegen als die von Nickellegierungen und hochlegierten austenitischen nichtrostenden Stähle. Sie sind damit für aggressive Bedingungen und kritische Anwendungen wie Ölraffinerien, Versorgungsleitungen von Tiefbohrungen, chemische und petrochemische Anlagen, tropisches Meerwasser oder die Harnstoffproduktion geeignet (Ref. 2.1 und 2.2).

### 3.3 Umgebungsbedingte Rissbildung

Umgebungsbedingte Rissbildung (*Environmentally Assisted Cracking, EAC*) ist der Oberbegriff für Prozesse wie Spannungsrissskorrosion (*Stress Corrosion Cracking, SCC*), Wasserstoffversprödung (*Hydrogen Embrittlement, HE*), sulfidbedingte Spannungsrissskorrosion (*Sulphide Stress Cracking, SSC*), flüssigmetallinduzierte Spannungsrissskorrosion (*Liquid Metal Embrittlement, LME*) und Ermüdungskorrosion (*Fatigue Corrosion, FC*). Umgebungsbedingte Rissbildung kann gemäß NACE-Standard TM0177 getestet werden.

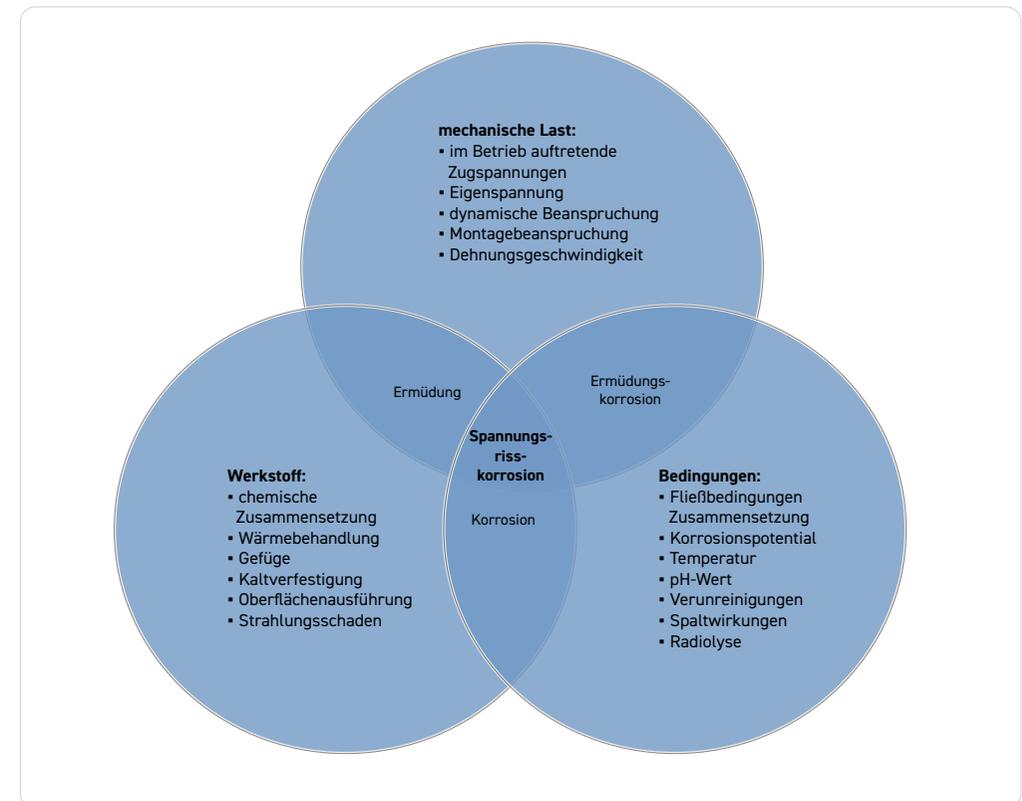
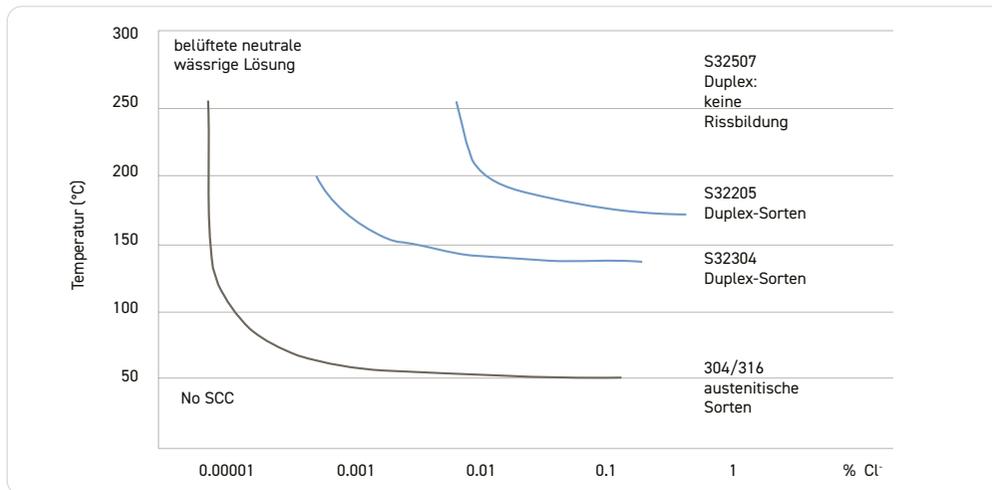


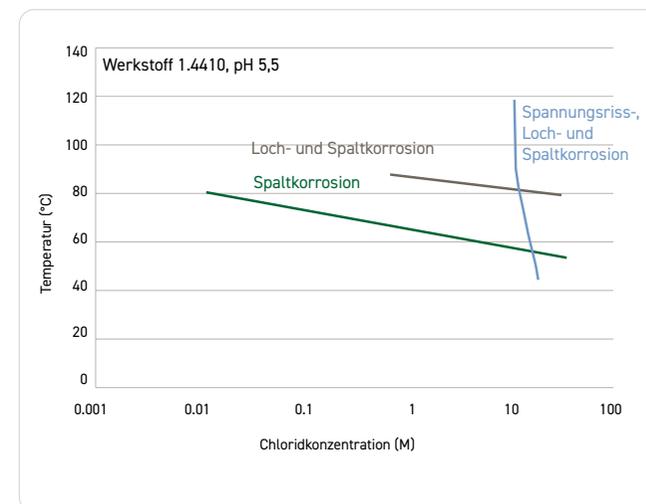
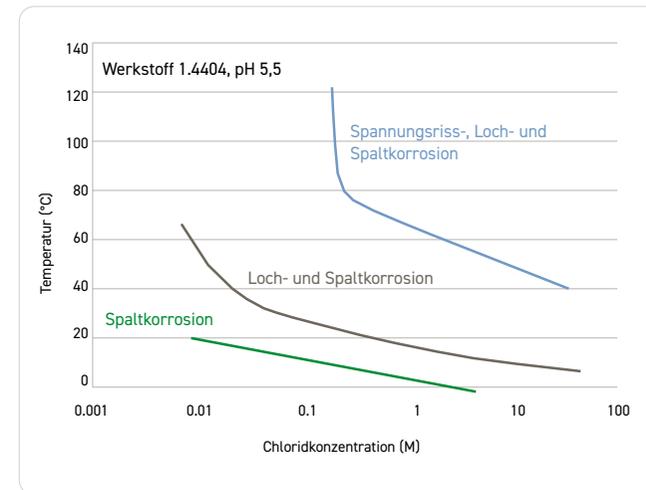
Abb. 3.9 Einflussfaktoren der Spannungsrissskorrosion (Ref. 3.15)



**Abb. 3.10** Einfluss von Chloridgehalt und Temperatur auf die Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit verschiedener austenitischer und Duplex-Stähle (Ref. 2.2)

**Spannungsrisskorrosion** (SCC) ist eine Form des lokalen Versagens, das durch eine Kombination von Zugspannung, korrosiven Bedingungen und dafür anfälligen Werkstoffen verursacht wird (Abb. 3.9). Gemeinsam führen diese Faktoren zur Entstehung und Ausbreitung von Rissen. Spannungsrisskorrosion tritt nicht nur unter chloridhaltigen Bedingungen bei Temperaturen über 60 °C auf, sondern auch in konzentrierten alkalischen Lösungen bei Temperaturen über 100 °C.

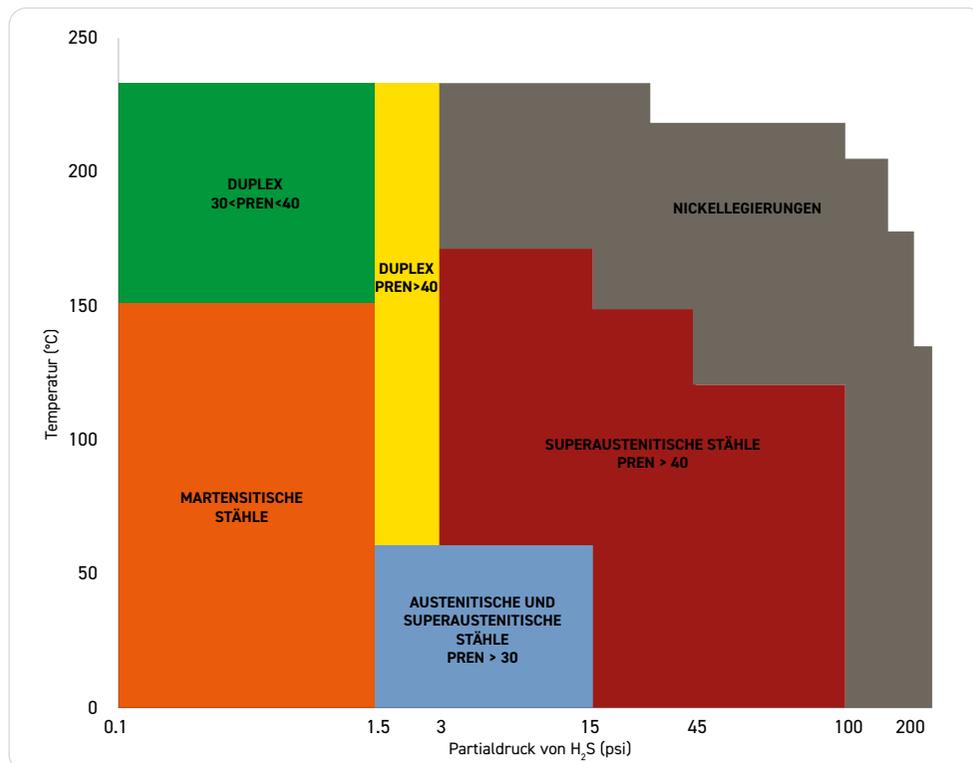
Ferritische und Duplex-Stähle sind gegenüber Spannungsrisskorrosion unter chloridhaltigen Bedingungen sehr beständig. Nichtrostende Duplex-Stähle sind beständiger als austenitische Sorten. Sie können daher austenitische Stähle in der Öl- und Gasindustrie oder in der Papier- und Zellstoffherstellung überall dort ersetzen, wo ein erhebliches Risiko von Spannungsrisskorrosion besteht. **Abb. 3.10** zeigt den Effekt des Chloridgehalts und der Temperatur auf die Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit unterschiedlicher austenitischer und nichtrostender Duplex-Stähle. **Anhang 4** enthält Daten zur Beständigkeit von austenitischen und Duplex-Sorten unter verschiedenen Bedingungen. **Abb. 3.11** nennt die Randbedingungen – Temperaturen und Chloridkonzentrationen – für Loch-, Spalt- und Spannungsrisskorrosion bei nicht eingestelltem pH (~5,5) für die Stähle EN 1.4404 (ASTM 316L) und EN 1.4410 (UNS S32750).



**Abb. 3.11** Vergleich von Spannungsriss- und Spaltkorrosionsverhalten der austenitischen Sorte EN 1.4404 (ASTM 316L) und der Super-Duplex-Sorte EN 1.4410 (UNS S32750; Ref. 3.16)

Der letztere Super-Duplex-Stahl zeigt höhere CPT- und CCT-Werte als der Werkstoff EN 1.4404. Auch gegen Spannungsrisskorrosion zeigt der Werkstoff EN 1.4410 (UNS S32750) bei erhöhten Temperaturen und höheren Chloridgehalten eine bessere Beständigkeit als der Stahl EN 1.4404. Bei 10 M Chlorid und Temperaturen unterhalb von 85 °C zeigt die Sorte EN 1.4410 (UNS S32750) keine Risse, während die entsprechende Temperaturgrenze im Falle von EN 1.4404 unter 60 °C liegt. (Ref. 3.16)

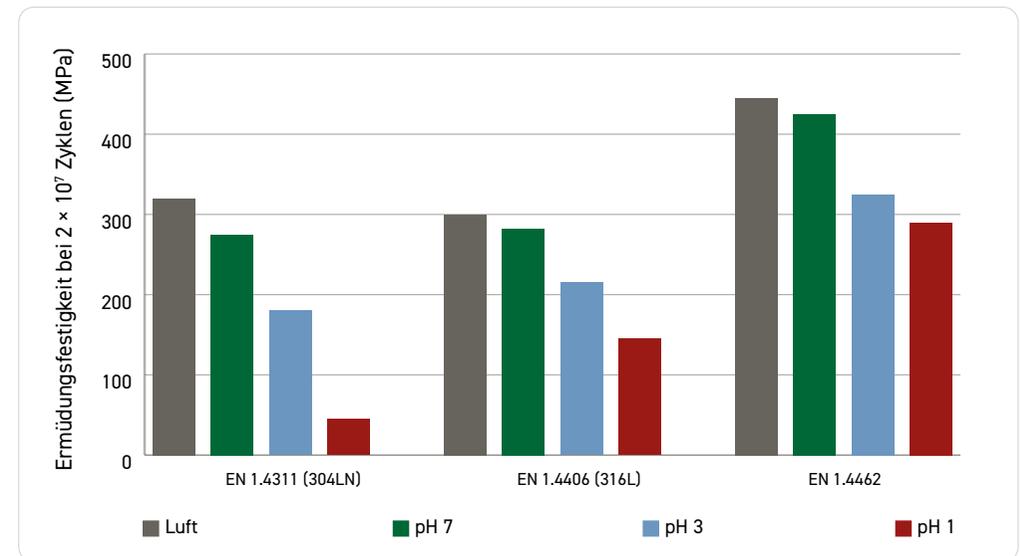
**Sulfidbedingte Spannungsrisskorrosion** (*Sulphide Stress Cracking, SSC*) wird von NACE als Rissbildung eines Metalls unter der gemeinsamen Einwirkung von Zugspannung und Korrosion in Anwesenheit von Wasser und Sulfiden ( $H_2S$ ) und als eine Form der wasserstoffinduzierten Rissbildung beschrieben. Diese Korrosionsart spielt in der Öl- und Gasindustrie eine große Rolle, weil die Medien Chloride und Sulfide enthalten (saure Bedingungen). Die NACE-Norm MR0175/ISO 15156:3 2015 gibt Hinweise zu Auswahl, Spezifikation und Anwendungsgrenzen von Werkstoffen, die auf Beständigkeit gegen sulfidbedingte Spannungsrisskorrosion ausgelegt sind, unter  $H_2S$ -haltigen Bedingungen in der Öl- und Gasförderung. **Abbildung 3.12** zeigt das Verhalten nichtrostender Duplex-Stähle im Vergleich zu austenitischen und martensitischen Sorten sowie Nickellegierungen.



**Abb. 3.12** Einsatzgrenzen von nichtrostenden Stählen und Nickelbasislegierungen unter  $H_2S$ -haltigen Bedingungen (Ref. 3.17)

### 3.4 Ermüdungskorrosion

Ermüdungskorrosion kann auftreten, wenn Werkstoffe unter korrosiven Bedingungen zyklischen oder Wechselbelastungen ausgesetzt sind. Der Widerstand gegen Ermüdungskorrosion sinkt, wenn hohe Temperaturen, niedrige pH-Werte und Chloride, Sulfide oder  $CO_2$  auf nichtrostende Duplex-Stähle einwirken.



**Abb. 3.13** Ermüdungsfestigkeit einiger nichtrostender Stähle, ermittelt durch Umlaufbiegeprüfung bei 40 °C, 100 Hz, in Luft und in 3 %iger NaCl-Lösungen mit unterschiedlichen pH-Werten (Ref. 3.18)

**Abbildung 3.13** zeigt das Verhalten des nichtrostenden Duplex-Stahls EN 1.4462 (UNS S32205) und austenitischer Sorten bei Ermüdungskorrosionstests in Luft sowie bei unterschiedlichen pH-Werten von neutral bis sehr sauer. Der Stahl EN 1.4462 zeigt ein besseres Verhalten als austenitische Sorten. In Meerwasser verhalten sich die nichtrostenden Duplex-Stähle (EN 1.4462/UNS S32205 und 1.4362/UNS S32304) im Vergleich zu austenitischen Sorten sehr günstig (**Abb. 3.14**). Ermüdungskorrosion tritt vor allem in der Papier- und Zellstoffindustrie sowie in der Öl- und Gasindustrie auf und stellt einen weiteren Grund dar, auf nichtrostende Duplex-Stähle zurückzugreifen.



Die Dauerfestigkeit der meisten nichtrostenden Stähle in Luft liegt bei ungefähr 50 % der Zugfestigkeit. In Meerwasser fällt sie demgegenüber bei martensitischen und austenitischen Sorten deutlich ab, während das Verhältnis bei Duplexsorten bei ähnlichen Werten liegt wie in Luft, nämlich bei ungefähr 40 % der Zugfestigkeit (Ref. 3.20).

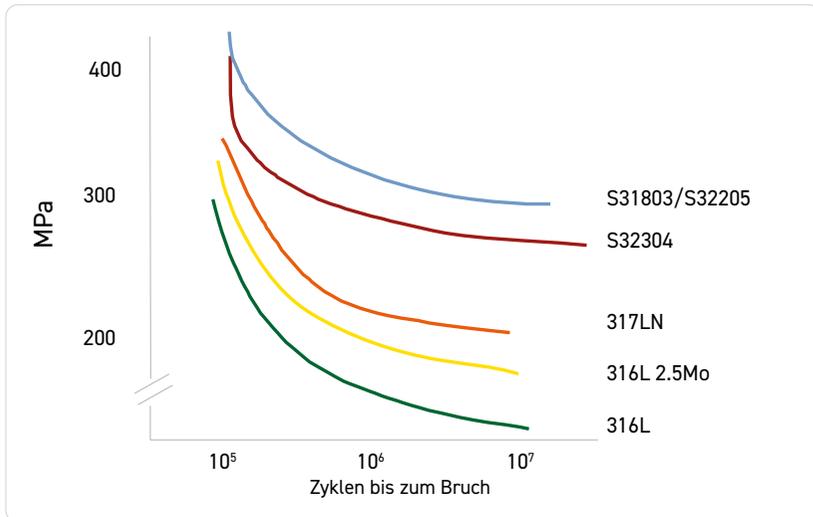


Abb. 3.14 Ermüdungskorrosionsbeständigkeit einiger nichtrostender Stähle, ermittelt mittels Umlaufbiegeprüfung in synthetischem Meerwasser (Ref. 3.8)

### 3.5 Abrasionskorrosion

Abrasionkorrosion ist in vielen Industrien eine verbreitete Schadensursache, vor allem im Bergbau, der Hydrometallurgie, dem Ölsandabbau und in der Wasserbehandlung. Die Ergebnisse von Abrasionkorrosionstests mit verschleißbeständigen Stählen, nichtrostenden Duplex-Stählen und der ferritisch-martensitischen Sorte EN 1.4003 (UNS S41003) sind aus den **Abbildungen 3.15 a und b** ersichtlich (Ref. 3.21). Die beiden Medien – das eine sauer und das andere basisch, beide mit reibend wirkenden Partikeln – sind repräsentativ für die Bedingungen in den o.g. Industrien. Nichtrostende Duplex-Stähle bewähren sich unter Abrasionkorrosions-Bedingungen am besten, wenn der Haupt-Schadensmechanismus die Korrosion ist.

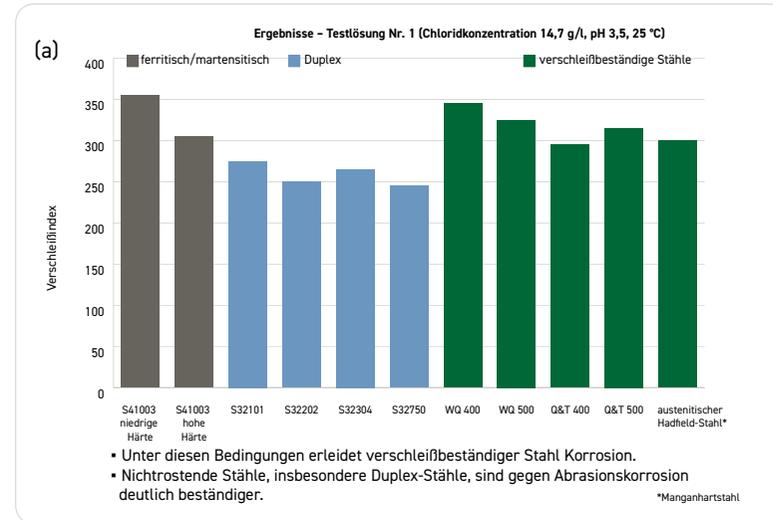
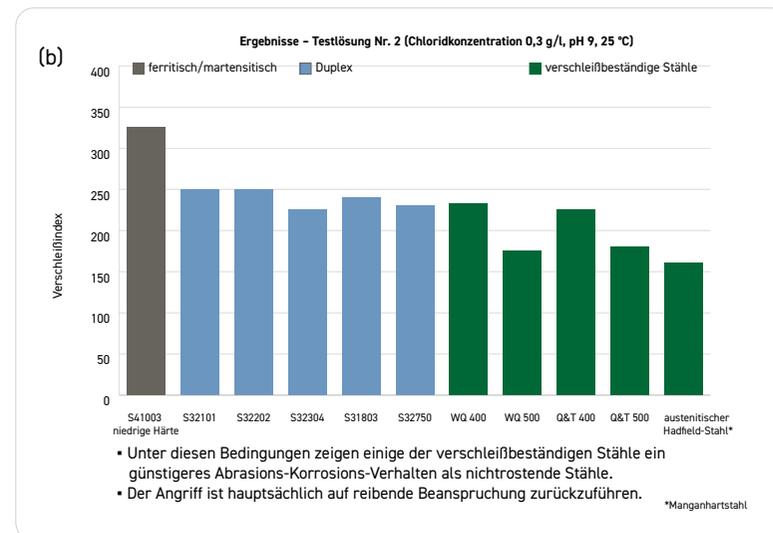


Abb. 3.15 Verschleißbeständigkeit von Duplex-Stählen im Vergleich zu verschleißbeständigen Stählen  
Anm.: Je höher der Verschleiß-Index, desto höher auch die Abrasionkorrosion



WQ 400: martensitischer Kohlenstoffstahl mit 0,19 % C, in Wasser abgeschreckt, Härte 400 HV  
 WQ 500: martensitischer Kohlenstoffstahl mit 0,30 % C, in Wasser abgeschreckt, Härte 500 HV  
 Q&T 400: martensitischer/bainitischer niedrigkohlenstoffhaltiger Stahl, abgeschreckt und angelassen, Härte 400 HV  
 Q&T 500: martensitischer/bainitischer niedrig-kohlenstoffhaltiger Stahl, abgeschreckt und angelassen, mit einer Härte von 500 HV



Handbetätigtes Ventil aus nichtrostendem Duplex-Stahl in der Öl- und Gasproduktion

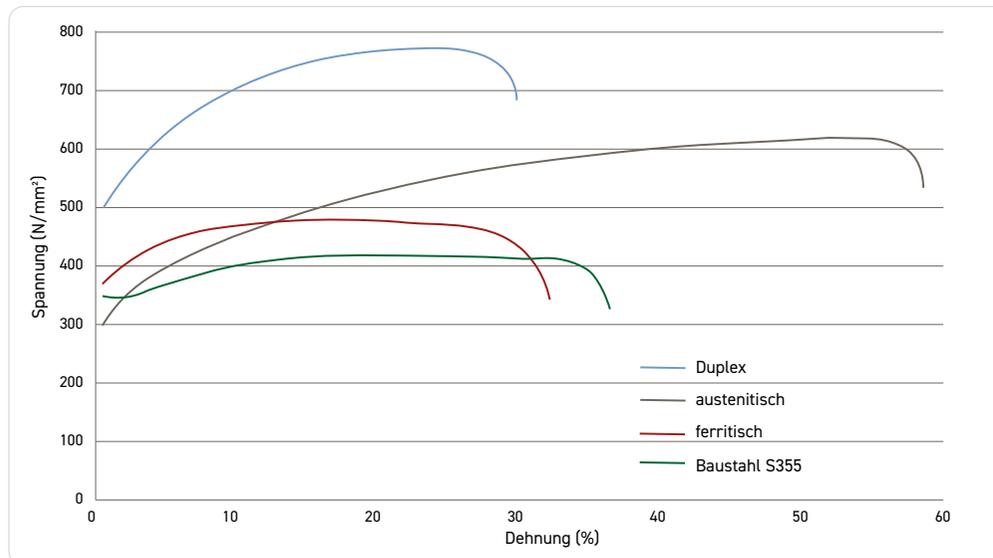
## 4 Physikalische Eigenschaften (Ref. 4.1)

Die physikalischen Eigenschaften liegen erwartungsgemäß zwischen denen der austenitischen und ferritischen Sorten. Sie sind in **Anhang 5** aufgeführt.

## 5 Mechanische Eigenschaften

### 5.1 Festigkeitseigenschaften

Die Spannungs-Dehnungs-Kurven von austenitischen, ferritischen und nichtrostenden Duplex-Stählen sind gemeinsam mit denen des Stahls S355 (eines allgemeinen Baustahls mit einer Zugfestigkeit von 355 MPa) in **Abbildung 5.1** dargestellt.



**Abb. 5.1** Typische Spannungs-Dehnungs-Kurven nichtrostender Stähle (Ref. 5.1)

Nichtrostende Duplex-Stähle weisen deutlich höhere Dehngrenzen und ausgeprägtere Kaltverfestigung auf. Die Bruchdehnung liegt bei über 25 %. Mindestwerte der Zugfestigkeit sind in Normen festgeschrieben. **Tabelle 5.1** zeigt die Werte gemäß EN und ASTM für drei typische Sorten.

Werkstoffsorte	ASTM				EN			
	UNS-Werkstoffnummer	0,2 %-Dehngrenze $R_{p0.2}$ (MPa (ksi))	Zugfestigkeit $R_m$ (MPa (ksi))	Bruchdehnung in %	EN-Werkstoffnummer	0,2 %-Dehngrenze $R_{p0.2}$ (MPa (ksi))	Zugfestigkeit $R_m$ (MPa (ksi))	Bruchdehnung in %
2304	S32304	400 (58)	600 (87)	25	1.4362	400 (58)	630 (91)	25
2205	S32205	450 (65)	655 (95)	25	1.4462	460 (67)	640 (93)	25
2507	S32750	550 (80)	795 (116)	15	1.4410	530 (77)	730 (106)	20

**Tabelle 5.1** Mindestwerte der mechanischen Eigenschaften von nichtrostendem Duplex-Grobblech gemäß ASTM und EN (Ref. 3.2)

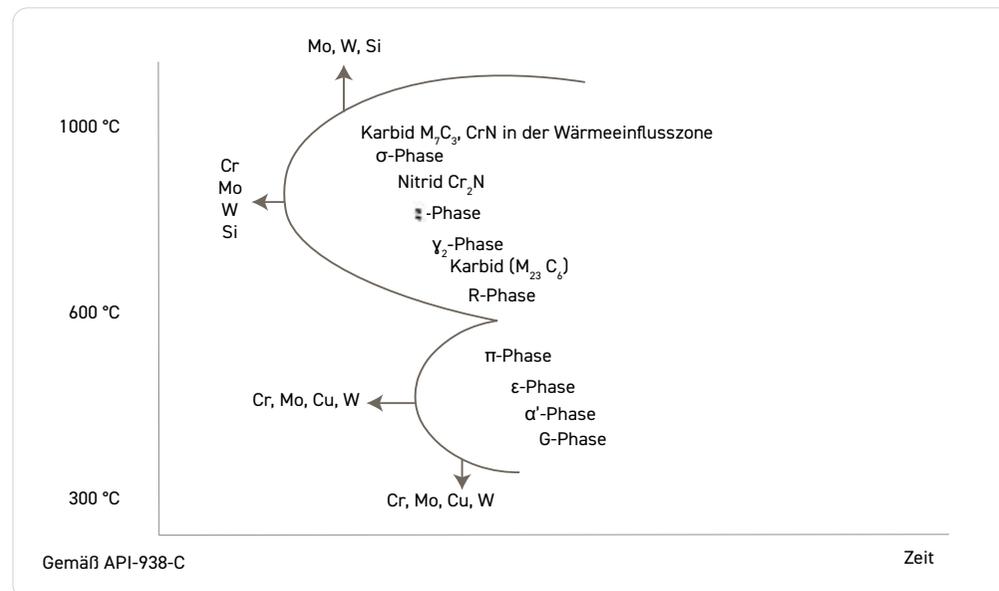
Die Werte sind deutlich konservativ, da durch Anpassung der chemischen Zusammensetzung und/oder geeignete thermomechanische Behandlung auch höhere Werte zu erreichen sind, wie vielfach von den Herstellern angeboten. Ein besonderer Fall ist nichtrostender Duplex-Bewehrungsstahl, dessen Mindest-Zugfestigkeit bei 500 MPa liegen muss (Ref. 5.1). Die Bau Normen umfassen auch lastbeanspruchte Bauteile, die durch Kaltumformung hergestellt wurden, und lassen höhere Zugspannungen zu (Ref. 5.1).

Weitere Details zu den mechanischen Eigenschaften von Flachprodukten sind **Anhang 6** und von Langprodukten **Anhang 7** zu entnehmen.

## 5.2 Einsatztemperaturen

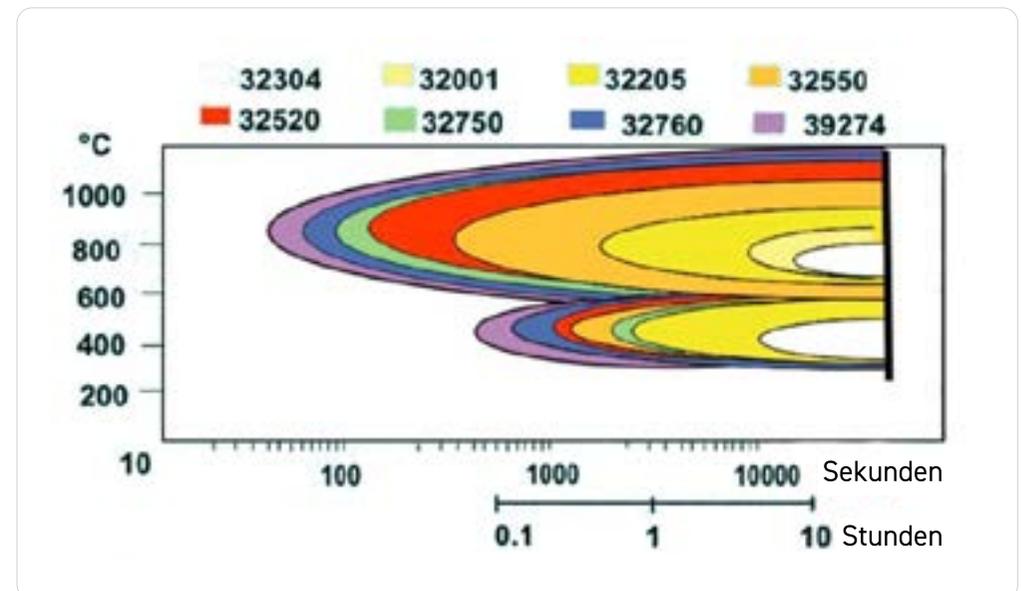
### 5.2.1 Erhöhte Temperaturen (Ref. 5.3 bis 5.6)

Bei Temperaturen über ca. 350 °C und bis etwa 1000 °C kommt es, wie in **Abbildung 5.2** dargestellt, zur Ausscheidung intermetallischer Phasen. Im Bereich hoher Temperaturen (ca. 600–1000 °C) lassen sich Ausscheidungen durch schnelle Abkühlung verhindern.



**Abb. 5.2** Einfluss der Legierungselemente auf die Ausscheidungskinetik intermetallischer Phasen (Ref. 3.8)

Im niedrigeren Temperaturbereich (ca. 350–600 °C) bilden sich Ausscheidungen deutlich langsamer und stellen für die Verarbeitung (Schweißen, Wärmebehandlung...) normalerweise kein Problem dar. Anders verhält es sich im Temperaturbereich von 250–350 °C, der in der chemischen Verfahrenstechnik häufig vorkommt. Nach Tausenden von Stunden in diesem Temperaturbereich einschließlich der Aufheizungs- und Abkühlungsphasen können sich Niedrigtemperatur-Ausscheidungen bilden. Entsprechende Anwendungsgrenzen sind bei der Planung zu berücksichtigen.



**Abb. 5.3** Temperatur/Zeit/Umwandlungskinetik einiger nichtrostender Duplex-Stähle (UNS-Werkstoffbezeichnungen; Ref. 2.2)

Wie aus **Abbildung 5.2** ersichtlich, beschleunigen höhere Gehalte an Cr, Mo, Cu und W die Ausscheidungskinetik. Lean-Duplex-Stähle sind für Niedrigtemperatur-Ausscheidungen weniger anfällig als Super- und Hyper-Duplex-Sorten, wie in **Abbildung 5.3** anhand einiger gängiger Duplex-Stähle dargestellt. Weitere Informationen hierzu liefern die Hersteller.

Die technischen Bestimmungen für Druckbehälter legen die zulässigen Höchsttemperaturen fest wie folgt:

- Gemäß der europäischen Norm EN 13455 liegt die höchstzulässige Betriebstemperatur bei 250 °C. Dieser Ansatz ist deutlich konservativ.
- ASME VIII Abt. 1 nennt für die meisten Sorten eine Höchsttemperatur von 316 °C, wobei für alle ein Warnhinweis gegeben werden muss, dass jenseits von 260 °C Versprödung auftreten kann.

Bisher wird nicht zwischen Standard- und Lean-Duplex-Stählen unterschieden, was sich in Zukunft jedoch ändern kann.

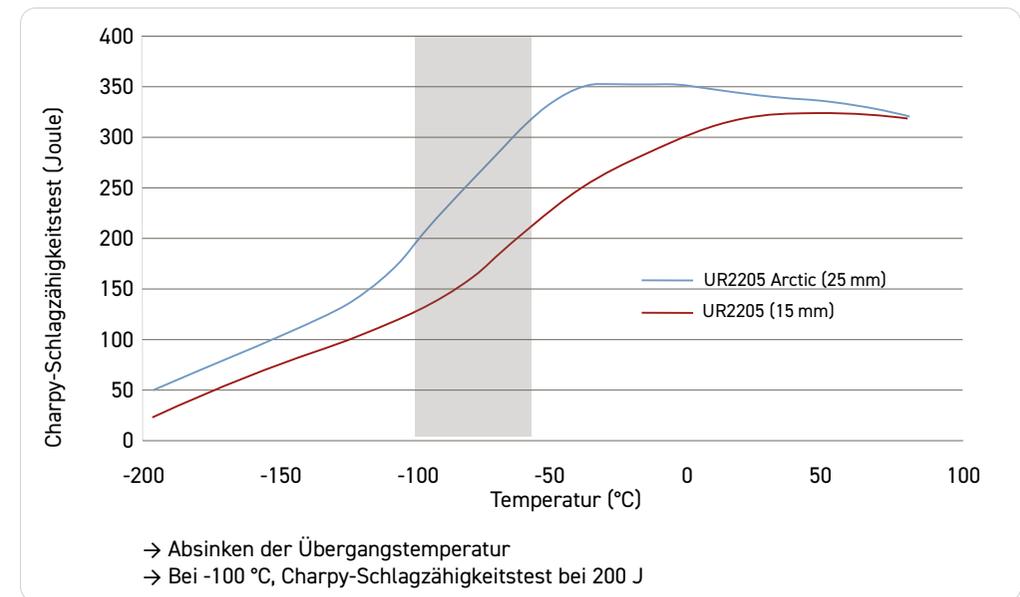
## 5.2.2 Niedrige Temperaturen (Ref. 5.7 bis 5.9)

Im Unterschied zu austenitischen Sorten geht das Formänderungsverhalten mit sinkender Temperatur von duktil zu spröde über, erkennbar an der geringer werdenden Schlagzähigkeit (die zumeist mithilfe des Charpy-Tests ermittelt wird). Hierdurch ist die Nutzbarkeit nichtrostender Duplex-Stähle für kryotechnische Anwendungen begrenzt. Die tiefsten Temperaturen, bei der Duplex-Sorten verwendet werden können, hängen von der erforderlichen Mindest-Schlagzähigkeit ab. Allerdings kann die Schlagzähigkeit bei niedrigen Temperaturen durch eine Reihe von Modifikationen verbessert werden:

- geringfügige Herabsetzung des Ferritanteils durch Anpassung der chemischen Zusammensetzung,
- optimierendes Schmieden oder Warmwalzen oder
- gezielte Wärmebehandlung.

Die nichtrostenden Duplex-Stähle erfüllen die Anforderungen internationaler Normen (z.B. ASTM, NACE und Norsok), in denen Charpy-KV-Werte von mindestens 45 J bei -46 °C verlangt werden.

In jüngster Zeit haben die Anforderungen an den Einsatz unter arktischen Bedingungen bis -80 °C zur Optimierung bestimmter Sorten geführt, die Werte von 200 J bei -100 °C erreichen (**Abb. 5.4**). In der Regel bestimmen die Eigenschaften der Schweißnähte die niedrigstmögliche Einsatztemperatur.



**Abb. 5.4** Einfluss der Temperatur auf die Schlagzähigkeit bei einem für niedrige Temperaturen optimierten Duplex-Stahl EN 1.4462 (Ref. 5.7)

### 5.3 Kaltverfestigung (Ref. 5.10 bis 5.15)

Kaltverfestigung ist ein gängiges Verfahren, das z.B. bei der Herstellung von Drahtprodukten häufig angewandt wird, um deren mechanische Eigenschaften auf die Anwendung abzustimmen.

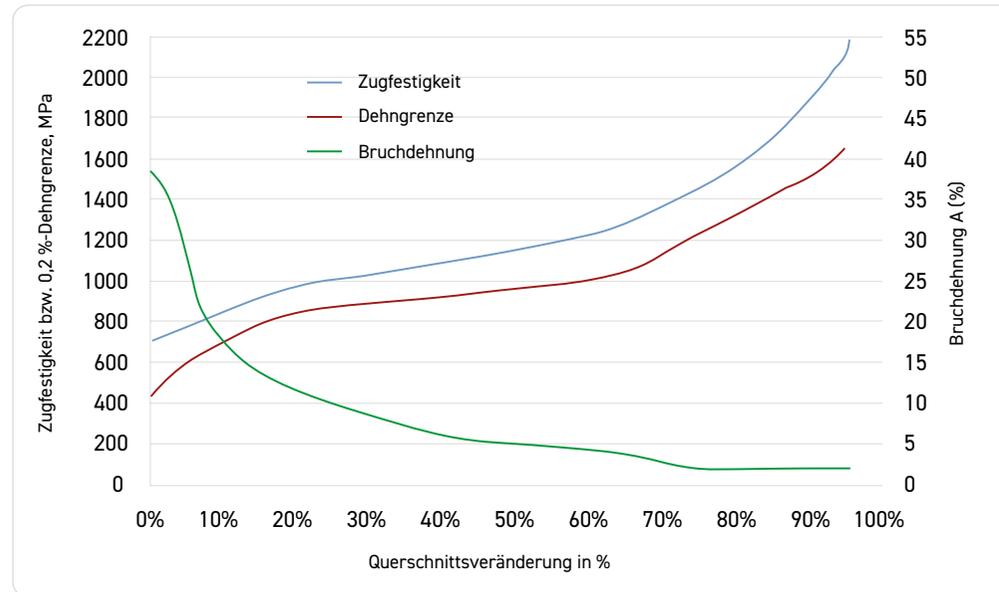


Abb. 5.5a Kaltverfestigungskurve für den Lean-Duplex-Stahl EN 1.4062 (UNS S32202; Ref. 5.1)

Abb. 5.5a und 5.5b zeigen die jeweiligen Kaltverfestigungskurven eines Lean-Duplex- und eines Super-Duplex-Stahls. Erwartungsgemäß steigt die Festigkeit mit dem Grad der Umformung, während die weitere Dehnung abnimmt. Super-Duplex-Sorten erreichen höhere Zugfestigkeiten als Lean-Duplex-Stähle.

Abbildung 5.6 zeigt den Vergleich des Kaltverfestigungsverhaltens austenitischer Sorten (EN 1.4301/ASTM 304 und EN 1.4401/ASTM 316), eines halbaustenitischen ausscheidungshärtenden Stahls EN 1.4548 (ASTM 631), auch als 17-7PH bekannt) sowie mehrerer Duplex-Werkstoffe (EN 1.4162/UNS S32101, EN 1.4362 /UNS S32304 und EN 1.4462/UNS 32205).

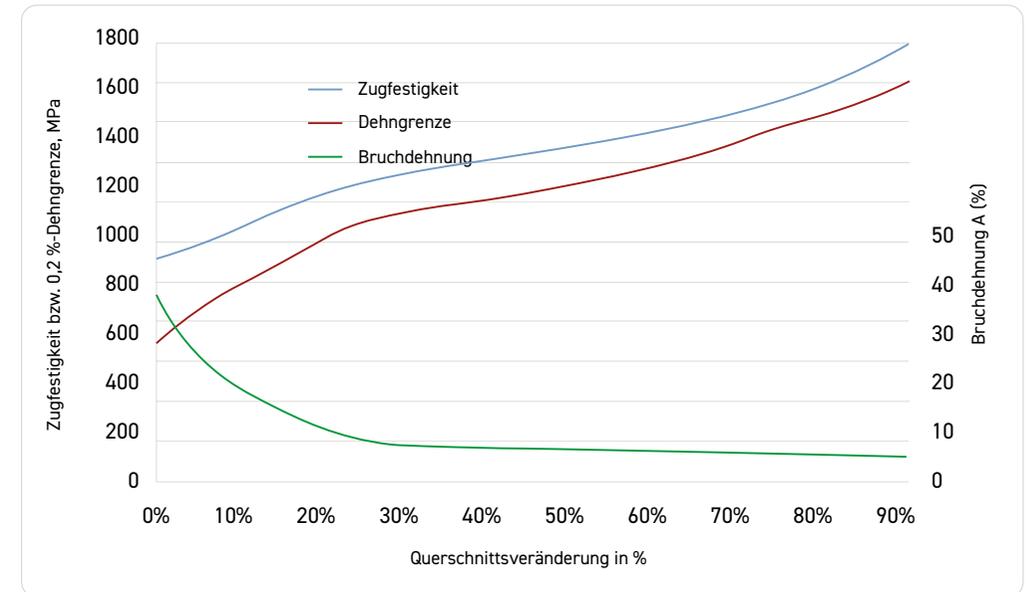


Abb. 5.5b Kaltverfestigungskurve für den Super-Duplex-Stahl 1.4410 (UNS S32750; Ref. 5.10)

Nichtrostende Duplex-Stähle erreichen nicht die Festigkeit des austenitischen Federstahls EN 1.4310 (ASTM 302), sind jedoch für Anwendungen geeignet, in denen sowohl hohe Festigkeit als auch hohe Korrosionsbeständigkeit, insbesondere gegen Spannungsrisskorrosion, erforderlich sind.

Abb. 5.7 zeigt die Spannungsrelaxation von Duplexsorten als Funktion der Zeit. Die Behandlung bezieht sich auf eine kontinuierliche induktive Erwärmung von weniger als 1 min auf ca. 380–400 °C, wie sie für Stahl typisch ist. Dabei ist zu beachten, dass induktive Erwärmung bei den teilweise ferromagnetischen nichtrostenden Duplexsorten wirksamer ist als bei den paramagnetischen austenitischen.

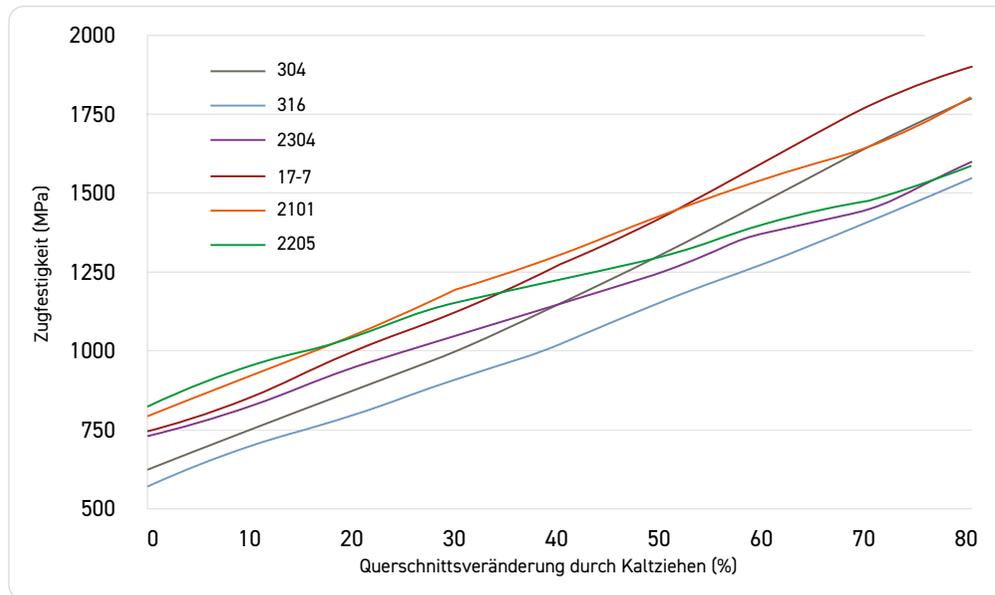


Abb. 5.6 Vergleich der Zugfestigkeitswerte verschiedener nichtrostender Stähle (Ref. 5.12)

Die Eignung kaltverfestigter Duplex-Stähle für das Vor- und Nachspannen von Beton war Gegenstand mehrerer Untersuchungen (Ref. 5.12 bis 5.15). Die Ergebnisse zeigen, dass für vorgefertigte vorgespannte Betonpfeiler Matten mit niedriger Relaxation aus nichtrostendem Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S32205) mit 250 ksi (1720 MPa) Zugfestigkeit verwendet werden können. Dabei werden dieselben Verfahren angewandt wie bei konventioneller Vorspannung und Bewehrung.

Aus Kostengründen hat sich diese Anwendung bislang noch nicht durchgesetzt, obgleich Probleme mit dem Langzeitverhalten sowohl bei vor- bzw. nachgespanntem Beton als auch bei Schrägseilbrücken berichtet wurden, in denen konventioneller Stahl zum Einsatz gekommen war. Kaltverfestigter nichtrostender Duplex-Stahl findet sich derzeit in unterschiedlichen Anwendungen: Befestigungselemente der Festigkeitsklasse 10.9 (Zugfestigkeit  $\geq 1000$  MPa und Fließgrenze  $\geq 900$  MPa), erosionskorrosionsbeständige Profile, lastbeanspruchte Bauteile (Profile), hochfester Betonstahl (Streckgrenze  $\geq 700$  MPa) usw.

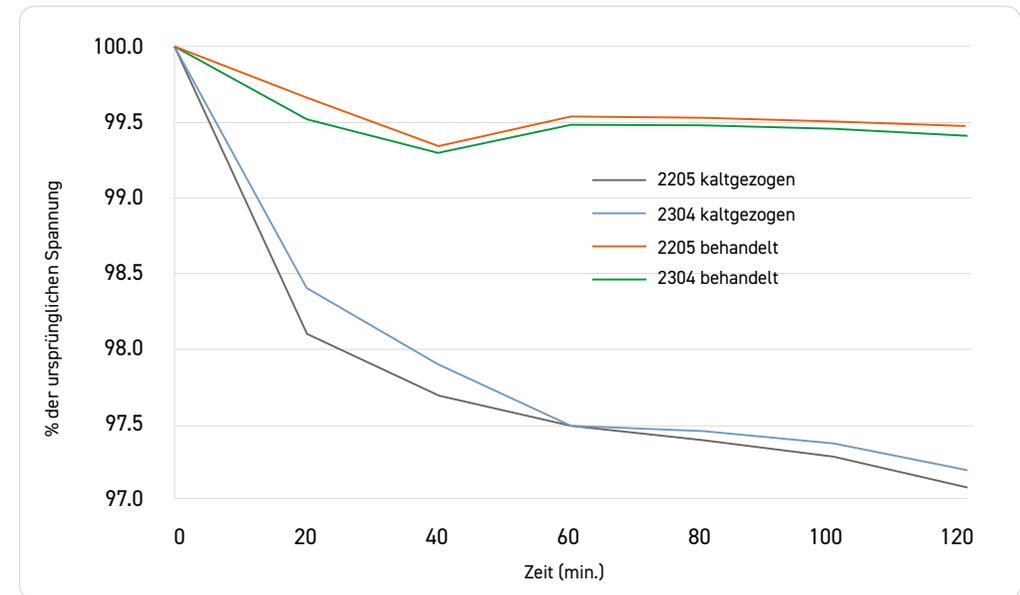
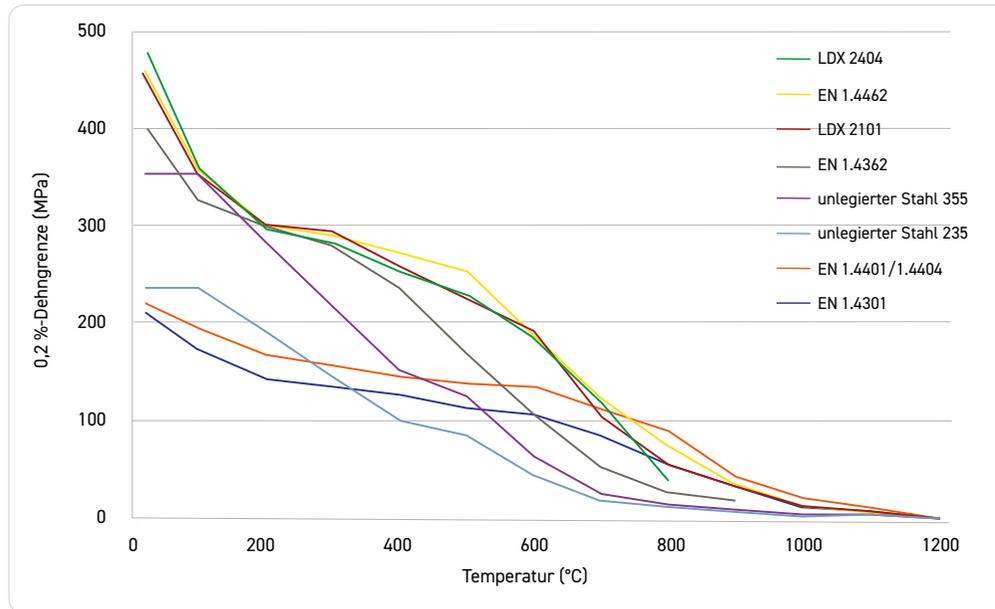


Abb. 5.7 Spannungsrelaxation von nichtrostenden Duplex-Stählen (Ref. 5.12)

## 5.4 Brandverhalten (Ref. 5.16 bis 5.18)

Die Baunormen umfassen auch Anforderungen an die Brandsicherheit. Meist wird die Feuerwiderstandsklasse R120 verlangt, d.h., das Tragwerk muss mindestens 120 Minuten standfest bleiben, bevor es unter einer in ISO 843 definierten, für zellulosehaltige brennbare Stoffe typischen Brandlast versagt.

Abbildung 5.8 zeigt die temperaturabhängige Veränderung der Zugfestigkeit von Baustahl, austenitischem sowie nichtrostendem Duplex-Stahl. Im Bereich 400–700 °C weisen nichtrostende Duplex-Stähle die höchsten Restfestigkeitswerte in MPa auf, auch wenn sie gegenüber dem Wert bei Raumtemperatur deutlich geringer sind. Nichtrostende Duplex-Stähle zeigen bei allen Temperaturen höhere Festigkeiten als Baustähle, wobei die Sorte EN 1.4462 (UNS S32205) bis zu 800 °C die höchste Festigkeit behält.



**Abb. 5.8** Einfluss der Temperatur auf die Dehngrenze bei austenitischem, Duplex- und unlegiertem Stahl (Ref. 5.17)

Duplex-Stähle, insbesondere Lean-Duplex-Sorten, werden inzwischen vielfach als Bewehrungsstähle eingesetzt, denn sie sind fest und korrosionsbeständig, auch gegen Spannungsrisskorrosion.

Bestimmungen zur Brandsicherheit gelten nicht allein für gewerbliche, Büro- und Wohngebäude; auch Industrien, die mit leichtentzündlichen Flüssigkeiten und Gasen oder gefährlichen Chemikalien arbeiten, unterliegen strengen Anforderungen. Nichtrostende Stähle, insbesondere Duplex-Sorten, kommen ihnen entgegen. Explosionsschutzwände auf **Öl- und Gas-Bohrplattformen** sind ein bekanntes Beispiel.

## 5.5 Erdbebensicherheit (Ref. 5.19)

Schäden durch Erdbeben gehen auf drei Effekte zurück:

- eine laterale Kraft, die auf das Fundament des Bauwerks ausgeübt wird und direkt proportional zu den (zuweilen 1 g überschreitenden) Beschleunigungskräften ist, die von Seismographen erfasst werden. Das Bauwerk kann in diesem Fall einstürzen;
- ein Torsionsmoment, das auf asymmetrische Bauwerke einwirkt, deren Schwerpunkt nicht auf einer Symmetrieachse liegt;
- bei sehr hohen Gebäuden eine Resonanzwirkung.

Da es impraktikabel und vermutlich auch nicht möglich ist, Bauwerke so zu planen, dass sie sich lediglich elastisch verformen, wird darauf abgezielt, Schäden zwar zuzulassen, das Tragwerk dabei aber standfest und soweit wie möglich funktionstüchtig zu erhalten. Das Ziel ist, tragende Bauteile so auszubilden, dass sie möglichst viel Energie aufnehmen können, d.h. fest und stark verformbar sind, ohne zu brechen.

Austenitische und Duplex-Stähle verhalten sich in dieser Hinsicht sehr günstig.

Zwar steht die Sicherheit von Gebäude im Vordergrund, aber auch bei technischen Anlagen kann ein Versagen ernsthafte Konsequenzen haben. Eine Analyse der Erdbebensicherheit großer Lagertanks ist in Ref. 5.19 veröffentlicht.

## 6 Anwendungen

Im Folgenden werden einige aktuelle Anwendungen nichtrostender Duplex-Stähle vorgestellt. Künstler, Architekten, Designer und Ingenieure haben die Vorzüge nichtrostender Duplex-Stähle erkannt und nutzen sie. Inzwischen hat diese Werkstoffgruppe auch Eingang in Baunormen für tragende Konstruktionen gefunden. In der Regel stellen nichtrostende Duplex-Stähle eine bessere Alternative zu korrosionsgeschütztem Baustahl dar – beginnend bei den Erstellungskosten.

### 6.1 Kunst

Nichtrostende Duplex-Stähle werden zunehmend auch von Künstlern verwendet, wenn sie feste und langlebige Materialien suchen. Nachstehend werden drei Beispiele angeführt.

Die Skulptur **“Arches of Oman”** (Ref. 6.1.1) von Giles Rayner besteht aus zwei ineinander verschlungenen Stoßzähnen aus poliertem nichtrostendem Stahl. Ein Wasservorhang, der aus den Innenflächen hervortritt, verbindet sie. Die Skulptur ragt 12 m aus einem 60 m breiten ovalen Becken heraus. Das aus 77 vertikalen Düsen austretende Wasser erinnert an ein Saiteninstrument. Der Standort der Skulptur liegt in Privatgärten außerhalb des Königlichen Opernhauses von Muscat in Oman. Gefertigt wurde sie aus nichtrostendem Duplex-Stahl der Sorte EN 1.4462 (UNS S32205), der wegen seiner Festigkeit, Oberflächenbeschaffenheit und Korrosionsbeständigkeit in heißem Küstenklima ausgewählt wurde.

Zu betonen ist, dass nichtrostende Duplex-Stähle im Allgemeinen nicht mit anderen Arten nichtrostender Stähle im Wettbewerb stehen. Vielmehr ergänzen sie einander und es ist keineswegs ungewöhnlich, sie in einer Anwendung gemeinsam verbaut zu finden. Hierzu später einige Beispiele.

*Arches of Oman in Muscat, Oman  
(Künstler: Giles Rayner).  
Foto: archesoman.com*





Venus Rising in Brisbane (Künstler: Ross Wolfgang Buttress)

Zu **"Venus Rising"** (Ref. 6.1.2) wurde der Künstler Ross Wolfgang Buttress durch die Fibonacci-Zahlenfolge und die ineinander geschachtelten Segmente der Nautilus-Muschel inspiriert. Die schlanke, 23 m hohe Konstruktion steht im Kangaroo Point Park im australischen Brisbane. Aus dem austenitischen Stahl EN 1.4401 (ASTM 316) und dem Duplex-Stahl 1.4462 (UNS S32205) gefertigt, dürfte sie auch in 50 Jahren noch wie im Neuzustand aussehen.

### "The Runners" (Ref. 6.1.3)

Diese 4,90 m hohe Skulptur von Dr. T. Papagiannis befindet sich im Bereich eines Autobahnkreuzes nahe dem Flughafen Chicago O'Hare. Sie stellt fünf Läufer dar, die aus dem Altertum in die moderne Welt treten, wobei letztere von Chicago, einer „Stadt in Bewegung“ repräsentiert wird. Sie besteht aus 57 mm dickem, wasserstrahlgeschnittenem Grobblech aus Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S 32205). Jeder der Läufer wiegt rund drei Tonnen. Die Skulptur, die den strengen Wintern Chicagos und entsprechender Streusalzbelastung ausgesetzt ist, dürfte eine Lebensdauer von über 1000 Jahren haben.



The Runners in Chicago (von Dr. T. Papagiannis)  
Foto: CS Associates Inc.

## 6.2 Architektur

Duplex-Stähle haben die Einsatzbandbreite der nichtrostenden Stähle in der Architektur erweitert, indem sie höhere Festigkeit und höhere Korrosionsbeständigkeit miteinander verbinden. Planungshandbücher und Leitfäden für nichtrostenden Stahl berücksichtigen inzwischen auch hochfeste Duplexsorten (Ref. 6.2.1 bis 6.2.8).

Das nachstehende Kapitel stellt einige herausragende Projekte vor.



Waterfront Building, Stockholm

Foto: Outokumpu

### Waterfront Building, Stockholm (Ref. 6.2.1)

Dieses Stockholmer Kongresszentrum verfügt über eine Fassade aus nichtrostendem Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S32205) mit 2E-Oberfläche, die aus 3500 Z-förmigen Lamellen besteht. Sie ergeben nicht nur einen dynamischen Welleneffekt und ein außergewöhnliches Erscheinungsbild; im Sommer verringern sie auch die Aufheizung, während sie im Winter das Sonnenlicht in das Gebäude eindringen lassen und zu dessen passiver Beheizung beitragen. Das Gebäude hat LEED-Gold-Status.

### Louvre Abu Dhabi, ein Lichtregen (Ref. 6.2.2)

Der Louvre Abu Dhabi des Architekten Jean Nouvel weist eine Doppelkuppel aus sich überlagernden geflechtartigen Schalen mit einem Durchmesser von 150 m auf. Von innen stellt sie sich als eine Haut aus Lichtsprenkeln dar. Die Wasserbecken, die Öffnungen und die Kuppel ergeben im Inneren einen Mikrokosmos voller Licht, Schatten und Bewegung. Das Dach besteht aus acht miteinander verbundenen Schichten von Aluminium und nichtrostendem Duplex-Stahl. Rund 300 t nichtrostender Stahl wurden im Dach verbaut. Darüber wurde das Tragwerk mit 250 t nichtrostendem Bewehrungsstahl armiert.



Louvre in Abu Dhabi (Arch.: Jean Nouvel), Foto : Liz Coughlan



Dach des Flughafens Doha, Katar  
Foto: Hamad International Airport

#### Dach des Flughafens Doha (Ref. 6.2.3)

Der Flughafen von Doha, Katar, setzt neue Maßstäbe in Bezug auf Eleganz, Komfort und smarte Technologie. Eines seiner herausragendsten Merkmale ist das wellenförmige Dach aus nichtrostendem Stahl (350.000 m<sup>2</sup>). Es muss Hitze, Feuchtigkeit und Salzkorrosion aushalten sowie reflexmindernd sein, damit Piloten nicht geblendet werden. Ein nichtrostender Duplex-Stahl mit 21,5 % Cr, 3,7 % Ni, 1,8 % Mo und 0,17 % N kam zur Anwendung, weil er die erforderliche Korrosionsbeständigkeit und eine günstige

spezifische Festigkeit aufwies. Eine produkteigene Oberflächenausführung vereinigte geringen Glanzgrad und einheitlich gemustertes Aussehen.

#### „La Sagrada Familia“ (Ref. 6.2.4 und 6.2.5)

Der Bau der weltberühmten, von Gaudí geplanten Basilica de la Sagrada Familia in Barcelona begann 1882. Das gigantische Projekt nähert sich nun seiner Vollendung – geplant ist sie für 2026. Zu verdanken ist das den Möglichkeiten, die sich durch neue Technologien und Werkstoffe eröffnen, dazu gehört auch nichtrostender Stahl. Die Wahl fiel wegen ihrer hohen Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit auf die nichtrostende Duplex-Sorte EN 1.4462 (UNS S32205).

Sie gewährleistet eine lange Lebensdauer und ermöglichte es, die oberen Ebenen des Turmes leichter zu bauen. Bewehrungsstahl, Grobblech und Profile fanden Verwendung in den vorgefertigten Teilen, die sich an der Baustelle leicht zusammenfügen ließen und so auch die Kosten senkten. Gaudís Meisterwerk wird nun mit Werkstoffen und Technologien vollendet, die zu seinen Lebzeiten noch gar nicht existierten. Was hätte er wohl geplant, hätte sie es schon gegeben?



La Sagrada Familia, Barcelona  
(Arch.: Antoni Gaudí), Foto: Outokumpu

#### Louis-Vuitton-Stiftung (Ref. 6.2.6 bis 6.2.8)

Frank Gehrys bemerkenswertes Bauwerk für die Louis-Vuitton-Stiftung, ein Museumsbau in Paris, besteht aus 12 spektakulären Glassegeln, die aus verschachtelten Stahlpfeilern, Trägern, Stäben usw. bestehen. Insgesamt fanden 1.500 t nichtrostender Duplex-Stahl Verwendung für Knoten, Ausfachungen, Pfosten-Riegel-Konstruktionen und Dachentwässerung.



Fondation Luis Vuitton Stiftung, Paris  
(Arch.: Frank Gehry), Foto: Daniel Rodet

## 6.3 Brücken (Ref. 6.3.1 bis 6.3.14)

Weltweit gibt es Hunderttausende von Brücken, allein in den Vereinigten Staaten über 600.000 – und es werden immer mehr. Sie schaffen lebenswichtige Verbindungen zwischen Regionen und Ländern. Sie zu unterhalten und/oder zu erneuern, verschlingt im Laufe der Zeit enorme Summen.

Lebensdauerbezogene Kostenberechnungen (*Life Cycle Cost, LCC*) zeigen immer wieder, dass es bei Bauten, deren Auslegungslbensdauer bei über 100 Jahren liegt, wirtschaftlich sinnvoll ist, sie auf eine Minimierung der Unterhaltskosten ausulegen. Nichtrostende Duplex-Stähle sind eine außerordentlich attraktive Art, Standsicherheit über praktisch unbegrenzte Zeiträume sicherzustellen – dank ihrer Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit, die unter allen Wetter- und Klimabedingungen gewahrt bleiben. Die zusätzlichen Erstellungskosten gegenüber niedrigpreisigeren, aber auch kurzlebigeren Werkstoffen liegen, wenn diese Stähle allein in den kritischen Bereichen eingesetzt werden, unter 10 %.

Die folgenden ausgewählten Fälle verdeutlichen den Einsatz nichtrostender Duplex-Stähle in Brücken für den Straßen-, Schienen- und Fußgängerverkehr bzw. die gemischte Nutzung für Autos, Bahn und Radfahrer.

Dabei kommen die unterschiedlichsten Produkte zur Anwendung: Hohlprofile, Zugstäbe, Bewehrungsstähle, Grobblech, Verbindungsmittel usw. Sie zeigen die Vielzahl der Optionen, die Architekten und Bauingenieuren zur Verfügung stehen.



Stonecutters Bridge, Hongkong  
Foto: Outokumpu

### 6.3.1 Straßen- und Eisenbahnbrücken

#### Stonecutters Bridge, Hongkong (Ref. 6.3.6. bis 6.3.8)

Diese ikonische, stark verkehrsbelastete Brücke befindet sich in einem urbanen Umfeld. Sie wurde so geplant, dass sie tropischen Wetterbedingungen, städtischer Luftverschmutzung, Meerwasser-Nebel, Wind, Taifunen, dem Anprall von Schiffen und Erdbeben standhält. Zum Zeitpunkt ihrer Eröffnung (2009) war sie die erste Schrägseilbrücke mit einer Spannweite von über 1 km.

Ausgelegt ist sie auf eine Lebensdauer von 120 Jahren. Grobblech der Duplex-Sorte EN 1.4462 (UNS S32205) ummantelt den Beton im oberen Teil der Pylone, ferner bestehen die Verankerung der Schrägseile sowie die Bewehrung des Fundaments und des unteren Teils der Pylone aus diesem Werkstoff.

#### Champlain Bridge, Montreal (Ref. 6.3.9 und 6.3.10)

Die neue, aus dem Jahr 2019 stammende Brücke ersetzt ein Vorgängerbauwerk, das der Korrosion zum Opfer fiel. Sie hält ausgeprägten Frost-Tau-Zyklen stand, die eine Temperaturspanne von -25 °C bis 30 °C umfassen können. Mit ihrer Länge von 3,4 km überspannt sie den St.-Lorenz-Strom und den Schifffahrtsweg. Jährlich nutzen sie über 50 Millionen Fahrzeuge. Das elegante Bauwerk weist einige Neuerungen auf. So besteht es weitgehend aus vorgefertigten Elementen und trägt künftigen Mobilitätskonzepten Rechnung, indem sie eine Nahverkehrs-Bahntrasse, eine vierspurige Schnellstraße, eine Fahrbahn für Radfahrer und Aussichtspunkte für Touristen vorsieht.



Champlain Bridge, Montreal, Kanada  
Foto: Infrastructure Canada

#### Brücke Hongkong–Zhuhai–Macao (Ref. 6.3.11 und 6.3.12)

Die Brücke ist Teil einer 50 km langen Verkehrsverbindung, die drei Schrägseilbrücken, einen 6,7 km langen Meerestunnel sowie drei künstliche Inseln umfasst. Die Bauarbeiten dauerten neun Jahre; die geschätzten Baukosten lagen bei 20 Milliarden Dollar. 2018 ging das auf 100 Jahre Nutzungsdauer ausgelegte Brückenbauwerk in Betrieb. In seinen kritischen Teilen enthält es über 10.000 t nichtrostenden Duplex-Stahl.



Brücke Hongkong–Zhuhai–Macao



Brücke in Cala Galdana, Menorca

Foto: Pedelta



Brücke in Fort Worth, Texas

#### **Brücke in Fort Worth, Texas (Ref. 6.3.13)**

Diese Brücke ist als weltweit erste Bogenbrücke aus vorgefertigten Elementen erbaut, 12 an der Zahl. 2013 wurde sie vollendet. Ein innovatives Merkmal besteht in den schräg verlaufenden Zugstäben, die den oberen und unteren Teil der Konstruktion miteinander verbinden. Sie bestehen aus dem Werkstoff EN 1.4462 (UNS S32205) und gewährleisten Standsicherheit und Tragfähigkeit. Die Bauweise ist sehr effizient, elegant und stellt eine lange Lebensdauer sicher.

#### **Brücke in Cala Galdana, Menorca (Ref. 6.3.14)**

Im vorliegenden Fall ersetzte eine Brücke aus nichtrostendem Stahl ein Vorgängerbauwerk aus Stahlbeton. Nichtrostender Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S32205) erhielt wegen seiner höheren Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit den Vorzug gegenüber konventionellem Stahl. Die geforderte Mindest-Zugfestigkeit lag bei 460 MPa, nachweislich erreicht wurden 535 MPa. Baustahl hätte lediglich 355 MPa aufgewiesen. Das Tragwerk aus nichtrostendem Stahl wurde vor Ort aus acht vorgefertigten Segmenten zusammengefügt. Die Bauzeit erstreckte sich von Oktober 2004 bis Juni 2005.

## 6.3.2 Fußgängerbrücken



Helix Bridge, Singapur

Foto: Christopher Frederick Jones

#### **Helix Bridge, Singapur (Ref. 6.3.16)**

Die einzigartige, 280 m lange Doppelhelix-Struktur, die den Fußweg trägt, besteht aus Hohlprofilen und Grobblechen aus dem Werkstoff EN 1.4462 (UNS S32205). Diese Sorte wurde wegen ihrer Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit in tropischer Meeresatmosphäre ausgewählt. Über die Gesamtlebensdauer hinweg

werden die Kosten dieser Brücke niedriger liegen als bei Baustahl. In den Abendstunden wird sie eindrucksvoll weiß angeleuchtet, was auf der Oberfläche des nichtrostenden Stahls besonders gut zur Geltung kommt.



Fußgänger-Klappbrücke

Foto: Industeel

### TRUMPF-Fußgängerbrücke, Ditzingen, Deutschland (Ref. 6.3.18)

Die Fußgängerbrücke über die vielbefahrene Gerlinger Straße verbindet zwei Bereiche des Werksgeländes am TRUMPF-Stamm-sitz in Ditzingen. Gefertigt wurde sie mit TRUMPF-Laserschneidemaschinen aus dünnem, festem und hoch korrosionsbeständigem nichtrostendem Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S32205). Die Form ist besonders markant und zeigt, dass Duplex-Stahl keineswegs großen Brücken vorbehalten ist.



TRUMPF-Fußgängerbrücke, Ditzingen

Foto: schlaich bergermann partner

### Fußgänger-Klappbrücke, Lyon, Frankreich (Ref. 6.3.17)

In einem Gebiet, das nahe des neuen Musée des Confluences gelegen, aufwertend umgestaltet wurde, schafft diese Brücke aus nichtrostendem Stahl eine Durchfahrtmöglichkeit für Schiffe in das Dock. Sie ist elegant, form-schön und erfordert keinerlei Unterhalt.



Hafenbrücke San Diego, Kalifornien

Foto: Sherry V. Smith

### Hafenbrücke San Diego, USA (Ref. 6.3.19)

Diese 168 m lange Zügelgurtbrücke ist von beeindruckender Schönheit. Die gewölbte Brückenplatte wird von Schrägseilen getragen, die an einem einzelnen, geneigten Pylon aufgehängt sind. Hierdurch entsteht eine äußerst einfache und ansprechende Konstruktion. Für tragende Teile, Brüstung, Seile und Verbindungen kamen der nichtrostende Duplex-Stahl UNS S31803 (der in die Analysebandbreite der europäischen Sorte EN 1.4462 fällt) sowie die austenitische Sorte EN 1.4438 (ASTM 317L) zur Anwendung. Die Lebensdauer ist in dieser Meeresatmosphäre mit mehr als 100 Jahren veranschlagt.

## 6.4 Küstenschutz

### Flutwand in Cromer, Großbritannien (Ref. 6.4.1)

Cromer ist ein hübsches viktorianisches Seebad in Nord-Norfolk. Eine Beton-Flutwand und hölzerne Bühnen schirmen den Ort gegenüber dem Meer ab. Nach einem heftigen Sturm mussten 2013 umfangreiche und kostspielige Erneuerungsarbeiten durchgeführt werden – nicht nur, um das seinerzeitige Schutzniveau zu halten, sondern auch, um dem für die nächsten 100 Jahre zu erwartenden Anstieg des Meeresspiegels Rechnung zu tragen. Bei diesem Vorhaben wurden über 300 t Bewehrungsstahl der nichtrostenden Duplex-Sorte EN 1.4362 (UNS S32304) verbaut.



Küstenschutzmauer, Cromer, Großbritannien  
Foto: Archant/Anthony Kelly



Fluttor in Kamihirai, Japan  
Foto: NIPPON STEEL Stainless Steel Corporation

### Tsunamifeste Fluttore, Japan (Ref. 6.4.3)

Japan zahlt immer wieder einen hohen Preis für tsunamibedingte Katastrophen, zuletzt bei dem Kernkraftunglück von Fukushima. Im Rahmen eines nationalen Programms für den erdbebensicheren Wiederaufbau, das auf Sicherheit und Widerstandsfähigkeit abzielt, wurden über 50 Fluttore gebaut.

Dabei handelt es sich um imposante Konstruktionen. So ist das Tor von Kamihirai 11 m hoch, 2 m höher als das vorige. Der Einsatz der Duplex-Stähle SUS 323L (EN 1.4362/UNS S32304) und SUS821L1 (21 % Cr, 2 % Ni, 3 % Mn, 1 % Cu, 0,17 % N) ermöglichte eine größere Höhe ohne höheres Gewicht.



Mole in Bayonne, Frankreich  
Foto: Ugitech

### Mole in Bayonne, Frankreich (Ref. 6.4.2)

Die in den 1960er Jahren erbaute Mole schützt die Hafeneinfahrt bei Sturm. Sie umfasst eine Mauer und einen Pier, der breit genug ist, einen Schwerlastkran zu tragen. Dieser Kran hievt Betonblöcke von jeweils 40 t in Position, welche die Energie der auslaufenden Wellen meeresseitig brechen. Da der Pier schließlich selbst Risse zeigte, wurde er mit hochfestem Betonstahl aus der Duplex-Sorte EN 1.4462 (UNS S32205) instandgesetzt, dessen Streckgrenze 750 MPa beträgt. Er erlaubte es, die erforderliche Stahlmenge wesentlich zu verringern. Letztlich wurden 130 t Bewehrungsstahl eingesetzt.



Schleusentore am Mont Saint Michel, Frankreich

### Sperrwerk am Mont Saint Michel, Frankreich (Ref. 6.4.4)

Der Mont Saint Michel gehört zu den meistbesuchten touristischen Attraktionen Frankreichs. Die winzige Insel mit ihrem Kloster und einem Engel, der es überragt, liegt in einer Bucht. Im Laufe der Zeit versandete die Bucht immer mehr und veränderte damit die Landschaft. Deshalb wurde ein Sperrwerk errichtet, welches das bei Flut einströmende Wasser zurückhalten

und bei Ebbe wieder freigeben soll. Hierdurch werden zweimal am Tag Sedimente fortgespült. Die acht Gruppen von Sperrtoren bestehen jeweils aus 24 t Baustahl und 6 t Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S32205). Letzterer wurde wegen seiner Beständigkeit gegen Korrosion und reibende Beanspruchung ausgewählt. Damit wird der Mont Saint Michel nun dem Meer zurückgegeben.



Wehre an den Tammerkoski-Schnellen, Finnland

#### **Stauwehr in Tampere, Finnland (Ref. 6.4.5)**

Die Tammerkoski-Stromschnellen verlaufen quer durch die Stadt Tampere, wo sie vier Wasserkraftwerke antreiben. Ein laufendes Instandsetzungsprojekt soll die beiden Kanäle der Wehranlage in einer Weise modernisieren, die der kulturell und historisch bedeutsamen Lage gerecht wird. Seit 100 Jahren wird der Wasserstrom in den Kanälen durch Bauwerke und Anlagen gesteuert, die nun das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Die alten Schütze bestanden größtenteils aus Holz und benötigten mehrere Stunden für Ihre Betätigung.

Die neuen Kanäle sind auf eine Nutzungsdauer von 200 Jahren ausgelegt. Für die wesentlichen tragenden Elemente der Schütze wurde dem Duplex-Stahl EN 1.4162 (UNS S32101) gegenüber korrosionsgeschütztem Baustahl der Vorzug gegeben.



Stadterweiterung ins Meer hinein, Monaco

Foto: Bouygues TP



Gründungsarbeiten, Monaco

Foto: Cedinox

#### **Stadterweiterung ins Meer, Monaco**

(Ref. 6.4.6)

Das Fürstentum Monaco an der Mittelmeerküste erweitert ihr winziges Territorium (2 km<sup>2</sup>) ins Meer hinein und schafft ein neues, 600.000 m<sup>2</sup> großes Wohn- und Gewerbegebiet. Die geschätzten Kosten belaufen sich auf zwei Milliarden Euro. Die technischen Herausforderungen sind gewaltig: Zunächst muss ein provisorischer Damm eine Umgrenzung schaffen. Dann muss eine Betonwand errichtet werden, die mindestens 100 Jahre überdauern soll. Schließlich muss der so gewonnene Raum verfüllt und für den Bau von Wohnhochhäusern vorbereitet werden. Gleichzeitig sollen die Auswirkungen auf das Meeresbiotop so gering wie möglich bleiben. Über 4.000 t des Duplex-Stahls EN 1.4362 (UNS S32304) werden als Betonstahl dienen, um die Betonmauern zu bewehren und vor Korrosion durch Meerwasser zu schützen.

## 6.5 Denkmalpflege

Nichtrostende Duplex-Stähle kommen inzwischen auch in der Denkmalpflege zur Anwendung, wenn besondere Anforderungen an Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit gestellt werden. Hier einige Beispiele:

Die New Yorker Ikone, die 1886 errichtete **Freiheitsstatue** (Ref. 6.5.1), wurde 1981 instandgesetzt. Dabei fand für die Sekundärkonstruktion nichtrostender Stahl EN 1.4404 (ASTM 316L) Verwendung, der die ursprüngliche eiserne Ausführung ersetzte. Diese wird wiederum durch ein Tragwerk aus hoch korrosionsbeständigem nichtrostendem Duplex-Stahl EN 1.4507 (UNS S32550) gestützt. Austenitischer und Duplex-Stahl bilden gemeinsam eine Lösung, die den Korrosionsbedingungen, bei denen Chloride, Luftverschmutzung und galvanische Elemente zusammenkommen, gerecht wird.

Das große **Kriegsschiff Vasa** (Ref. 6.5.2) lief am 10. August 1628 vom Stapel und sank sogleich auf ihrer Jungfernfahrt. Nach 300 Jahren auf dem Meeresgrund wurde sie in den 1950er Jahren gehoben und befindet sich nun im Stockholmer Vasa-Museum. Die erforderlichen Konservierungsarbeiten umfassten auch den Austausch der eisernen Verbindungselemente, welche die



Freiheitsstatue, New York  
Foto: Maurice Le Bail, Pixabay

Balken zusammenhielten. Die epoxidharzbeschichteten verzinkten Befestigungsteile rosteten und mussten durch federverspannte Hohlschrauben aus Super- und Hyper-Duplex-Stahl ersetzt werden. Hierdurch ließ sich das Gewicht von 16 t auf 5 t reduzieren.



Teilansicht der Vasa  
Foto: Anneli Karlsson, Schwedisches Maritimes Nationalmuseum



Nichtrostender Bewehrungsstahl  
im Boden der Kirche Santa Catalina, Spanien  
Foto: Cedinox

### Kirchen

Weniger augenfällige, aber gleichermaßen wichtige Restaurierungsarbeiten wurden bei den denkmalgeschützten Kirchen Santa Catalina (Ref. 6.5.3) und San Antonio (Ref. 6.5.4) in Spanien ausgeführt. Hier bewehren nichtrostende Duplex-Betonstähle das Tragwerk.

## 6.6 Tunnel

Straßentunnel sind äußerst korrosiven Bedingungen ausgesetzt: Hitze, Feuchtigkeit, schadstoffhaltigen Autoabgasen und, in Küstenatmosphäre oder bei winterlichem Streusalzeinsatz, eingetragenen Chloriden.

Tunnel müssen brandsicher und ständig geöffnet sein; ihre Nutzungsdauer ist nicht von vornherein begrenzt. Daher sind langlebige, unterhaltsfreie und feuerbeständige Lösungen erforderlich (Ref. 6.6.1).



Auskleidung des Queensway-Tunnels, Liverpool, Großbritannien, Foto: Ancon

Bei der Instandsetzung des **Queensway-Tunnels**, der zwischen Liverpool und Birkenhead den Fluss Mersey unterquert, wurden neue Wandverkleidungen an einer Unterkonstruktion aus Blechen von austenitischem Stahl EN 1.4301 und Haken aus Duplex-Stahl EN 1.4462 befestigt. Der Duplex-Stahl ist zu der austenitischen Sorte komplementär und wurde wegen seiner hohen Zugfestigkeit ausgewählt (Ref. 6.6.2).

Bei der **Nord-Süd-Umfahrung** in Brisbane, Australien, ist das Lüftungssystem mit Befestigungen aus nichtrostendem Duplex-Stahl abgehängt. 100 Gebläse befördern im Brandfall entstehenden Rauch schnell aus der Tunnelröhre hinaus (Ref. 6.6.3).

### Eisenbahntunnel

Der unterirdische Bahnhof im norwegischen Holmestrand ist Bestandteil einer im Bau befindlichen Hochgeschwindigkeitsstrecke.



Deckenabhängungen in einem Straßentunnel  
Foto: Ancon



Dynamische Abhängungen im Eisenbahntunnel Holmestrand, Foto: Sandvik Materials Technology

Da von schnellen Zügen schon bei offenen Bahnhöfen hohe Belastungen durch Druck, Schall, Schwingungen und Luftströmungen ausgehen, waren hier neuartige Probleme zu lösen. Die Bahnhofsdecke wird von dynamischen Abhängungen getragen, die aus Hohlstäben aus nichtrostendem Duplex-Stahl gefertigt sind. Dynamisch bedeutet, dass sie neben den statischen Lasten auch Druckwellen und Vibrationen auffangen und dämpfen können. Ausgelegt sind sie auf eine Lebensdauer von 100 Jahren (Ref. 6.6.4 und 6.6.5).

## 6.7 Transportwesen (Ref. 6.7.1 bis 6.7.7)

### Chemikaliertanker (Ref. 6.7.1 bis 6.7.4)

Der Einsatz hochfester nichtrostender Duplex-Stähle ermöglicht eine Gewichtseinsparung von 10 % bei Tanks, senkt deren Herstellungskosten und steigert die Nutzlast. Zudem ist der Wärmeausdehnungskoeffizient von Duplex-Stahl ähnlich dem von Baustahl, was Schweißverbindungen mit dem Schiffsrumpf erleichtert.

Chemikaliertanker verfügen über große korrosionsbeständige Tanks oder Doppelhüllen. Die Aufgabe, große Mengen korrosiver Chemikalien in rauer See ohne Risiko für Ladung und Besatzung zu transportieren, bestimmt Konstruktion und Werkstoffauswahl bei den Tanks. Immer häufiger werden nichtrostende Duplex-Stähle eingesetzt. Allerdings sind sie nicht für alle Chemikalien geeignet (**Abschnitt 3**).



Chemikaliertanker Bow Sagami  
Foto: Manuel Hernandez Lafuente

### Rauchgasentschwefelung (Ref. 6.7.5)

Die Verbrennung von Schweröl setzt aggressives  $\text{SO}_2$  frei, einen Schadstoff, der seit längerem in den meisten Ländern strengen Beschränkungen unterliegt. Dementsprechend wurden schon vor Jahren Rauchgasentschwefelungsanlagen installiert, vor allem bei Kraftwerken. Für Schiffe bestanden demgegenüber keine entsprechenden Bestimmungen. Inzwischen hat die International Maritime Organization nachgezogen, so dass vergleichbare Regelungen seit 2020 auch für Schiffe gelten.

Die Reeder müssen nun ihre Schiffe mit Systemen zur Abgasentschwefelung ausrüsten. Dort ist der Platz begrenzt und auch die Stabilität des Schiffes ist zu beachten. Eine Alternative besteht in der Nutzung von Flüssiggas. Dieses wiederum könnte künftig durch (grünen) Wasser-

stoff abgelöst werden.

Werkstoffe für die Rauchgasentschwefelung müssen höchst aggressiven Verbrennungsgasen standhalten, die Asche,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  und oft auch heißes Meerwasser enthalten.

#### Tanklaster

In Tanklastern werden Duplex-Stähle aus denselben Gründen eingesetzt wie in Tankschiffen. Der Zugewinn an Nutzlast schlägt bei Straßenfahrzeugen allerdings noch deutlicher zu Buche als bei Schiffen.

#### Eisenbahnwaggons (Ref. 6.7.6)

In Kiruna (Schweden) werden Schüttgutwagen für den Erztransport nun auch unter Verwendung von nichtrostendem Duplex-Stahl EN 1.4162 (UNS S32101) gebaut. Die höheren Anfangskosten werden durch die folgenden Faktoren kompensiert:

- Die Oberfläche des nichtrostenden Stahls verbessert dauerhaft die Entladeeigenschaften des Wagenkastens – auch bei Gütern mit ungünstigen Schütteeigenschaften.
- Die Wanddicke und damit auch das Gewicht verringern sich in Vergleich zu Baustahl – eine kostengünstige Lösung für den Erztransport.
- Schweißbarkeit und Umformbarkeit sind gut, was konstruktive Vorteile mit sich bringt.
- Schweißverbindungen mit dem Baustahl, der für außenliegende Versteifungen, Stäbe sowie die Entladeöffnung im unteren Bereich, der „Schürze“ des Wagenkastens, verwendet wird, sind ohne weiteres möglich.



Erzwagon

Foto: Kiruna Wagon



Tanklaster mit Aufbau aus Duplex-Stahl

Foto: Technoimpianti A.P.M.



Straßenbahnwagen mit Rahmen aus nichtrostendem Duplex-Stahl, Foto: Stadler

#### Personennahverkehr (Ref. 6.7.7)

Der Schweizer Hersteller Stadler setzt für Straßenbahnwagen, z.B. die hier dargestellten Modelle für den brasilianischen Auftraggeber Transportes Urbanos de São Paulo, hochfesten Duplex-Stahl ein. Derartige Wagen ermöglichen hohe Laufleistungen bei geringem Unterhalt.

## 6.8 Chemische Verfahrenstechnik (Ref. 6.8.1 bis 6.8.3)

Duplex-Sorten finden ebenso wie andere nichtrostende Stähle Verwendung bei der Herstellung und Verarbeitung unterschiedlichster chemischer Erzeugnisse, z.B. von Düngemitteln, Kunststoffen und Pharmazeutika. Korrosionsbeständigkeit und hohe Festigkeit qualifizieren sie besonders für zentrale Anlagenteile wie z.B.

- Druckbehälter,
- Wärmetauscher,
- Verdichter,
- Lagertanks,
- Destillationskolonnen sowie
- das gesamte Spektrum an Zubehör: Rohre, Pumpen, Ventile, Kupplungen, Filter, Befestigungen, Rührer usw.

Die Liste in Ref. 3.3 führt auf, wie beständig die unterschiedlichen Duplexsorten gegen bestimmte Chemikalien sind.

Verunreinigungen z.B. mit Chloriden oder Fluoriden, abrasiv wirkende Feststoffe und höhere Temperaturen machen das jeweilige Medium aggressiver.



Wärmetauscher

Foto: Titan Metal Fabricators



Druckbehälter

## 6.9 Papier- und Zellstoffherstellung (Ref. 6.9.1 bis 6.9.4)



Batch-Kocher

Foto: Metso Paper Pori Oyj

Die Papier- und Zellstoffindustrie ist sehr wettbewerbsintensiv. Kostenminimierung steht obenan. Trotzdem – oder gerade deshalb – war diese Industrie die erste, die den Wert nichtrostender Duplex-Stähle erkannte. Zum Beispiel können die Sorten EN 1.4462 (UNS S32205), EN 1.4362 (UNS S32304) und EN 1.4162 (UNS S32102) in Kochern, Druckbehältern und Laugentanks ebenso wie in Papiermaschinen zum Einsatz kommen. Für korrosivere Bedingungen, etwa beim Bleichen, ist ein Super-Duplex-Stahl wie EN 1.4410 (UNS S32750) erforderlich.

Maßgeblich für diese Entwicklung sind die niedrigen lebensdauerbezogenen Kosten, die hohe (für Gewichtseinsparungen nutzbare) Festigkeit, die besondere Beständigkeit gegen Korrosion (insbesondere Spannungsrissskorrosion) sowie die große Oberflächenhärte. Letztere ist wichtig für den Widerstand gegen reibende Beanspruchung durch Holzschnitzel und Zellstoff (insbesondere im Kocher). Die optimale Werkstoffauswahl besteht heute in einer Kombination von austenitischen, superaustenitischen und Duplex-Sorten, die einander ergänzen.

## 6.10 Öl- und Gasindustrie (Ref. 6.10.1 bis 6.10.9)

Die Öl- und Gasindustrie stellt nach wie vor den weitaus größten Anwendungsbereich für nichtrostende Duplex-Stähle dar. Normenwerke wie Norsok und NACE (**Anhang 1**) liefern detaillierte Hinweise für die Werkstoffauswahl. Letztere reicht von Baustählen über nichtrostende (martensitische, austenitische, superaustenitische und Duplex-) Stähle bis hin zu Nickelbasislegierungen und richtet sich nach Druck, Temperatur, Chloridkonzentration und H<sub>2</sub>S-Gehalt (**Abb. 3.12**). Duplex-Stähle sind i.a. zwischen den martensitischen und superaustenitischen Stählen bzw. Nickelbasislegierungen angesiedelt. Ihre hohe Festigkeit kommt insbesondere bei hohen Drücken und großen Meerestiefen zum Tragen.

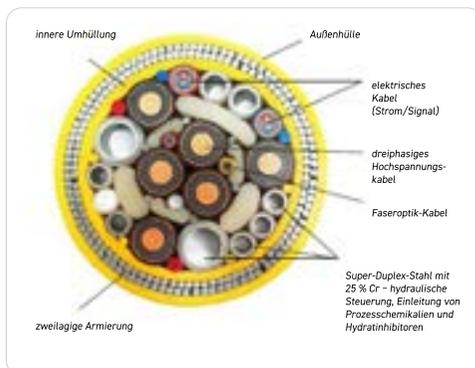


Anlage eines Öl- und Gasfeldes  
Foto: Technip FMC



Explosionsschutzwand  
Foto: Mech Tool Engineering

Da die Ölförderung in immer größeren Tiefen und damit unter höherem Druck und korrosiveren Bedingungen stattfindet, stiegen auch die Anforderungen an den Korrosionswiderstand (besonders im Hinblick auf chloridinduzierte Spannungsrisskorrosion) sowie die mechanischen Eigenschaften. Sie führten zur Entwicklung der Super- und Hyper-Duplex-Sorten. Berücksichtigt man das Versagensrisiko, das bei der Meeresförderung von zentraler Bedeutung ist, weisen sie die niedrigsten lebensdauerbezogenen Kosten auf.



Querschnitt durch eine Versorgungsleitung  
(Ref. 6.10.9)

Nichtrostende Duplex-Stähle eignen sich für eine große Bandbreite von Bauteilen in der Öl- und Gasindustrie, wie aus **Abb. 6.10.1** und **6.10.2** ersichtlich.

Neben weiteren Anlagenteilen, die in der Tabelle nicht aufgeführt sind (Pumpen, Ventile, Kupplungen, Filter) liegen weitere Anwendungsfelder in der Umhüllung von Versorgungsleitungen (zum Schutz vor Verschleiß und Beschädigung) und dem Bau von Schutzwänden, die auf Bohrinseln Feuer und Explosionen eingrenzen sollen.

Gebiet	Anwendung	Legierung
Oberwerk	Förderrohre Förderpumpen Injektionspumpen Prozessventile Separator-Druckgefäße Verteilerrohre	1.4462 / Super-Duplex-Stähle
	Meer-/Abwasserrohre Meerwasserpumpen Meerwasserventile Meerwasser-Filter	Super-Duplex-Stähle
Unterwasserteil	flexible Schlauchverbindungen	2003 / 1.4462
	Flowlines Sammelleitungen Sammler Ventile Nabenverbinder	1.4462 / Super-Duplex-Stähle
	Steigrohre	Super-Duplex-Stähle
Bohrloch	Ölfeldrohre Kabel Ventile	1.4462 / Super-Duplex-Stähle

**Abb. 6.10.1** Beispiele für die Anwendung nichtrostender Duplex-Stähle in der Öl- und Gasgewinnung

Einsätze in der Öl- und Gasindustrie bringen Werkstoffe an ihre Grenzen, was Korrosionsbeständigkeit, (hohe wie niedrige) Betriebstemperaturen und mechanische Eigenschaften anbelangt. Dass hierbei verbreitet Duplex-Stähle eingesetzt werden, zeugt von ihrer Leistungsfähigkeit.

Gebiet	Anwendung	Legierung
Raffinerie	Rohöl-Entsalzer	1.4462 / Super-Duplex-Stähle
	Mager-/Fettamin-Wärmetauscher für Trennkolonnen	1.4462
	Aminrückgewinnungs-Einheit, mit Lauge beaufschlagt	1.4462
	Filtertrommel, SRK-gefährdet	1.4462
	Süß- und Brackwasserkühler	1.4462
Steamcracker	Süßwasser-Kühlturm/Kühler	1.4162/2102/1.4462
	Dampferzeuger	1.4462
	Behälter/Leitungen für verbrauchte Ätzlösungen Kühler für saures Prozesskondensat	1.4462 / Super-Duplex-Stähle 1.4462 / Super-Duplex-Stähle
Aromate	Kühlrippen/Leitungen/Behälter des Zulaufs/Abtrennung	1.4462
	Aromate/Kohlenwasserstoffe/Verdampfer, Wärmetauscher	1.4462
Polymere	Polypropylen-Leitungen, Trommeln, Staubsammler, Trockner und rotierende Teile	1.4462
	Elastomer-Schlamm tanks, -Gefäße und -Leitungen sowie rotierende Teile	1.4462
	Schnecke eines LLPDE-Extruders	1.4462
	LDPE-Copolymer-Leitung	1.4462
	Gehäuse und Schnecken von Elastomer-Extrudern	1.4462
Zwischenprodukte und andere Flüssigkeiten	Einsatz unter korrosiven Bedingungen mit organischen Säuren, Schwefelsäure, Salpetersäure, Phosphorsäure, Lauge, Carbonylen usw. bei hoher Temperatur und hohem Druck	1.4462
	Zwischenlagertanks	1.4162/1.4162

**Abb. 6.10.2** Typische Anwendungen nichtrostender Duplex-Stähle in Raffinerie und chemischen Anlagen (Ref. 6.10.8)

## 6.11 Kernkraftwerke (Ref. 6.11.1 bis 6.11.6)

Die äußerst hohen Sicherheitsstandards in dieser Industrie führen dazu, dass neue Werkstoffe nur sehr langsam Eingang in die Lastenhefte finden. Dennoch kommen Duplex-Stähle in einigen neuen Anlagen, aber auch bei der Stilllegung, zur Anwendung.

Hohe Beständigkeit gegen Spannungsrissskorrosion gewährleistet langfristige Sicherheit (bis zu 150 Jahre), gleichzeitig vereinfacht hohe Festigkeit die Konstruktion. Auch die thermischen Eigenschaften sind besonders günstig, denn die Wärmeausdehnung ist vergleichsweise niedrig und die Wärmeleitfähigkeit höher als bei austenitischen Sorten. In neu errichteten Anlagen finden sich nichtrostende Duplex-Stähle in den Kühlrohren des Sekundärkreislaufs. Bei Kraftwerksstilllegungen gehören sie zu den bevorzugten Werkstoffen für die Fässer, in denen abklingender radioaktiver Abfall in geologische Lagerstätten verbracht wird.

Ein Beispiel ist das Lager für abgebrannte Brennelemente in Sellafield, eines der ältesten der Welt. Hier werden insgesamt 2.200 Behälter aus nichtrostendem Duplex-Stahl, jeder mit einem Gewicht von 1,3 t, nötig sein, um den radioaktiven Abfall für mindestens 500 Jahre zu sichern. Weitere Anwendungen liegen in den Fässern, in denen Nuklearbrennstoff transportiert und gelagert wird.



Behälter für atomare Abfälle, Foto: Sellafield

## 6.12 Erneuerbare Energien (Ref. 6.12.1 bis 6.12.9)

Da die Verlangsamung des Klimawandels inzwischen als eine der dringendsten Menschheitsaufgaben anerkannt ist, zeichnet sich bei der Erzeugung erneuerbarer Energien ein starkes Wachstum ab. Dabei wird vermehrt auf nichtrostenden Duplex-Stahl gesetzt, wo immer Festigkeit und hohe Korrosionsbeständigkeit erforderlich sind.

### Biogas

Biogaserzeugung aus der anaeroben bakteriellen Vergärung von Biomasse ist ein probater Prozess, um aus organischem Abfall Energie zu gewinnen. Landwirtschaftliche Betriebe, Restaurants, Klärwerke und andere Branchen, in denen geeignete organische Abfälle anfallen, können Biogas herstellen, das sich zur Erzeugung von Strom einsetzen lässt, der lokal verbraucht oder ins Netz eingespeist wird. Die entstehende Wärme wird an Ort und Stelle zum Trocknen und Heizen genutzt (Ref. 6.12.2). Auch wenn für die meisten Anlagenteile austenitische nichtrostende Stähle verwendet werden, stellt Duplex-Stahl bei großen Gärbehältern, bei denen neben der Korrosionsbeständigkeit auch die Festigkeit



Biogas-Tank aus nichtrostendem Stahl

Foto: Bürger GmbH

wichtig ist, die beste Lösung dar. Dabei ist die Vor-Ort-Montage von vergleichsweise leichten vorgefertigten Teilen besonders kostengünstig.

#### Biokraftstoffe (Ref. 6.12.3)

Das Bemühen, die Abhängigkeit von fossilen Kraftstoffen zu verringern, hat besonders in Brasilien und den USA zu einer wachsenden Bedeutung von Bioethanol und Biodiesel aus Energiepflanzen geführt.

Die austenitischen Sorten EN 1.4307/1.4301 (ASTM 304L/304) und EN 1.4404/1.4401 (ASTM 316L/316) halten in der Regel den Korrosionsbeanspruchungen stand, die in der Biokraftstoffherzeugung auftreten. Allerdings erfordert bei der Herstellung von Ethanol aus Zellulose die Vorbehandlungsstufe besondere Korrosionsbeständigkeit. Hier kommen neben der superaustenitischen Sorte EN 1.4539 (ASTM 904L), superaustenitischem Stahl mit 6 % Molybdän oder der Nickellegierung C-276 auch die Duplexsorte EN 1.4462 (UNS S32205) sowie der Super-Duplex-Stahl EN 1.4410 (UNS S32750) zur Anwendung. Duplex- und Super-Duplex-Sorten werden auch verwendet, wenn besondere Beständigkeit gegen Erosionskorrosion erforderlich ist, z.B. bei Pumpen.

Ähnliche Verhältnisse herrschen in Anlagen zur Biodiesel-Produktion. Die Duplex-Stähle EN 1.4462 (UNS S32205) und EN 1.4410 (UNS S32750) kommen in der Vorbehandlung ins Spiel, bei der schwache Salz- oder Schwefelsäure vorliegt, ebenso bei der Wäsche und der Abtrennung von Glycerin. Die Zentrifugen bestehen oft aus den Stählen EN 1.4438/1.4445 (ASTM 317L/317) oder EN 1.4462 (UNS S32205). Sowohl bei der Bioethanol- als auch der Biodiesel-Herstellung lässt sich für Großtanks auch der Lean-Duplex-Stahl EN 1.4162 (UNS S32101) verwenden (Ref. 6.12.4).



Traggerüst für Solarpaneele aus nichtrostendem Duplex-Stahl SUS821L1

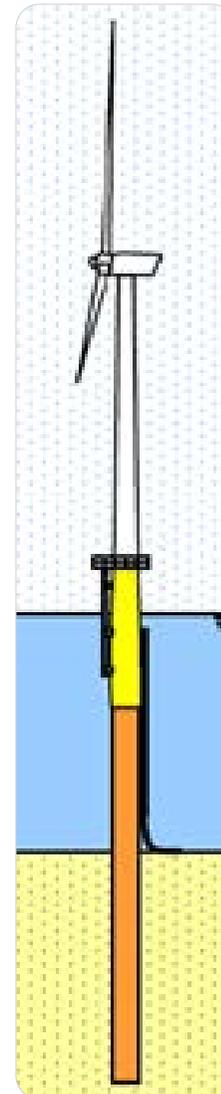
Foto: NIPPON STEEL Stainless Steel Corporation

#### Traggestelle für Solarpaneele (Ref. 6.12.5)

Unter aggressiven Bedingungen sind Tragkonstruktionen aus nichtrostendem Duplex-Stahl beständiger als solche aus beschichtetem Baustahl. Sie bringen die Voraussetzungen für lebenslange Wartungsfreiheit mit. Zudem ermöglichen sie gewichtssparende Konstruktionen, die kostengünstiger herzustellen und einfacher zu installieren sind.

#### Erdwärmenutzung (Ref. 6.12.6 und 6.12.7)

Bei Bohrlochköpfen, die von heißer Sole durchströmt werden, können Duplex- und Superduplex-Stähle eine Alternative zur Nickellegierung 625 darstellen.



#### Windkraftanlagen an Land und auf See (Ref. 6.12.8 bis 6.12.9)

Schraubverbindungen aus nichtrostendem Stahl dienen der Befestigung von Turbinenteilen. Neben ihrer Korrosionsbeständigkeit in Meeresatmosphäre bieten sie sich auch wegen ihrer mechanischen Eigenschaften an. Sie ermöglichen Gewichtseinsparungen sowie höhere Effizienz und geben Sicherheit gegen vorzeitiges Versagen. Die Duplex-Sorte EN 1.4462 (UNS S32205) wird bei Befestigungen verwendet, die das Monopile-Standrohr mit dem Übergangsstück verbinden. Der Grund liegt in der hohen Festigkeit (Dehngrenze > 355MPa) und besonderen Korrosionsbeständigkeit unter Beanspruchungsbedingungen, die neben der Meerwasserumgebung auch starke Strömungen und Winde einschließen. Aufgrund dieser Eigenschaften wurden sie bereits bei Rohrkonstruktionen für Türme bis zu 160 m Höhe ins Gespräch gebracht.

Windkraftanlage mit Monopile-Gründung (orange) und Zwischenstück (gelb)

## 6.13 Wasserwirtschaft

Im Kontakt mit Wasser ist Korrosionsbeständigkeit grundsätzlich eine Hauptanforderung, ganz gleich, ob es sich um Trink-, Ab- oder Meerwasser handelt. Duplex-Stähle setzen sich hier wegen ihrer Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit immer mehr durch.

### Schiffbau (Ref. 6.13.1 bis 6.13.4)

- Schiffsrümpfe von hochwertigen Yachten müssen ohne Unterhalt langlebig sein.
- Davits (an Bord befindliche Kräne) sind in der Regel aus Blech gefertigt, das durch Abkanten in rechteckige Formen gebracht und verschweißt wird. Die beim Umformen auftretende Kaltverfestigung bewirkt eine willkommene Festigkeitssteigerung, ohne die Kosten zu erhöhen. Wie bei anderen nichtrostenden Stählen auch, stehen unterschiedliche Oberflächenausführungen zur Auswahl.
- Auch bei Schrauben und Antriebswellen gehört nichtrostender Stahl inzwischen zu den Werkstoffoptionen. Die Hersteller schätzen dessen hohe Beständigkeit gegen Ermüdungskorrosion sowie Abrasion und Erosion bei hohen Fließgeschwindigkeiten.



Davit (Schiffskran)

Foto: Stainless Structurals

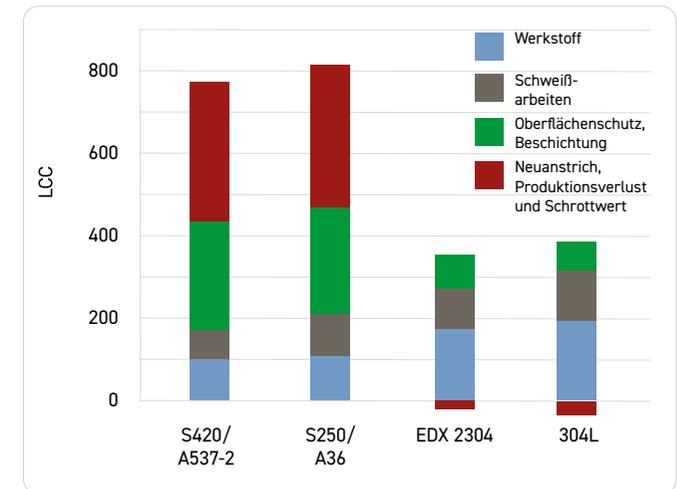
### Großtanks (Ref. 6.13.5 bis 6.13.9)

Neben Wasser können große Tanks verschiedenste Flüssigkeiten und korrosive Chemikalien in unterschiedlichen Verarbeitungsstufen oder auch Fertigprodukte im Auslieferungszustand enthalten.

**Abb. 6.1 und 6.2** zeigen einen Vergleich der lebensdauerbezogenen Kosten (*Life Cycle Cost, LCC*) eines typischen Tanks von 20 m Durchmesser und 20 m Höhe in verschiedenen Werkstoffen auf eine Dauer von 30 Jahren. Die Duplexsorte EN 1.4362 (UNS S32304) schneidet hierbei am besten ab, denn

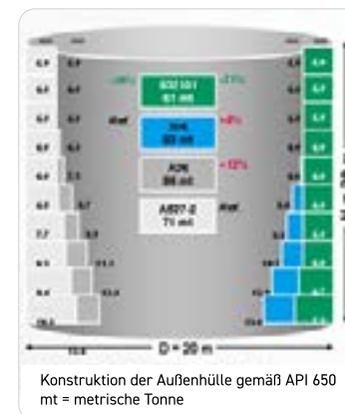
- Baustahl erfordert eine teure Beschichtung sowie nach einigen Jahren einen noch kostenintensiveren Neuanstrich.

- Hochfester nichtrostender Duplex-Stahl ermöglicht es, die Wanddicken und damit auch die Kosten im Vergleich zu austenitischen Sorten zu senken. Der Materialeinsatz ist geringer, zudem sind leichtere Teile auch einfacher zu transportieren und montieren, insbesondere zu schweißen.



**Abb. 6.1** Lebensdauer-Kostendarstellung für einen Duplex-Tank (Ref. 6.13.6)

Bei anderen Tankgrößen und Duplex-Sorten zeigten sich vergleichbare Ergebnisse (Ref. 6.13.8). Bei kleinen und mittelgroßen Tanks sind ferritische und/oder austenitische Sorten weiterhin die gängigsten Lösungen, denn die Wanddickenreduktion ist bei ihnen deutlich geringer.



Konstruktion der Außenhülle gemäß API 650  
mt = metrische Tonne

**Abb. 6.2** Wanddickenreduktion durch nichtrostenden Duplex-Stahl (Ref. 6.13.7)

Nichtrostender Duplex-Stahl bietet die folgenden strukturellen Vorteile:

- Korrosionszuschläge sind nicht erforderlich.
- Im unteren Bereich des Tanks ergibt sich die Mindestwanddicke allein aus den statischen Festigkeitsanforderungen.
- Insgesamt führt die Nutzung der hohen Festigkeit von nichtrostendem Duplex-Stahl zu einer deutlichen Gewichtseinsparung.

**Abwassertanks** (Ref. 6.13.9 bis 6.13.12)

Aktuell erfährt nichtrostender Duplex-Stahl beim Bau von Abwassertanks große Aufmerksamkeit, sowohl als Ersatz für bestehende Tanks (oft aus Stahlbeton) als auch bei neuen.



Kläranlage

Foto: Institut de la Corrosion

**Trinkwasserbehälter** (Ref. 6.13.13)

Trinkwasserspeicher sind zumeist groß und bestehen aus beschichtetem Beton. Alterungsbedingt müssen im Laufe der Zeit Risse durch wasserdichte Beschichtungen überdeckt werden – mit meist nur kurzzeitigem Erfolg. Mikrobielle Besiedlung ist ein ständiges Problem. Benötigt werden daher Werkstoffe, die sie nicht begünstigen und gleichzeitig für den Menschen gesundheitlich unbedenklich sind. Diese Überlegungen haben in Korea dazu geführt, dass bestehende Trinkwasserspeicher mit nichtrostendem Duplex-Stahl der Sorten 329LD (20 % Cr, 2,5 % Ni, 1,4 % Mo, N) und 329J3L (22 % Cr, 5 % Ni, 3 % Mo, 0,15 % N) ausgekleidet werden. Die Auskleidung wird vor Ort verschweißt (künftig auch automatisch) und mit derselben Technik im Beton verankert, die auch bei austenitischem nichtrostendem Stahl eingesetzt wird. Duplex-Stahl dürfte sich hier zunehmend durchsetzen.



Trinkwasserbehälter, links: vor der Instandsetzung,

rechts: Derselbe Behälter mit einer Auskleidung aus nichtrostendem Duplex-Stahl

Fotos: Moonchang

**Meerwasserentsalzung** (Ref. 6.13.13 bis 6.13.17)

Wasserknappheit ist in vielen Ländern ein Problem. Meerwasserentsalzung kann wirksam Abhilfe schaffen. Zwei Verfahren kommen zur Anwendung:

- Bei der mehrstufigen Entspannungsverdampfung (*Multi-stage Flash Distillation*, MSF) bzw. Multi-Effekt-Destillation (MED) wird Meerwasser verdunstet und anschließend als Trinkwasser kondensiert. Zurück bleibt eine konzentrierte Salzlösung, Sole.
- Bei der Umkehrosmose von Meer- oder Brackwasser wird das Wasser unter ca. 60 bar Druck durch eine Membran gepresst, welche die Salzionen zurückhält. Bei diesem Verfahren weist auch das entsalzte Wasser noch eine gewisse Korrosivität auf.

Bei beiden Verfahren müssen Feststoffe aus dem zugeführten Meerwasser ausgefiltert werden. Ebenso muss die Sole so ins Meer zurückgeleitet werden, dass das Ökosystem keinen Schaden nimmt.



Umkehrosmose-Meerwasserentsalzungsanlage in Israel

Alle Verfahren erfordern äußerst korrosionsbeständige Werkstoffe. Zur Anwendung kommen superaustenitische Stähle, z.B. EN 1.4539 (ASTM 904L) oder Sorten mit 6 % Mo, der Duplex-Stahl EN 1.4462 (UNS S32205) oder Super-Duplex-Sorten, zumeist EN 1.4410 (UNS S32750), sowie Titan. Hohe Zug- und Dauerfestigkeit sind weitere Kriterien der Werkstoffauswahl.

Anlagen, die nichtrostenden Duplex-Stahl enthalten, finden sich u.a. im libyschen Mellitah (2004), im algerischen Skikda (2005) und in Sing Spring (2005) in Singapur.

**Warmwasserspeicher** (Ref. 6.13.18)

Warmwasserspeicher in Wohngebäuden und öffentlichen Einrichtungen bestehen immer häufiger aus Standard- oder Lean-Duplex-Stählen. Die Gründe liegen in niedrigerem Gewicht und hoher Beständigkeit gegen Loch-, Spalt- und Spannungsrisskorrosion, die Duplex-Stähle gegenüber beschichtetem Stahl wettbewerbsfähig machen.

## 6.14 Marktübergreifende Anwendungen (Ref. 6.14.1 bis 6.14.3)

Neben marktspezifischen Anwendungen findet sich nichtrostender Duplex-Stahl überall in der Industrie in weniger sichtbaren, aber dennoch zentralen Bauteilen, z.B. Pumpen, Ventilen, Zugstäben, Drehteilen, Kupplungen, Befestigungsmitteln, Verankerungssystemen, Filtern, Federn, Stahlbau-Profilen usw.

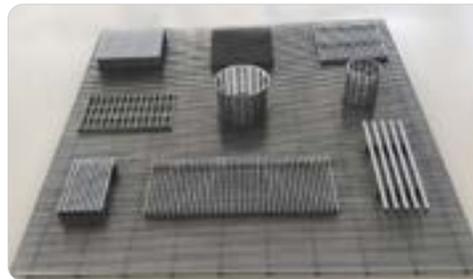
Nichtrostende Duplex-Stähle gehören hier in der Regel zu den Werkstoffkandidaten. Zur bevorzugten Option werden sie, wenn Festigkeit und hohe Korrosionsbeständigkeit erforderlich sind – zuweilen zusätzlich Beständigkeit gegen Erosions- und Ermüdungskorrosion.

Bei einigen Bauteilen ist die zusätzliche Kaltverfestigung beim Umformen von Vorteil, dazu gehören Befestigungsmittel (mit Fließgrenzen von nahezu 1000 MPa), durch Abkanten von Blech erzeugte Stahlbauprofile, kalt gezogene Profile, Teile aus kaltgezogenem Stabstahl, Betonstahl usw. Deren höhere Festigkeit reduziert Wanddicken, Gewicht und Kosten ohne Einbußen an Korrosionsbeständigkeit.

Aus dem komplexen Zusammenspiel der Werkstoffeigenschaften können optimale Lösungen erwachsen. Um günstige Wärmeleiteigenschaften zu erzielen, die nahe bei denen der ferritischen nichtrostenden Stähle liegen, lässt sich sehr dünnes kaltverfestigtes Duplex-Stahlblech einsetzen.



Balkonanker  
Foto: Slabe



Proflierter Draht für die Filtration  
Foto: Ugitech



Mauerwerksanker  
Foto: Halfen



Fittings



Ventil



Tauchpumpe

## 7 Verarbeitung

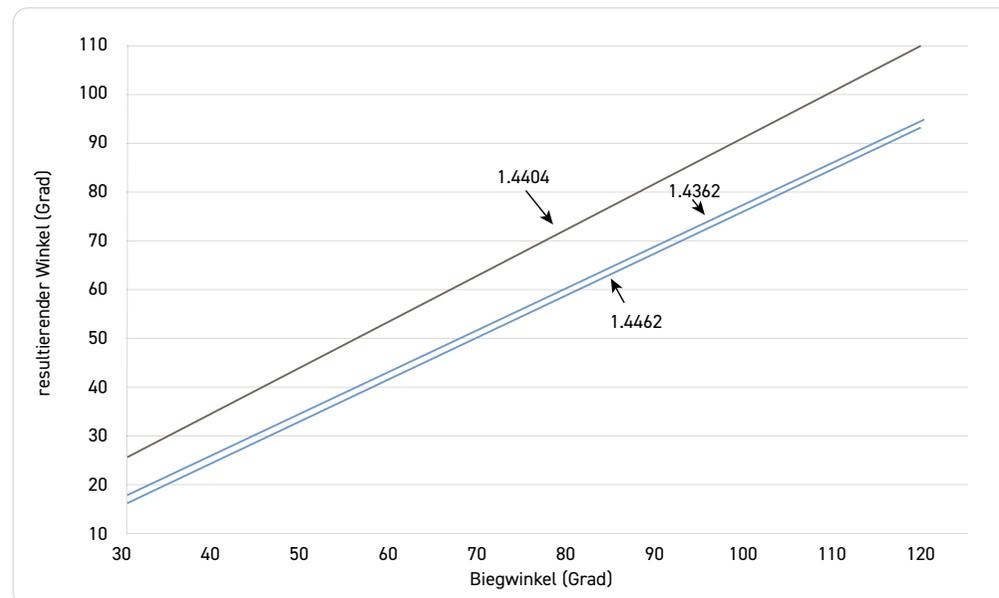
### 7.1 Umformungen (Ref. 7.1.1. bis 7.1.8)

#### Kaltumformung

Nichtrostende Duplex-Stähle lassen sich ohne besondere Probleme umformen, sofern die folgenden Punkte beachtet werden:

- Die höhere Werkstofffestigkeit erfordert leistungsstärkere Maschinen.
- Die Rückfederung ist größer.
- Die Duktilität ist geringer als bei austenitischen und ferritischen Sorten, insbesondere beim Tiefziehen.

Inzwischen sind auch Sorten verfügbar, deren Legierungszusammensetzung im Hinblick auf verbesserte Umformeignung optimiert ist.



**Abb. 7.1.1** Vergleich der Rückfederung von nichtrostendem Duplex-Stahl mit der Sorte EN 1.4404 (ASTM 316L) von 2 mm (0,08 Zoll) Dicke

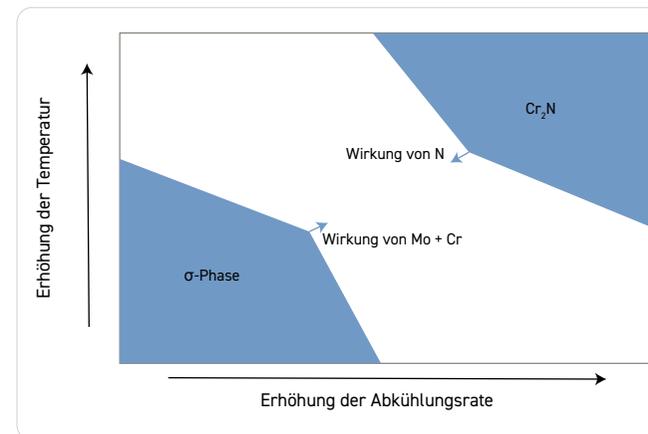
#### Warmumformung/Schmieden

Für die optimale Warmumformung sind bestimmte Temperaturkorridore genau einzuhalten (**Tab. 7.1**), denn sie beeinflussen

- das Gleichgewicht von austenitischer und ferritischer Phase,
- die Ausscheidung von Nitriden sowie
- die Ausscheidung intermetallischer Phasen bei Temperaturen unter ca. 1050 °C.

UNS Nr.	EN Nr.	Temperaturspanne für die Warmumformung (°C)	Mindest-Halte-temperatur (°C)
S32101	1.4162	1100-900	950
S32304	1.4362	1150-950	980
S32205	1.4462	1230-950	1040
S32750	1.4410	1230-1025	1050
S32520	1.4507	1230-1000	1080
S32760	1.4501	1230-1000	1100
S30400	1.4301	1205-925	1040
S31600	1.4401	1205-925	1040

**Tabelle 7.1** Für die Warmumformung empfohlene Temperaturspanne (Ref. 7.1.2)



**Abb. 7.1.2** Schematische Darstellung des Fertigungsbereichs für nichtrostende Duplex-Stähle, der durch Temperatur und Abkühlungsrate bestimmt wird (Ref. 7.1.6)

Diese Bedingungen bestimmen den in **Abb. 7.1.2** gezeigten Verarbeitungsbereich. Bestimmte Legierungselemente, vor allem Chrom und Molybdän, beschleunigen bei niedrigen Abkühlungsgeschwindigkeiten und niedrigen Temperaturen die Ausscheidung intermetallischer Phasen, z.B. der Sigma-Phase. Stickstoff führt bei sehr hohen Temperaturen und schneller Abkühlung zur Bildung von Chromnitriden innerhalb des

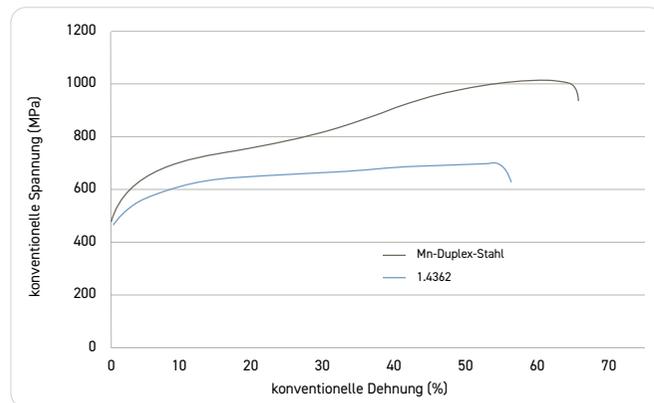


Ferrits. Im Ergebnis haben Lean-Duplex-Stähle den größten und Super- bzw. Hyper-Duplex-Stähle den schmalsten Verarbeitungsbereich. In der Praxis ist darauf zu achten, dass die Temperatur in der Schlussphase der Warmumformung (also des Walzens oder Schmiedens) oberhalb der Untergrenze liegt und dass anschließend eine schnelle Abkühlung erfolgt.

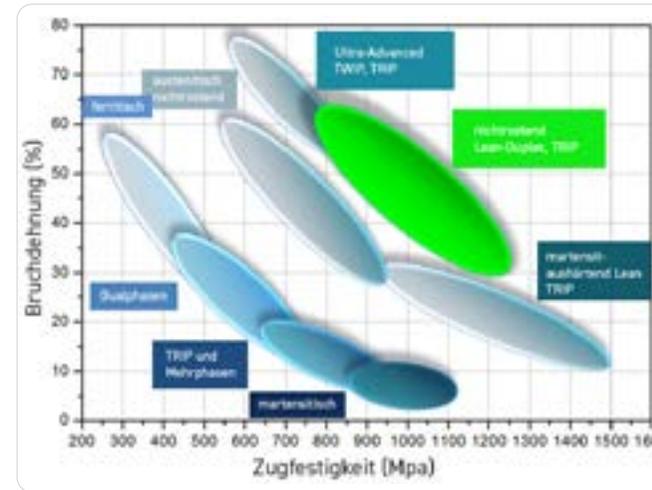
### Besondere Verfahren

Der **TRIP-Effekt** (*Transformation Induced Plasticity*) bedeutet, dass sich aus der austenitischen Phase während der Umformung Martensit bildet. Dieser erhöht die Kaltverfestigungsrate und verhindert zugleich vorzeitiges Reißen. Um diesen Effekt zu erzielen, muss die Legierungszusammensetzung genau austariert werden. Der TRIP-Effekt erhöht bei einem solchen Werkstoff die Kaltverfestigung in einem weiten Umformbereich und verbessert gleichzeitig dessen Duktilität. Nichtrostende Duplex-Stähle, die den TRIP-Effekt zeigen, zeichnen sich durch ein besonders vorteilhaftes Verhältnis von Festigkeit und Umformbarkeit aus, wobei die Zugfestigkeit über 1000 MPa und die Bruchdehnung über 60 % betragen kann. Derartige Stähle eignen sich für Anwendungen, die sowohl gute Umformbarkeit als auch hohes Energieaufnahmevermögen

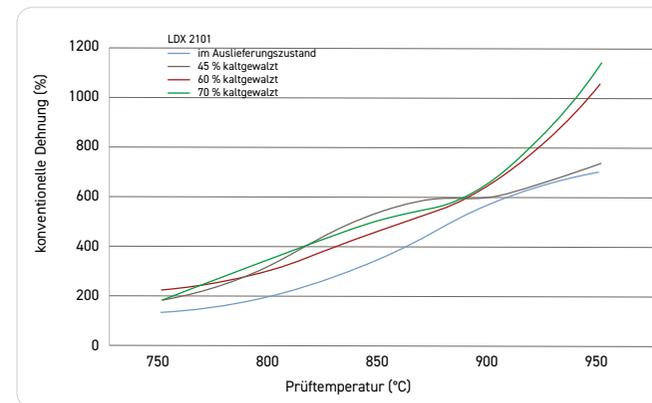
erfordern (**Abb. 7.1.3**), etwa stark umgeformte Teile in der Automobilindustrie, Wärmetauscher, Pumpenteile, Geflechte und Federn. **Abb. 7.1.4** zeigt das günstige Verhalten von TRIP-Duplex-Stählen im Vergleich zu Standardstählen.



**Abb. 7.1.3** Spannungs-Dehnungs-Kurven eines Standard-Duplex-Stahls (EN 1.4362) und einer TRIP-modifizierten Sorte



**Abb. 7.1.4** Übersicht über den Zusammenhang von Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei verschiedenen nichtrostenden Stählen (Ref. 7.1.7)



**Abb. 7.1.5** Superplastische Dehnung eines Lean-Duplex-Stahls (Ref. 7.1.8)

**Superplastizität** ist eine Eigenschaft, die sich bei vielen Werkstoffen, z.B. Glas, feststellen lässt, so auch bei nichtrostendem Duplex-Stahl. Sie stellt sich bei einer bestimmten Temperatur und Formänderungsgeschwindigkeit ein. **Abb. 7.1.5** zeigt, dass sich bei einem zuvor kaltverfestigten Lean-Duplex-Stahl Längenzunahmen von über 1000 % darstellen lassen. Die besonderen Bedingungen, an die superplastisches Verhalten gebunden ist, insbesondere die niedrige Formänderungsgeschwindigkeit, haben bislang verhindert, dass dieser Umformprozess bereits zu praktischer Bedeutung gelangt ist.



## 7.2 Spanabhebende Bearbeitung (Ref. 7.2.1 bis 7.2.4)

Stabstahl wird zur Herstellung von Endprodukten üblicherweise spanabhebend bearbeitet. Grobblech wird häufig durch Bohren und Fräsen in die gewünschte Form gebracht. Die Eignung zur spanabhebenden Bearbeitung ist daher eine bedeutende Werkstoffeigenschaft, die erheblichen Einfluss auf die Verarbeitungskosten haben kann.

Sorten mit verbesserter Spanbarkeit sind bei Edellaustählen sowie martensitischen und austenitischen nichtrostenden Stählen gängig; bei Duplex-Stählen werden sie erst seit jüngstem thematisiert.

Die beiden wichtigsten Parameter der Spanbarkeit sind Werkzeugverschleiß und Spanbruchverhalten. Die hohe Festigkeit der nichtrostenden Duplex-Stähle erfordert höhere Schneidkräfte und führt zu verstärktem Werkzeugverschleiß.

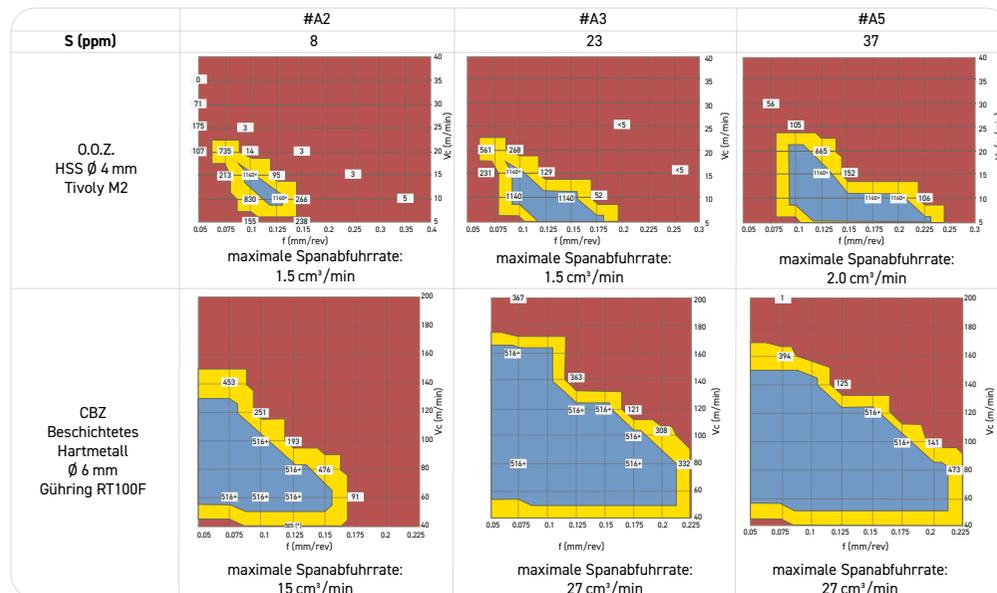


Abb. 7.2.1 Einfluss des Schwefelgehalts auf den optimalen Spanbruch bei Schneidwerkzeugen aus Schnellarbeitsstahl und beschichtetem Hartmetall

Die Spanbarkeit lässt sich auf verschiedene Weisen verbessern:

1. Modifikation der chemischen Zusammensetzung mit dem Ziel, Festigkeit und Kaltverfestigung zu vermindern, ohne die Korrosionsbeständigkeit zu verschlechtern. Das ist durch Erhöhung des Nickel- und Kupfergehalts sowie Verringerung des Stickstoffgehalts möglich, wobei das Ferrit-/Austenit-Gleichgewicht erhalten bleibt oder der Ferritanteil leicht steigt.
2. Optimierung des Schwefelgehalts. EN 10088-1 legt bei den meisten Sorten den maximalen Schwefelgehalt auf 150 ppm fest. **Abb. 7.2.1** (Ref. 7.2.2) lässt große Unterschiede in den Spanbrucheigenschaften erkennen (blauer Bereich im Vorschub-Schnitttiefe-Diagramm bei Schwefelgehalten von 8 ppm bis 37 ppm). Hinsichtlich des Werkzeugverschleißes bestehen demgegenüber keine wesentlichen Unterschiede. Selbst bei geringen Schwefelgehalten deutlich unter 150 ppm ist ein ausgeprägtes Absinken des Lochfraßpotentials zu beobachten. Je höher der Schwefelgehalt, desto geringer die Lochkorrosionsbeständigkeit. Darüber hinaus beeinträchtigen höhere Schwefelgehalte die Kerbschlageigenschaften, insbesondere

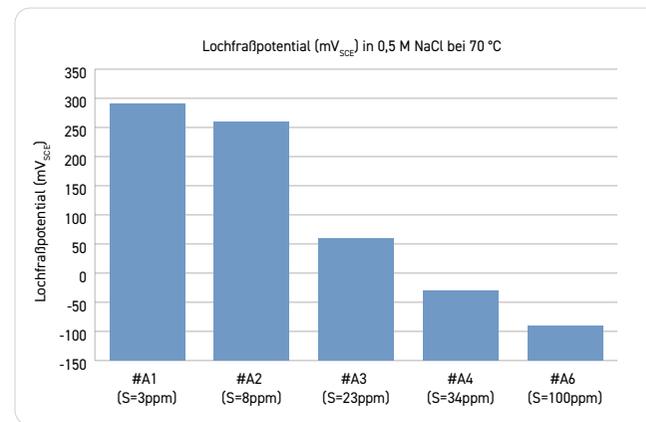


Abb. 7.2.2 Einfluss des Schwefelgehalts auf die Lochkorrosionsbeständigkeit

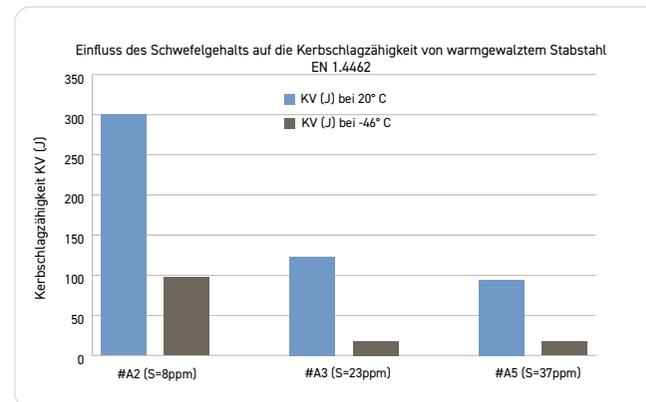


Abb. 7.2.3 Einfluss des Schwefelgehalts auf die Kerbschlagzähigkeit

lochfraßpotential (mV<sub>SCE</sub>) in 0,5 M NaCl bei 70 °C

Lochfraßpotential (mV<sub>SCE</sub>)

Lochkorrosionsbeständigkeit

Einfluss des Schwefelgehalts auf die Kerbschlagzähigkeit von warmgewaltem Stabstahl EN 1.4462

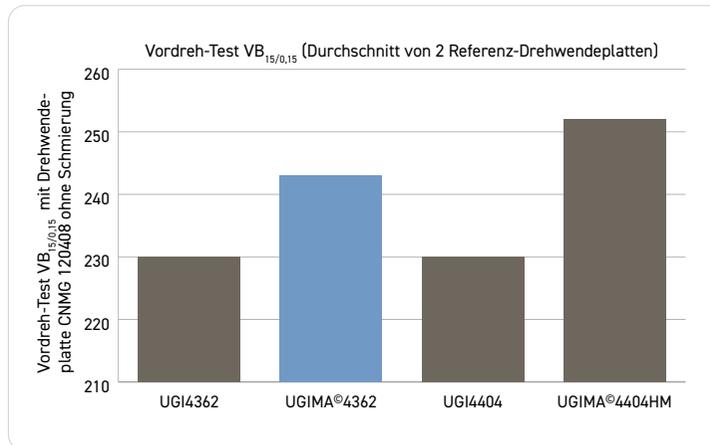
Kerbschlagzähigkeit KV (J)

KV (J) bei 20° C  
KV (J) bei -46° C

bei Minustemperaturen, siehe **Abb. 7.2.3**. Diesen Ergebnissen zufolge ist ein sehr geringer Schwefelgehalt die Voraussetzung für gute Korrosionsbeständigkeit und gute Kerbschlag-eigenschaften. Folglich ist die Verbesserung der Spanbarkeit durch Schwefelzusätze nicht vorteilhaft.

3. Eine gängige Lösung besteht in Oxideinschlüssen mit niedrigem Schmelzpunkt, die eine Kühlung der Grenzfläche zwischen dem Hartmetallwerkzeug und dem Stahl bewirken. Sorten, deren Spanbarkeit nach diesem Prinzip verbessert werden, gibt es bei Edelbau-stählen sowie martensitischen und austenitischen nichtrostenden Stählen. Allerdings kann das „Rezept“ nicht einfach auf Duplex-Stähle übertragen werden. Gleichwohl wurden bereits Duplexsorten mit kontrollierten Oxideinschlüssen entwickelt. **Abb. 7.2.4** zeigt die deutliche Verbesserung der Spanbarkeit beim Drehen mit Hartmetallwerkzeugen, die im Falle des Stahls 1.4362 (UNS S32304) durch Oxideinschlüsse erzielt wird. Auch der Spanbruch verbessert sich. Den veröffentlichten Daten zufolge verschlechtert sich die Lochkorrosionsbeständigkeit der Lean-Duplex-Sorten durch solche Oxideinschlüsse nicht nennenswert.

Ihr wesentlicher Nachteil liegt nach heutigen Erkenntnissen in einer deutlichen Herabsetzung der Kerbschlag-zähigkeit unterhalb von 0 °C. Sie begrenzt den Einsatzbereich von Duplex-Stählen, bei denen die Spanbarkeit durch Oxide verbessert wurde.

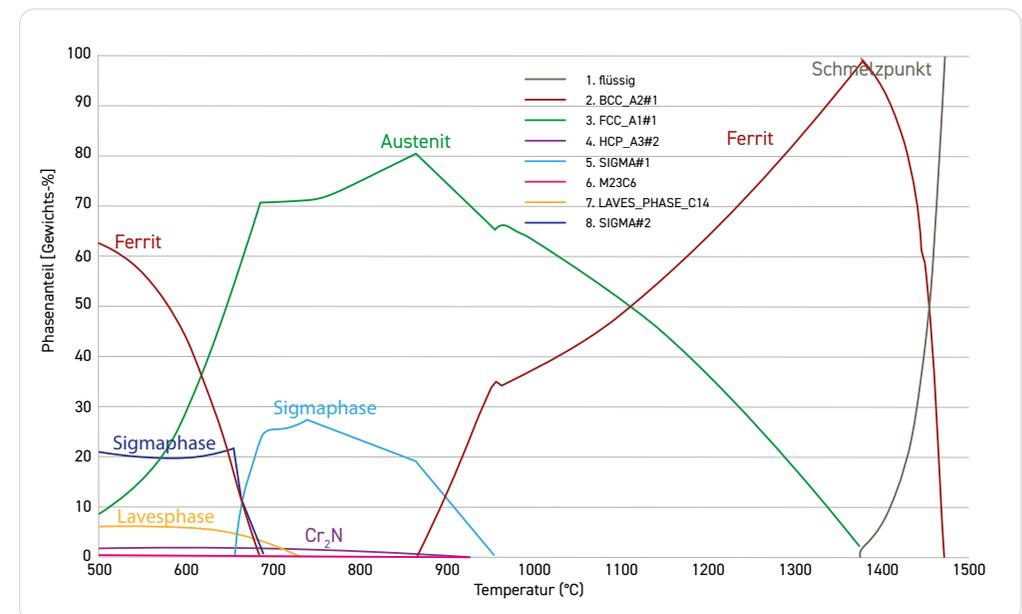


**Abb. 7.2.4** Durch gezielte Oxideinschlüsse verbesserte Spanbarkeit (Ref. 7.2.4)

## 7.3 Schweißen (Ref. 7.3.1 bis 7.3.6)

Nichtrostende Duplex-Stähle lassen sich mit den meisten Verfahren gut schweißen. Das am weitesten verbreitete ist das Lichtbogenschweißen. Anders als austenitische Sorten sind Duplex-Stähle nicht heißrisanfällig und ihr Wärmeausdehnungskoeffizient ähnelt dem von Baustahl. Die nachstehenden Schweißempfehlungen ergeben sich aus den folgenden metallur-gischen Eigenschaften der Duplexsorten (**Abb. 7.3.1**):

- Duplex-Stähle erstarren vollständig in der ferritischen Phase. Erst bei der weiteren Abkühlung bildet sich Austenit. Ist die Abkühlungsrate sehr hoch, kann der Anteil der ferritischen Phase höher sein, als es dem Phasengleichgewicht entspräche. Darüber hinaus sinkt die Löslichkeit von Stickstoff in der ferritischen Phase mit abnehmender Temperatur stark, was zu unerwünschten Chromnitridausscheidungen in der ferritischen Phase führt, sofern der Stickstoff nicht in den Austeniten übergehen kann. Eine verstärkte Umwandlung von Ferrit zu Austenit kann durch die Wahl eines geeigneten Schutzgases und Schweißzusatzwerkstoffes erreicht werden.



**Abb. 7.3.1** Gleichgewichtsphasen eines nichtrostenden 22 % Cr-Duplex-Stahls als Funktion der Temperatur ermittelt mit Thermocalc (Version 2017a/TCFE9)



- Die Abkühlung unterhalb von ca. 1000 °C muss vergleichsweise schnell erfolgen, wenn die Ausscheidung von intermetallischen Phasen, d.h. von Nitriden und Karbiden, vermieden werden soll. Beide sind der Kerbschlagzähigkeit und der Korrosionsbeständigkeit abträglich. Spinodaler Zerfall findet bei niedrigen Temperaturen zu langsam statt, um beim Schweißen ein Problem darzustellen.

Die optimalen Schweißbedingungen hängen also von der Dicke der zu verschweißenden Bleche und ihrer chemischen Zusammensetzung ab. Die Schweißparameter müssen entsprechend gewählt werden, wobei die folgenden Regeln gelten:

- Wärmeeintrag: Der optimale Wert stellt einen Kompromiss zwischen der Notwendigkeit relativ langsamer Abkühlung unterhalb des Schmelzpunktes und schneller unterhalb von ca. 1000 °C dar.
- Zusammensetzung des Schweißzusatzwerkstoffes: Üblicherweise weist er einen höheren Nickelgehalt als der Grundwerkstoff auf, was die Bildung von Austenit begünstigt. Dagegen kann der Gehalt an Stickstoff niedriger sein als im Grundwerkstoff, damit die Gefahr der Bildung von Chromnitridausscheidungen verringert wird.
- Schutzgas: Es kann ebenfalls einen gewissen Stickstoffanteil enthalten, um die Austenitbildung zu begünstigen. Auf jeden Fall sind Feuchtigkeit und Wasserstoff zu vermeiden.

Schweißverfahren	Elektrode/Schweißzusatzwerkstoff AWS-Klassifikation	Durchmesser (Zoll)	Schweißposition	Schweißraupe	empf. Stromstärke (A)	Spannung (V)	Schweißgeschwindigkeit (Zoll/min)
SMAW	E-2209	3/32 & 1/8	3G-Up	Wurzel-Decklage	50-60 80-95	20-24	4-6/7-9
GTAW	ER-2209	3/32	1G	Wurzel	100-120	16-18	5-8
GTAW & FCAW	ER-2209 + E2209T1-4	3/32 & 1/16	1G	Wurzel-Decklage	100-120 190-210	16-18 28-30	5-8 17-22
SAW	ER-2209+ P100 Flux	3/32	1G	Decklage	350-400	30-32	30-40

Abb. 7.3.2 Empfohlene Schweißparameter für unterschiedliche Arten von Schweißnähten (Ref. 7.3.1)

- Vorwärmung sollte nicht erfolgen. Allenfalls kann die Temperatur bei ca. 100 °C liegen.
- Die maximale Zwischenlagentemperatur beträgt bei Lean- und Standard-Duplex-Stählen in der Regel 150 °C und bei Super-Duplex-Sorten 100 °C.
- Spannungsabbauende Wärmebehandlung bei niedrigen Temperaturen (600–650 °C) ist zu unterlassen.
- Die Wärmebehandlung nach dem Schweißen sollte in einem Lösungsglühen mit anschließender schneller Abkühlung bestehen.

Verfahren ohne Schweißzusatzwerkstoff wie z.B. Punktschweißen sind zu vermeiden. Anmerkung: Geschweißte Mischverbindungen, meist mit austenitischen oder Baustählen, sind gängige Praxis. Der geeignetste Zusatzwerkstoff hängt von der jeweiligen Kombination von Legierungen ab.

Schweißverfahren	Schutzgas	Anmerkungen
GMAW	Ar+30 % He+1 % O <sub>2</sub>	Schweißen mit kurzem Bogen ergibt stark konvexe Schweißraupen
	Ar+30 % He+1 % O <sub>2</sub> (22Cr Duplex) Ar+2 % CO <sub>2</sub> (Super-Duplex)	Sprühlichtbogenschweißen
	Ar+30 % He+1 % O <sub>2</sub> (22Cr Duplex) Ar (99.996 %) für Super-Duplex	Schweißen mit gepulstem Lichtbogen
GTAW	<ul style="list-style-type: none"> <li>Schutzgas - Ar+2 % N<sub>2</sub></li> <li>Spülung/Wurzelschutzgas - Ar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Spülen, um max. 0,5 % Sauerstoff nicht zu überschreiten</li> <li>Für den Wurzeldurchgang wird ein Schutzgas aus Ar + 2 % N<sub>2</sub> empfohlen.</li> <li>Für die folgenden Durchgänge kann Argon (Ar) als Schutzgas benutzt werden.</li> <li>Die ersten beiden Durchgänge müssen als Wurzeldurchgänge ausgeführt werden.</li> </ul> <p>Anm.: Gemäß ASME, Abschn. IX ist der Wechsel zu Spülgas nicht zwingend. Formiergas (90 % Stickstoff und 10 % Wasserstoff) ist eine kostengünstigere und zuweilen praktizierte Alternative für die Wurzeldurchgänge. Ob sie akzeptabel ist, hängt davon ab, ob die Verfahrensqualifikation zu einem zufriedenstellenden Ergebnis führt.</p>
FCAW	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ar-20 % CO<sub>2</sub></li> <li>Ar-18 % CO<sub>2</sub> -2 % O<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Typische Schutzgasdurchflussmenge 20–25 l/min</li> <li>Stickout-Länge 15–20 mm</li> </ul>

Abb. 7.3.3 Empfohlene Schweißparameter (Ref. 7.3.1)

## 7.4 Qualitätssicherung (Ref. 7.4.1 und 7.4.2)

Nichtrostende Duplex-Stähle sind nicht wesentlich schwieriger zu verarbeiten als martensitische oder austenitische Sorten, allerdings erfordern sie eine strengere Einhaltung der Verarbeitungsparameter.

Die **Verarbeitungsvorschriften** müssen auch die erforderlichen Prüfverfahren umfassen. Diese stützen sich üblicherweise auf Normen (**siehe Anhang 1**). So nennen und beschreiben z.B. ISO 17781 und NACE MR0175/ISO 15156 die Prüfungen, die üblicherweise in einem der anspruchsvollsten Einsatzbereiche, der Öl- und Gasindustrie, vorgenommen werden. Darüber hinaus können weitergehende Anforderungen gelten, beispielsweise – ebenfalls bei Öl und Gas – Norsok M-630 (Werkstoffe) und M-650 (Herstellerezulassung).

Die Qualitätssicherung umfasst i.d.R. die folgenden Punkte:

1. chemische Zusammensetzung (ASTM oder EN),
2. Parameter der Wärmebehandlung,
3. mechanische Eigenschaften: Härte, Zugfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit bei Raumtemperatur sowie erforderlichenfalls bei Minustemperaturen (im Falle von Norsok z.B. -46 °C),
4. metallographische Prüfung: Ferritgehalt zwischen 40 % und 60 %; keine dritten Phasen wie etwa Sigmaphase, Chi-Phase, Nitride oder Karbide (ASTM A923),
5. Korrosionsbeständigkeit: CPT-(*Corrosion Pitting Temperature*) Test (ASTM G48).

Darüber hinausgehende Anforderungen können – z.B. bei Anwendungen in der Öl- und Gasindustrie unter H<sub>2</sub>S-haltigen Bedingungen – Prüfungen auf Spannungsrisskorrosion umfassen.

### Schweißerprüfung

Die Verarbeitung muss von entsprechend qualifiziertem Personal ausgeführt werden. Das gilt besonders für das Schweißen. ISO und ASME schreiben die Qualifikationsverfahren fest. Entsprechendes gilt für Personal, das zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen vornimmt.



Detail des Kwandong-Eishockeyzentrums in Korea, bekleidet mit dem Lean-Duplex-Stahl 329LD

## 8 Schlussfolgerungen

Nichtrostende Duplex-Stähle werden inzwischen in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, allerdings sind sie noch weit davon entfernt, ihr Potential voll entfaltet zu haben. In den meisten Anwendungsbereichen ergänzen sie andere Typen nichtrostenden Stahls, insbesondere die austenitischen.

Wenngleich Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit die bekanntesten Vorteile sind, gibt es aktuell Entwicklungen, die sie gezielt auf bestimmte Anwendungen abstimmen: die Nutzung unter arktischen Bedingungen, noch höhere Korrosionsbeständigkeit, noch bessere mechanische Eigenschaften, bessere Wärmeleitung (durch dünnere Wandstärken), verbesserte Spanbarkeit oder leichtere Umformbarkeit. Weitere Entwicklungen zeichnen sich ab. So dürften sich auch durch 3D-Druck (*Additive Manufacturing*) Teile aus nichtrostendem Duplex-Stahl mit hoher Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit herstellen lassen. Zudem gelten natürlich die bekannten allgemeinen Vorteile von nichtrostendem Stahl: Langlebigkeit, geringe lebensdauerbezogene Kosten, 100 %ige Recyclingfähigkeit, Ästhetik usw. Die vorliegende Broschüre soll Anregungen für künftige Projekte geben.

## 9 Schrifttum

### 1. Einleitung

1. Peckner D., Bernstein I.M. "Handbook of stainless steels", McGraw Hill (1977)
2. P. Lacombe, B. Baroux and G. Beranger «Les Aciers Inoxydables » Les Editions de Physique (1990)
3. Voronenko, B.I. "Austenitic-Ferritic stainless steels: A state-of-the-art review" Met Sci Heat Treat (1997) 39: 428. <https://doi.org/10.1007/BF02484228>
4. J. Charles: "Duplex families and applications: A review Part 1: From Duplex Pioneers up to 1991" Stainless Steel World (July/August 2017), p.1  
[stainless-steel-world.net/pdf/Duplex\\_families\\_and\\_applications\\_A\\_review\\_Part\\_1.pdf](https://stainless-steel-world.net/pdf/Duplex_families_and_applications_A_review_Part_1.pdf)
5. J. Charles: "Duplex families and applications: A review Part 2: From 1991 to nowadays" Stainless Steel World (September 2015) p.67  
[stainless-steel-world.net/pdf/Duplex\\_families\\_and\\_applications\\_Part\\_2.pdf](https://stainless-steel-world.net/pdf/Duplex_families_and_applications_Part_2.pdf)
6. J. Charles: "Duplex families and applications: A review Part 3: The lean Duplex grades" Stainless Steel World (October 2015) p.1  
[stainless-steel-world.net/pdf/Duplex\\_Families\\_applications\\_a\\_review\\_part3.pdf](https://stainless-steel-world.net/pdf/Duplex_Families_applications_a_review_part3.pdf)

### 2. Normen und chemische Zusammensetzung

1. IMO A Publication: "Practical Guidelines for the fabrication of Duplex stainless steels", 3rd Edition, (2014) ISBN 978-1-907470-09-7  
[imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/practical-guidelines/fabrication-series.php](http://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/practical-guidelines/fabrication-series.php)
2. J. Charles and P. Chemelle: "The history of Duplex developments, nowadays DSS properties and duplex market future trends" Proceedings of the Duplex Stainless Steel Conference, Beaune, (2010), p.29  
[pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html](http://pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html)

### 3. Korrosionsbeständigkeit

1. IMO A Publication: "Stainless grades and properties"  
[imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/steel-grades.php](http://imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/steel-grades.php)
2. NACE Publication: R. Francis "The corrosion of duplex stainless steels: A practical guide for engineers (2018)" ISBN 978-1-57590-369-9  
[store.nace.org/the-corrosion-of-duplex-stainless-steels-a-practical-guide-for-engineers-2](http://store.nace.org/the-corrosion-of-duplex-stainless-steels-a-practical-guide-for-engineers-2)
3. Sandvik Corrosion Tables  
[materials.sandvik.fr/materials-center/corrosion-tables/](http://materials.sandvik.fr/materials-center/corrosion-tables/)
4. F.V. Adams, P. Olubambi, J.H. Potgieter and J. Van Der merwe: "Corrosion resistance of duplex stainless steels in selected organic acids and organic acid/chloride environments" Anti-corrosion Methods and Materials, (May 2010), 57(3), p.107  
[researchgate.net/publication/235312358\\_Corrosion\\_resistance\\_of\\_duplex\\_stainless\\_steels\\_in\\_selected\\_organic\\_acids\\_and\\_organic\\_acidchloride\\_environments](http://researchgate.net/publication/235312358_Corrosion_resistance_of_duplex_stainless_steels_in_selected_organic_acids_and_organic_acidchloride_environments)
5. Nickel Institute Publication: "Stainless steels and specialty alloys for pulp, paper and biomass conversion" 2nd Edition, (2017)  
[nickelinstitute.org/media/1810/stainlesssteelsandspecialtyalloysformodernpulpandpapermills\\_11025\\_.pdf](http://nickelinstitute.org/media/1810/stainlesssteelsandspecialtyalloysformodernpulpandpapermills_11025_.pdf)
6. [super-metals.com/applications/corrosion-resistance-of-duplex-stainless-steels/](http://super-metals.com/applications/corrosion-resistance-of-duplex-stainless-steels/)
7. British Stainless Steel Association: "Duplex stainless steels – A simplified guide"  
[https://bssa.org.uk/bssa\\_articles/2-duplex-stainless-steels-a-simplified-guide-2/](https://bssa.org.uk/bssa_articles/2-duplex-stainless-steels-a-simplified-guide-2/)
8. J. Grocki "A primer for duplex stainless steels" Stainless Steel World Seminar (October 2012)  
[steeltank.com/Portals/0/Pressure%20Vessels/SSWseminarOct2012/4%20A%20Primer%20for%20DUPLEX%20%20Corrosion%20Solutions%20presentation.pdf](http://steeltank.com/Portals/0/Pressure%20Vessels/SSWseminarOct2012/4%20A%20Primer%20for%20DUPLEX%20%20Corrosion%20Solutions%20presentation.pdf)
9. F.W. Hoinard Les aciers inox Duplex (2014) Cefracor publication  
[docplayer.fr/15144426-Les-aciers-inox-duplex.html](http://docplayer.fr/15144426-Les-aciers-inox-duplex.html)
10. F. Busschaert, T. Cassagne, A. Pedersen and Stale Johnsen: "New challenges for the use of duplex stainless steels at low temperature" Rev. Metall., 110 3 (2013) 185-197  
[metallurgical-research.org/articles/metal/abs/2013/03/metal110081/metal110081.html](http://metallurgical-research.org/articles/metal/abs/2013/03/metal110081/metal110081.html)
11. Jamila Adem, "Erosion-resistance of the 1.4062 lean duplex for mining industries". Duplex World Seminar & Summit 2016, (October 2016), Düsseldorf
12. A. Bhattacharya: "Stress Corrosion Cracking of Duplex Stainless Steels in Caustic Solutions". Thesis: Georgia Institute of Technology, Atlanta. (2008)

13. Technical data datasheet of Associated Steel Corp.  
[www.worldstainless.org/applications](http://www.worldstainless.org/applications)
  14. J. Charles: "Past, present and future of the duplex stainless steels"  
[www.worldstainless.org/applications](http://www.worldstainless.org/applications)
  15. R. M. Magdowski; M. O. Speidel. Stress corrosion cracking of high nitrogen steels. Proceedings: High nitrogen steels - HNS 88. EDITED BY J Foot, J.; Hendry, A.; 1989. p.251-255
  16. R. Pettersson et al.: Avoiding catastrophic corrosion failure of stainless steels (CORINOX). European commission report in press from RFCS-CT-2006-00022. (2009), p.92
  17. From Ugitech S.A. ([ugitech.com](http://ugitech.com))
  18. Outokumpu publication "Handbook of stainless steels" (2013)  
[outokumpu.com/choose-stainless/stainless-basics/handbooks](http://outokumpu.com/choose-stainless/stainless-basics/handbooks)
  19. IMOA Moly review (1/2008)  
[imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php](http://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php)
  20. J.Charles, and S . Bernhardson, S. Duplex Stainless Steels '91 Conference (1990)
  21. V.S. Le Manchet and A. Proust: "Abrasion-Corrosion resistance of stainless and wear-resistant steel for oil sands applications" NACE Conference and Expo (2016) Vancouver
- #### 4. Physikalische Eigenschaften
1. Euro Inox "Stainless Steel: Table of Technical Properties" Materials and Applications series Vol 5, ISBN 978-2-87997-242-8  
<https://www.worldstainless.org/about-stainless/what-are-stainless-steels/mechanical-and-physical-properties/>
- #### 5. Mechanische Eigenschaften
1. Steel Construction Institute publication: "Design Manual for Structural Stainless Steel", 4th Edition (2017)  
[steel-sci.com/](http://steel-sci.com/)
  2. ISSF Stainless steel rebar website: [stainlesssteelrebar.org](http://stainlesssteelrebar.org) (and additional refs on some bridges)
  3. J. Baas: "Application limits for Duplex Stainless Steels at elevated temperatures in the process industries" Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
  4. S. Cissé and G Passot: "Effect of ageing on lean duplex UR2202 properties for plates and welds" Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
  5. D.S. Bergstrom and D.R. Hasek: Elevated Temperature Phase Stability of ATI2003® Mo-Containing Lean Duplex Alloy" Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
  6. R. Bapat and P. Goswami: "Duplex stainless steels: A critical review of Metallurgy, Engineering codes and Welding practices" Stainless steel world Americas conference & Expo 2012 (October 2012)
  7. S. Cissé and G Passot: "Duplex Stainless Steels for Arctic Applications" Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
  8. A. Fajimi: "Low temperature application of duplex stainless steels" Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
  9. R. Cordewener: "Impact values at low temp" Proceedings of Duplex Seminar and Summit (2016)
  10. Ugitech S.A.: Work Hardening Curves of grades EN 1.4062 and EN 1.4410
  11. Sandvik brochure "Stainless steels for springs and other demanding applications"
  12. R. Moser, P. Singh, L. Kahn and K. Kurtis: "Durability of Precast Prestressed Concrete Piles in Marine Environment, Part 2. Volume 2: Stainless Steel Prestressing Strand and Wire" Final report. School of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, (June 2012)
  13. D.P. Schuetz: " Investigation of High Strength Stainless Steel Prestressing Strands", M.Sc. Thesis, School of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, (May 2013)
  14. P. Alvaro, L.F. Kahn and K. Kurtis: "Corrosion-free precastprestressed concrete piles made with stainless steel reinforcement: construction, test and evaluation" GDOT research Project N°1134 Final report. Contract with Georgia Department of Transportation in cooperation with the US department of transportation federal Highway Administration, (March 2015)
  15. Y. Wu and U. Nürnberger: " Corrosion-Technical properties of high-strength stainless steels for the application of prestressed concrete structures" Materials and Corrosion, (2009), 60, N°10, p.771 DOI: 10.1002/maco.20090527
  16. AISC and SCI Guide7 – Design Guide 27: Structural Stainless Steel p.113  
[aisc.org/Design-Guide-27-Structural-Stainless-Steel](http://aisc.org/Design-Guide-27-Structural-Stainless-Steel)

17. H. Groth and Erik Schedin: "Austenitic and Duplex Stainless Steels in Fire" Proceedings of Nordic Steel Construction Conference 2012, Oslo (Nov 2012)  
[researchgate.net/publication/287632825\\_Austenitic\\_and\\_Duplex\\_Stainless\\_Steels\\_in\\_Fire](https://researchgate.net/publication/287632825_Austenitic_and_Duplex_Stainless_Steels_in_Fire)
18. G. Waller and D.J. Cochrane: "Stainless steel for durability, fire resistance and safety" Nickel Institute publication  
[nickelinstitute.org/library/?opt\\_perpage=20&opt\\_layout=grid&searchTerm=fire&page=1](https://nickelinstitute.org/library/?opt_perpage=20&opt_layout=grid&searchTerm=fire&page=1)
19. C. Tigerstrand and J. Sjöström: "DSS adds structural and cost efficiency to seismic design of storage tanks" Proceedings of the 8th International Conference on Duplex Stainless steels, 13-15 (October 2010), Beaune, France, p.1197  
[pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html](https://pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html)

## 6. Anwendungen

### Allgemein

1. Stainless Steel World: "A steel for all seasons: duplex expands its range", (November 2014)  
[stainless-steel-world.net/pdf/a\\_steel\\_for\\_all\\_seasons.pdf](https://stainless-steel-world.net/pdf/a_steel_for_all_seasons.pdf)
2. J. Chater "Playing-to-strength-duplex-gains-market-share-in-construction-and-transport", Stainless Steel World, (November 2017)
3. C. Houska : "Duplex stainless steel revolutionizes structural design" The Construction Specifier, (April 2015)  
[constructionspecifier.com/duplex-stainless-steel-revolutionizes-structural-design/1/](https://constructionspecifier.com/duplex-stainless-steel-revolutionizes-structural-design/1/)
4. AISC and SCI Guide7 – Design Guide 27: Structural Stainless Steel  
[aisc.org/Design-Guide-27-Structural-Stainless-Steel](https://aisc.org/Design-Guide-27-Structural-Stainless-Steel)
5. SCI: Design Manual for Structural Stainless Steel, 4th Edition, (February 2018)  
[steel-stainless.org/designmanual](https://steel-stainless.org/designmanual)
6. Deutsche Institut für Bautechnik publication "Sonderdruck 862: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30,3-6) (March 2018)  
[edelstahl-rostoffrei.de/publikationen/iser-publikationen/sonderdruck-862-allgemeine-bauaufsichtliche-zulassung-z-303-6-vom-5-maerz-2018-erzeugnisse-bauteile-und-verbindingsmittel-aus-nichtrostenden-staehlen](https://edelstahl-rostoffrei.de/publikationen/iser-publikationen/sonderdruck-862-allgemeine-bauaufsichtliche-zulassung-z-303-6-vom-5-maerz-2018-erzeugnisse-bauteile-und-verbindingsmittel-aus-nichtrostenden-staehlen)

7. IMO A Publication " Duplex Stainless steel"  
[imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php](https://imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php)

### 6.1 Kunst

1. Arches of Oman, Muscate: "ISSF publication "Stainless Steel in Architectural Applications Volume 4", p.6  
<https://www.worldstainless.org/applications>
2. Venus rising Brisbane, Australia: "ISSF publication "Stainless Steel in Architectural Applications Volume 2", p.13  
<https://www.worldstainless.org/applications>
3. The Runners, Chicago  
[csaeng.com/projects/view/the-runners](https://csaeng.com/projects/view/the-runners)

### 6.2 Architektur

1. Euro-Inox publication "Innovative Façades in Stainless Steel" Building Series, vol. 19, p.34. ISBN 978-2-87997-372-2  
<https://www.worldstainless.org/applications>
2. IMO A Publication Molyreview issue 1, (2019) "Louvre Abu Dhabi: A rain of Light"  
[imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php](https://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php)
3. IMO A Publication Moly-grade stainless steel makes waves at Middle Eastern Airport (Roof of Doha airport) Moly Review (January 2009) p.4  
[imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php](https://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php)
4. Cedinox publication Acero Inoxidable N°82, Junio 2018 Basilica de la Sagrada Familia  
[cedinox.es/es/publicaciones/revista-acero-inoxidable/](https://cedinox.es/es/publicaciones/revista-acero-inoxidable/)
5. ISSF publication "Stainless Steel in Architectural Applications Volume 3" p.34 "La Sagrada Familia"  
<https://www.worldstainless.org/applications>
6. IMO A Publication "Duplex rigging for glass sails" Moly review, issue1, (2015) [imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php](https://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php)
7. ISSF page "Fondation Louis Vuitton"  
<https://www.worldstainless.org/applications>

8. ISSF Publication "Stainless Steel as an Architectural Material Volume III"  
<https://www.worldstainless.org/applications>

## 6.3 Brücken

1. IMO A web publication "Stainless steel in Vehicular, rail and pedestrian bridges" (March 2018)  
[imoa.info/stainless-solutions/archive/37/Vehicular-rail-and-pedestrian-bridges.php](http://imoa.info/stainless-solutions/archive/37/Vehicular-rail-and-pedestrian-bridges.php)
2. C. Houska "More on duplex stainless steel and bridges ", The construction specifier, (May 2015)  
[constructionspecifier.com/duplex-bridges/](http://constructionspecifier.com/duplex-bridges/)
3. EU Publication report "Application of duplex stainless steel for welded bridge construction in an aggressive environment", (March 2009), ISBN 978-92-79-09948-9  
[op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ec2748d4-3269-43cd-9a34-3a0e1f-ba4e23/language-en/format-PDF/source-111268318](http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ec2748d4-3269-43cd-9a34-3a0e1f-ba4e23/language-en/format-PDF/source-111268318)
4. Euro Inox publication "Pedestrian bridges in stainless steel" ISBN 2879970849  
[bssa.org.uk](http://bssa.org.uk)
5. N. Baddoo and A. Kosmač "Sustainable Duplex Stainless Steel bridges" Euro Inox publication  
[worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Sustainable\\_Duplex\\_Stainless\\_Steel\\_Bridges.pdf](http://worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Sustainable_Duplex_Stainless_Steel_Bridges.pdf)
6. K F. Hansen, L. Lauge and S. Kite: "Stonecutters Bridge – Detailed design" (January 2004)  
DOI: 10.2749/222137804796291719  
[researchgate.net/publication/233611421\\_Stonecutters\\_Bridge\\_-\\_Detailed\\_Design/citation/download](http://researchgate.net/publication/233611421_Stonecutters_Bridge_-_Detailed_Design/citation/download)
7. Steel Construction Institute publication: "Stonecutters Bridge Towers"(2010)  
<https://www.worldstainless.org/applications>
8. G. Gedge: "Use of duplex stainless steel plate for durable bridge construction" (January 2007) DOI: 10.2749/222137807796119771  
[researchgate.net/publication/233632633\\_Use\\_of\\_Duplex\\_Stainless\\_Steel\\_Plate\\_for\\_Durable\\_Bridge\\_Construction](http://researchgate.net/publication/233632633_Use_of_Duplex_Stainless_Steel_Plate_for_Durable_Bridge_Construction)
9. Champlain bridge, Montreal Nickel Institute magazine, Vol. 34, N°2, (2019)  
<https://nickelinstitute.org/nickel-magazine/>
10. Champlain bridge, Montreal Stainless Steel World online, 05 January 2016  
[stainless-steel-world.net/news/58262/nas-to-supply-stainless-steel-bar.html](http://stainless-steel-world.net/news/58262/nas-to-supply-stainless-steel-bar.html)
11. Hong-Kong Macau bridge ISSF Publication: "Stainless steel in Infrastructure"  
[worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF\\_Stainless\\_Steel\\_in\\_Infrastructure\\_English.pdf](http://worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_in_Infrastructure_English.pdf)
12. Hong-Kong Macau bridge  
[en.wikipedia.org/wiki/Hong\\_Kong%E2%80%93Macau\\_Bridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Hong_Kong%E2%80%93Macau_Bridge)
13. IMO A publication "Innovative bridge at Ft Worth, Texas" Moly-Review 1/2018  
[imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/](http://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/)
14. Steel Construction Institute publication: "Cala Galdana Bridge" (2010)  
<https://www.worldstainless.org/applications>
15. Railway Bridges in India  
[apnews.com/pamban-to-become-indias-first-railway-bridge-to-use-stainless-steel-structurals/](http://apnews.com/pamban-to-become-indias-first-railway-bridge-to-use-stainless-steel-structurals/)
16. Steel Construction Institute publication: "Helix Pedestrian Bridge" (2011)  
<https://www.worldstainless.org/applications>
17. ISSF Publication: Bascule pedestrian bridge in "Stainless steel as an architectural material"  
[worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF\\_Stainless\\_Steel\\_as\\_an\\_Architectural\\_Material.pdf](http://worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_Steel_as_an_Architectural_Material.pdf)
18. Trumpf bridge  
[structurae.net/en/structures/trumpf-footbridge](http://structurae.net/en/structures/trumpf-footbridge)
19. IMO A Publication "San Diego's new harbor bridge sails onto the skyline" MolyReview, (June 2012)



## 6.4 Küstenschutz

1. Sea Wall at Cromer  
[stainlesssteelrebar.org/applications/coastal-protection-at-cromer-uk/](http://stainlesssteelrebar.org/applications/coastal-protection-at-cromer-uk/)
2. Bayonne breakwater  
[stainlesssteelrebar.org/applications/bayonne-breakwater/](http://stainlesssteelrebar.org/applications/bayonne-breakwater/)
3. Tsunami-proof floodgates Japan (NSSC presentation)
4. Sluices Mt St Michel, Nickel Magazine Vol. 30, 2015  
<https://nickelinstitute.org/nickel-magazine/>
5. Tammerkoski floodgate  
[pratiwisteel.com/news/view/20110708090600/Outokumpu-Duplex-Stainless-Steel-For-Sluice-And-Flood-Gates-Structures-In-Finland.html](http://pratiwisteel.com/news/view/20110708090600/Outokumpu-Duplex-Stainless-Steel-For-Sluice-And-Flood-Gates-Structures-In-Finland.html)  
[pontek.fi/in-english](http://pontek.fi/in-english)
6. Monaco extension  
[cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/Extension-en-mer-de-Monaco.pdf](http://cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/Extension-en-mer-de-Monaco.pdf)
7. Gårda Dämme floodgate, Gothenburg  
<https://www.outokumpu.com>

## 6.5 Denkmalpflege

1. Statue of Liberty  
[imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/structural-restoration.php](http://imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/structural-restoration.php)
2. IMOA Publication: "Super duplex to keep the Vasa safe"  
[imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/structural-restoration.php](http://imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/architecture/structural-restoration.php)
3. Cedinox publication "Rehabilitacion - Iglesia de Santiago" Acero Inoxidable N°76, Junio 2015, p.14  
[cedinox.es/es/publicaciones/revista-acero-inoxidable/index.html?psolrlistslderrevis-tas=2](http://cedinox.es/es/publicaciones/revista-acero-inoxidable/index.html?psolrlistslderrevis-tas=2)

4. Cedinox publication; " Rehabilitacion de Iglesia de Santa Catalina" Acero Inoxidable, vol. 83, december 2018, p.8.  
[cedinox.es/es/publicaciones/revista-acero-inoxidable/index.html?psolrlistslderrevis-tas=1](http://cedinox.es/es/publicaciones/revista-acero-inoxidable/index.html?psolrlistslderrevis-tas=1)

## 6.6 Tunnel

1. ISSF Publication "Stainless steels in tunnels"  
<https://www.worldstainless.org/applications>
2. Nickel Institute publication "Queensway Tunnel Refurbishment England" (May 2017)  
[nickelinstitute.org/library/?opt\\_perpage=20&opt\\_layout=grid&searchTerm=tunnel&page=1](http://nickelinstitute.org/library/?opt_perpage=20&opt_layout=grid&searchTerm=tunnel&page=1)
3. ISSF publication "Slab suspension in a bypass tunnel"  
<https://www.worldstainless.org/applications>
4. S. Mead "How a new duplex stainless steel helped transform Norway's rail infrastructure" Design Solution Journal, (February 2018)  
[connectingindustry.com/DesignSolutions/how-a-new-duplex-stainless-steel-helped-transform-norways-rail-infrastructure.aspx](http://connectingindustry.com/DesignSolutions/how-a-new-duplex-stainless-steel-helped-transform-norways-rail-infrastructure.aspx)
5. Sandvik Publication  
[materials.sandvik/en/news-media/news-and-stories/archive/2016/10/sandvik-hollow-bar-brings-100-years-of-maintenance-free-service-to-norways-revolutionary-high-speed-railway/](http://materials.sandvik/en/news-media/news-and-stories/archive/2016/10/sandvik-hollow-bar-brings-100-years-of-maintenance-free-service-to-norways-revolutionary-high-speed-railway/)

## 6.7 Transportwesen

1. IMOA "Safer seas with stainless steel", Moly-review (032018)  
[imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/molybdenum-use-by-material/duplex-stainless-steel/duplex-stainless-steel.php](http://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/molybdenum-use-by-material/duplex-stainless-steel/duplex-stainless-steel.php)
2. F. Neessen and P. Bandsma: Tankers - "A composition in Duplex stainless" Welding innovation, vol. 18, (2001) N°3  
[jflf.org/v/vspfiles/assets/pdf/duplexstainless.pdf](http://jflf.org/v/vspfiles/assets/pdf/duplexstainless.pdf)
3. J. Chater « Playing to Strength: duplex gains market share in construction and transport" Stainless Steel World, (November 2017)

4. H. Groth, B. Leffler and A. Bergquist: "Advantages and limitations of 2205 and other duplex stainless steels for the transportation of chemicals" Duplex Conference '97", (21-23 October), 1997, Maastricht, The Netherlands  
[researchgate.net/publication/318860884\\_Advantages\\_and\\_limitations\\_of\\_2205\\_and\\_other\\_duplex\\_stainless\\_steels\\_for\\_the\\_transport\\_of\\_chemicals](https://researchgate.net/publication/318860884_Advantages_and_limitations_of_2205_and_other_duplex_stainless_steels_for_the_transport_of_chemicals)
5. J. Peultier, F. Barrau and J.P. Audouard: "Corrosion Resistance of Duplex and Super Duplex Stainless Steels for Air Pollution Control process Systems", Corrosion 2005, 3-7 April 2005, Houston, Tx, USA. ©2005 NACE International Document ID: NACE-05316
6. Kiruna Wagon News: "Kiruna wagon modernises wagons with Duplex Stainless Steel for LKAB" (05 April 2018)  
[kirunawagon.com/archives/2651](http://kirunawagon.com/archives/2651)
7. Stadler SA datasheet: "Tramlink for EMTU Santos, Brazil" (2016)  
[stadlerail.com/en/references/overview-references/](http://stadlerail.com/en/references/overview-references/)

## 6.8 Chemische Verfahrenstechnik

1. G. Notten: "Application of Duplex stainless steel in the chemical process industry" 5th Duplex stainless steel world Conference, (1997)  
[stainless-steel-world.net/pdf/D97\\_201.pdf](http://stainless-steel-world.net/pdf/D97_201.pdf)
2. Heat exchangers: [enerquip.com/heat-exchanger-blog/duplex-stainless-steel-makes-an-excellent-choice-for-manufacturers/](http://enerquip.com/heat-exchanger-blog/duplex-stainless-steel-makes-an-excellent-choice-for-manufacturers/)
3. Proc. Int Conf. on Duplex Stainless Steels, (13-15 October 2010), Beaune Session IB "Process (Chemical) Industry" p. 167 – 249.  
[pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html](http://pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html)

## 6.9 Papier- und Zellstoffherstellung

1. A. Tuomi et al. : "Increased usage of duplex materials in manufacturing pulping equipment" Duplex America 2000 Conference proceedings, p.401.  
[stainless-steel-world.net/pdf/DA2\\_061.pdf](http://stainless-steel-world.net/pdf/DA2_061.pdf)
2. J. Chater: "The pulp and paper industry turns to duplex" Stainless Steel World, (October 2007), p. 70  
[stainless-steel-world.net/pdf/SSW\\_pulp\\_LR.pdf](http://stainless-steel-world.net/pdf/SSW_pulp_LR.pdf)

3. Penn Stainless " Duplex Usage in the Pulp and Paper Industry" (August 2012)  
[pennstainless.com/blog/2012/08/duplex-usage-in-the-pulp-and-paper-industry/](http://pennstainless.com/blog/2012/08/duplex-usage-in-the-pulp-and-paper-industry/)
4. Nickel Institute Publication: " Stainless steels and specialty alloys for pulp, paper and biomass conversion – A practical guide for mill engineers" Senior Editor Andrew Gardner 2nd Edition, (2017)  
[nickelinstitute.org/library/?opt\\_perpage=20&opt\\_layout=grid&searchTerm=pulp%20and%20paper&page=1](http://nickelinstitute.org/library/?opt_perpage=20&opt_layout=grid&searchTerm=pulp%20and%20paper&page=1)

## 6.10 Öl- und Gasindustrie

1. D. Zuili: "The use of stainless steels in oil&gas industry" Proceedings of the Duplex Stainless Steel Conference, Beaune, (2010), p575.  
[pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html](http://pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html)
2. Norsok and NACE standards (see Appendix 1)
3. T. Cassagne F. Busschaert "Experience with Duplex stainless steels in Oil and Gas Production", Duplex 2007, June 18-20, Grado, Italy ISBN 88-85298-60-5  
[tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20071106432/Experience-with-duplex-stainless-steels-in-oil/](http://tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20071106432/Experience-with-duplex-stainless-steels-in-oil/)
4. <https://www.atimetals.com/markets/energy>
5. World Oil Magazine: "Stainless steel umbilical tubing proves strength after 17 years' sub-sea service", vo 238, N°5, (June 2017)
6. IMOA newsletter (July 2008) "Lean Duplex Stainless Steel Flexible Flowlines for the Kikeh Offshore Oil Field"  
[imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php](http://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php)
7. API Technical report 938C "Use of Duplex Stainless Steels in the Oil refining Industry" 3rd Edition, (February 2015)  
[api.org/~media/files/publications/whats%20new/938-c\\_e3%20pa](http://api.org/~media/files/publications/whats%20new/938-c_e3%20pa)
8. R. Francis: "The corrosion of Duplex stainless steels: A practical guide for engineers", NACE International Publication, (2018), ISBN: 978-1-57590-369-9  
[store.nace.org/the-corrosion-of-duplex-stainless-steels-a-practical-guide-for-engineers-2](http://store.nace.org/the-corrosion-of-duplex-stainless-steels-a-practical-guide-for-engineers-2)
9. Wikipedia: [subseapedia.org/w/index.php?title=Umbilicals](http://subseapedia.org/w/index.php?title=Umbilicals)

## 6.11 Kernkraftwerke

1. F. King: "Corrosion resistance of austenitic and duplex stainless steels in environments related to UK geological disposal" UK Nuclear decommissioning Authority, (2009)
2. American Metal Market "Stainless steel waste boxes ready for Sellafield" April 09, 2018 [amm.com/Article/3799585/Stainless-steel-waste-boxes-ready-for-Sellafield.html?Print=true](http://amm.com/Article/3799585/Stainless-steel-waste-boxes-ready-for-Sellafield.html?Print=true)
3. A. Backhouse: "Stainless Steels for the Nuclear Industry" Outokumpu Experience 2013, London [marketing.outokumpu.com/ext/webpage/show.php?p=165720a5c08034848fc7aee-14024aa3ab462c9d](http://marketing.outokumpu.com/ext/webpage/show.php?p=165720a5c08034848fc7aee-14024aa3ab462c9d)
4. IMOA publication: "Duplex 2205: The new choice for nuclear power piping" Moly Review, (July 2010), p.8 [imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php](http://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/moly-review.php)
5. US Areva (now called Orano) leaflet (NUHOMS® DOX Duplex Stainless Steel Canister Option" [us.areva.com/home/liblocal/docs/Catalog/AREVA-TN/ANP\\_U-542-V3-17-ENG\\_NUHOMS\\_DPX.pdf](http://us.areva.com/home/liblocal/docs/Catalog/AREVA-TN/ANP_U-542-V3-17-ENG_NUHOMS_DPX.pdf)
6. Sellafield Magazine, issue 08, (January 2018), p.11 [gov.uk/government/publications/sellafield-magazine-issue-8](http://gov.uk/government/publications/sellafield-magazine-issue-8)

## 6.12 Erneuerbare Energien

1. REN21 report "Renewables 2018 Global status report" ISBN 978-3-9818911-3-3 [ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/](http://ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/)
2. The Steel Construction Institute Publication p.412: "Stainless steel tanks for biogas production » (2016) <https://www.worldstainless.org/applications>
3. K. Osterman : "Stainless steels – Cost-efficient materials for the global biofuel industries" Nickel Institute technical Series N°10 090 [nickelinstitute.org/library/?opt\\_perpage=20&opt\\_layout=grid&searchTerm=biofuel&page=1](http://nickelinstitute.org/library/?opt_perpage=20&opt_layout=grid&searchTerm=biofuel&page=1)
4. IMOA Publication: "Strong sustainable storage tanks" Moly Review, (2/2017) [imoa.info/download\\_files/molyreview/excerpts/17-2/Storage\\_tanks.pdf](http://imoa.info/download_files/molyreview/excerpts/17-2/Storage_tanks.pdf)

5. ISSF Publication: "New application Awards 2017", p.24 <https://www.worldstainless.org/applications>
6. I.O. Thorbjornsson et al : "Materials for geothermal steam utilization at higher temperatures and pressure" Proceedings World Geothermal Congress, (April 2015), Melbourne [researchgate.net/publication/303462143\\_Materials\\_for\\_Geothermal\\_Steam\\_Utilization\\_at\\_Higher\\_Temperatures\\_and\\_Pressure](http://researchgate.net/publication/303462143_Materials_for_Geothermal_Steam_Utilization_at_Higher_Temperatures_and_Pressure)
7. M. Van Wijngaarden and J. Chater: "CalEnergy goes for duplex" Stainless Steel World (October 2006) p.54 [stainless-steel-world.net/pdf/SSW\\_Geo\\_LR.pdf](http://stainless-steel-world.net/pdf/SSW_Geo_LR.pdf)
8. IMOA Publication: "Lighter and safer offshore platforms" MolyReview, issue 1 (2018) p.3 [imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/](http://imoa.info/molybdenum-media-centre/downloads/)
9. J. Chater "Playing to Strength: duplex gains market share in construction and transport" Stainless Steel World, (November 2017)

## 6.13 Wasserwirtschaft

1. Hulls: J. Chater: "Running a tight ship: Stainless steel can be cost-effective for the construction of ships and boats" Stainless Steel World, October 2014, p.2 [stainless-steel-world.net/pdf/Running\\_a\\_tight\\_ship.pdf](http://stainless-steel-world.net/pdf/Running_a_tight_ship.pdf)
2. Propeller Shafts: [clementsengineering.co.uk/technical/](http://clementsengineering.co.uk/technical/)
3. Propellers: [steelcraftpropellers.fi/en/propellers/](http://steelcraftpropellers.fi/en/propellers/)
4. Davits: Laser welded square sections [stainless-structurals.com/blog/duplex-stainless-steel-marine-cranes/](http://stainless-structurals.com/blog/duplex-stainless-steel-marine-cranes/)
5. Tanks: T. Snauwaert et al. "Duplex stainless steels in storage tanks" EU Publication", December 2013, ISBN 978-92-79-34576-0 , DOI 10.2777/4944
6. IMOA Publication "Strong sustainable water tanks" MolyReview 2/2017, p.1 [imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php](http://imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php)
7. P.-E. Arnvig: "New applications and experiences with Duplex Stainless Steels – the importance and challenge of standards" Proceedings of International Duplex Seminar and Summit (2016)
8. R. Cordewener ArcelorMittal Industeel "Duplex Stainless Steels for Storage Tanks – Focus on corrosion and Life cycle Cost" Proc. Stainless Steel World Conference and expo 2017

9. Institut de la Corrosion: RFCS Project "Lean Duplex Stainless Steel for Urban and Industrial Wastewater" started 01/09/2017 duration 40 months  
[institut-corrosion.fr/activities/research-and-development/projet-rfcs-duplex-waste/?lang=en](http://institut-corrosion.fr/activities/research-and-development/projet-rfcs-duplex-waste/?lang=en)
10. ISSF Publication: "Stainless Steel in Sewage Treatment Plants" ISBN 978-2-930069-62-3  
[worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF\\_Stainless\\_steel\\_in\\_sewage\\_treatment\\_plants.pdf](http://worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/ISSF_Stainless_steel_in_sewage_treatment_plants.pdf)
11. Euro Inox Publication: "Performance of Stainless Steels in Waste Water Installations" ISBN 978-2-87997-040-0  
<https://www.worldstainless.org/applications/applications-for-the-protection-of-the-environment-and-human-health/protection-of-water/>
12. Nickel Institute Publication "Giving Sewage the stainless steel treatment" Nickel Magazine, Vol.31 N°2, p.10  
[nickelinstitute.org/about-nickel/water/](http://nickelinstitute.org/about-nickel/water/)
13. Information from POSCO, Korea
14. J. Olsson: "Stainless steels for desalination plants" Desalination 183 (2005) p.217.
15. ISSF Publication: "Desalination in stainless steel"  
<https://www.worldstainless.org/applications/applications-for-the-protection-of-the-environment-and-human-health/protection-of-water/>
16. ISSF Publication: "Reverse Osmosis Desalination Plant"  
<https://www.worldstainless.org/applications/applications-for-the-protection-of-the-environment-and-human-health/protection-of-water/>
17. E.D. Mackey and T.F. Seacord : "Guidelines for Using Stainless Steel in the Water and Desalination Industries  
[awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.5942/jawwa.2017.109.0044?tracking\\_action=preview\\_click&r3\\_referer=wol&show\\_checkout=1](http://awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.5942/jawwa.2017.109.0044?tracking_action=preview_click&r3_referer=wol&show_checkout=1) American Waterworks Association
18. Solar hot water tanks  
[redcirclesolar.com.au/slit-systems-and-retro-fitting-to-existing-tanks](http://redcirclesolar.com.au/slit-systems-and-retro-fitting-to-existing-tanks)

## 6.14 Marktübergreifende Anwendungen

1. Insulated Balcony connectors  
[slabe.fr/ancon.co.uk/products/insulated-balcony-connectors/stc-steel-to-concrete-connectors](http://slabe.fr/ancon.co.uk/products/insulated-balcony-connectors/stc-steel-to-concrete-connectors)
2. Springs: [materials.sandvik/en/materials-center/material-datasheets/strip-steel/sandvik-springflex/](http://materials.sandvik/en/materials-center/material-datasheets/strip-steel/sandvik-springflex/)
3. Valves and Pumps: [stainless-steel-world.net/pdf/Duplex\\_stainless\\_use\\_is\\_expanding\\_in\\_valves\\_and\\_pumps.pdf](http://stainless-steel-world.net/pdf/Duplex_stainless_use_is_expanding_in_valves_and_pumps.pdf)
4. Laser welded profiles: [stainless-structurals.com](http://stainless-structurals.com)

## 7 Verarbeitung

### 7.1 Umformung

1. IMOA Publication "Bending, Cold forming and springback of Duplex stainless steels"  
[imoa.info/download\\_files/stainless-steel/IMOA\\_Shop\\_Sheet\\_102.pdf](http://imoa.info/download_files/stainless-steel/IMOA_Shop_Sheet_102.pdf)
2. IMOA Publication: "Hot forming and Heat Treatment of Duplex Stainless Steels"  
[imoa.info/download\\_files/stainless-steel/IMOA\\_Shop\\_Sheet\\_101.pdf](http://imoa.info/download_files/stainless-steel/IMOA_Shop_Sheet_101.pdf)
3. H. Hänninen and J. Romu: "Trends in Forming and welding of Stainless Steels" Proc. 6th European Stainless Steel Conference, (June 2008), Helsinki.  
[researchgate.net/publication/242272425\\_TRENDS\\_IN\\_FORMING\\_AND\\_WELDING\\_OF\\_STAINLESS\\_STEELS](http://researchgate.net/publication/242272425_TRENDS_IN_FORMING_AND_WELDING_OF_STAINLESS_STEELS)
4. Euro Inox Publication "The forming Potential of Stainless Steels" ISBN978-2-87997-211-4  
[worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/FormingPotential\\_EN.pdf](http://worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/FormingPotential_EN.pdf)
5. A. Groth et al: "Forta FDX27 Duplex stainless steel for high strength gasket plate heat exchangers" J. Phys: Conf. Series 896 (2017) 012013 doi 10.1088/1742-6596/896/1/012013  
[researchgate.net/publication/320073320\\_Forta\\_FDX\\_27\\_-\\_duplex\\_stainless\\_steel\\_for\\_high\\_strength\\_gasket\\_plate\\_heat\\_exchangers](http://researchgate.net/publication/320073320_Forta_FDX_27_-_duplex_stainless_steel_for_high_strength_gasket_plate_heat_exchangers)
6. J.O. Nilsson, G Chai: "The physical metallurgy of DSS" Proceedings of the 8th Duplex Stainless Steel Conference, Beaune, (October 2010) p.369  
[pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html](http://pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html)



7. C. Herrera, D. Ponge, D. Raabe "Design of a novel 1Gpa duplex stainless TRIP steel with 60% ductility by a reduction of austenite stability" Acta Materialia, Vol 59, issue 11, (June 2011) p.4653  
[doi.org/10.1016/j.actamat.2011.04.011](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.04.011)
8. J. Tomu et al "Superplastic Forming of LDX2101 (EN 1.4362) Duplex Stainless Steel" Proceedings of European Conference on superplastic forming, (2004) Albi, France.  
[researchgate.net/publication/289531575\\_Superplastic\\_Forming\\_of\\_LDX\\_2101\\_EN\\_14162\\_Duplex\\_Stainless\\_Steel](https://researchgate.net/publication/289531575_Superplastic_Forming_of_LDX_2101_EN_14162_Duplex_Stainless_Steel)
4. R. Pettersson, M. Johansson, E. M. Westin: "Corrosion performance of welds in duplex, superduplex and lean duplex stainless steels" Rivista Italiana della Saldatura vol. 66 (Jan. 2013), p.335  
[researchgate.net/publication/286677410\\_Corrosion\\_performance\\_of\\_welds\\_in\\_duplex\\_superduplex\\_and\\_lean\\_duplex\\_stainless\\_steels](https://researchgate.net/publication/286677410_Corrosion_performance_of_welds_in_duplex_superduplex_and_lean_duplex_stainless_steels)
5. IMOA Publication: [imoa.info/download\\_files/stainless-steel/IMOA\\_Shop\\_Sheet\\_105.pdf](http://imoa.info/download_files/stainless-steel/IMOA_Shop_Sheet_105.pdf)
6. F. Babish: "Welding practice of the duplex stainless steels SAF 2304 SAF2204 and SAF2507"  
[fr.slideshare.net/lalutrivandrum9/welding-duplex-stainless-steel](http://fr.slideshare.net/lalutrivandrum9/welding-duplex-stainless-steel)

## 7.2 Spanabhebende Bearbeitung

1. IMOA Publication: "Machinability of Duplex Stainless Steels"  
[imoa.info/download\\_files/stainless-steel/IMOA\\_Shop\\_Sheet\\_103.pdf](http://imoa.info/download_files/stainless-steel/IMOA_Shop_Sheet_103.pdf)
2. N. Renaudot, E. Chauveau and M. Mantel: "Machinability of Stainless Steel Long products: How to deal with the Sulphur way?" Proceedings of the 8th Duplex Stainless Steel Conference, Beaune (2010), p.1233  
[pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html](http://pubs.kci-webshop.com/Webshop/Product/BOOKS/Duplex-Stainless-Steel---DSS-2010-Conference-Proceedings.html)
3. N. Renaudot, E. Chauveau and M. Mantel: "1.4669, a new lean duplex stainless steel with improved toughness and machinability" La Metallurgia Italiana, (Sept 2012), Vol. 105, p.29
4. Ugima4362 Data Sheet, Ugitech SA.

## 7.3 Schweißen

1. R. Bapat and P. Goswami: "Duplex stainless steels: A critical review of Metallurgy, Engineering codes and Welding practices" Stainless steel world Americas conference & Expo 2012 (October 2012)
2. P.J. Cunat: "The welding of stainless steels", Euro Inox Publication (2007)  
<https://www.worldstainless.org/applications>
3. L.M. Haldorsen: "Welding of duplex piping – Experiences and challenges" Duplex world seminar and summit (2016)

## 7.4 Qualitätssicherung

1. A. Wensley "Developments in the Quality Assurance of Duplex Stainless Steel pressure Vessels for the Pulp and Paper industry" Stainless Steel World Conference, Houston, Tx (November 2001)  
[researchgate.net/publication/279181178\\_Developments\\_in\\_the\\_Quality\\_Assurance\\_of\\_Duplex\\_Stainless\\_Steel\\_Pressure\\_Vessels\\_for\\_the\\_Pulp\\_and\\_Paper\\_Industry](https://researchgate.net/publication/279181178_Developments_in_the_Quality_Assurance_of_Duplex_Stainless_Steel_Pressure_Vessels_for_the_Pulp_and_Paper_Industry)
2. EMMUA Publication 218 "Quality requirements for the Manufacture and Supply of Duplex Stainless Steels"  
[emmua.org/Products/Publications/Digital/EEMUA-Publication-218.aspx](http://emmua.org/Products/Publications/Digital/EEMUA-Publication-218.aspx)

## 10 Anhänge

### Anhang 1 - Die wichtigsten Normen

1. **ISO 15510** Stainless steels – chemical composition
2. **ISO 17781** Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Test methods for quality control of microstructure of ferritic/austenitic (duplex) stainless steels
3. **ASTM A182** Standard specification for forged or rolled alloy or stainless steel pipe flanges, forged fittings and valves and parts for high temperature service
4. **ASTM A240** Standard specification for chromium and chromium nickel stainless steel plate, sheet and strip for pressure vessels and for general applications
5. **ASTM A270** Standard specification for seamless and welded austenitic and ferritic/austenitic stainless steel sanitary tubing
6. **ASTM A276** Standard specification for stainless steel bars and shapes
7. **ASTM A480** Standard specification for general requirements for flat-rolled stainless and heat resisting steel plate, sheet and strip
8. **ASTM A789** Standard specification for seamless and welded ferritic/austenitic stainless steel tubing for general service
9. **ASTM A790** Standard specification for seamless and welded ferritic/austenitic stainless steel pipe
10. **ASTM A815** Standard specification for wrought ferritic, ferritic/austenitic, martensitic stainless steel piping fittings
11. **ASTM A890** Standard specification for castings, iron-chromium-nickel-molybdenum corrosion-resistant, duplex (austenitic/ferritic) for general application
12. **ASTM A923** Standard test methods for detecting detrimental intermetallic phase in duplex (austenitic/ferritic) stainless steels
13. **ASTM A928** Standard specification for ferritic/austenitic (duplex) stainless steel pipe electric fusion welded with addition of filler metal
14. **ASTM A959** Standard guide for specifying harmonized standard grade compositions for wrought stainless steels
15. **ASTM A995** Standard specification for castings, austenitic/ferritic (duplex) stainless steel for pressure-containing parts
16. **BS 6744: 2016** Stainless steel bars. Reinforcement of concrete. Requirements and test methods
17. **EN ISO 9445** Continuously cold-rolled stainless steel – Tolerances on dimensions and form Part 1: narrow strip and cut lengths Part 2: Wide strip and plate/sheet
18. **DIN EN 10088-1** Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle
19. **DIN EN 10088-2** Nichtrostende Stähle - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung
20. **DIN EN 10088-3** Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung
21. **DIN EN 10028-7** Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen - Teil 7: Nichtrostende Stähle
22. **DIN EN 10216-5** Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 5: Rohre aus nichtrostenden Stählen
23. **DIN EN 10272** Stäbe aus nichtrostendem Stahl für Druckbehälter
24. **DIN EN 10296-2** Geschweißte kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Nichtrostende Stähle
25. **DIN EN 10217-7:2019-03** - Entwurf Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 7: Rohre aus nichtrostenden Stählen
26. **DIN EN 10253-4** Formstücke zum Einschweißen - Teil 4: Austenitische und austenitisch-ferritische (Duplex-)Stähle mit besonderen Prüfanforderungen
27. **DIN EN 10297-2** Nahtlose kreisförmige Stahlrohre für den Maschinenbau und allgemeine technische Anwendungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Rohre aus nichtrostenden Stählen
28. **Vd TÜV WB418** Ferritisch-austenitischer Walz- und Schmiedestahl, X2CrNiMoN22-5-3, Werkstoff-Nr. 1.4462; Band, Blech, Flansch, Form- und Stabstahl, nahtloses Rohr, Schmiedestück
29. **Norsok Standard M630** Material data sheets and element data sheets for piping
30. **NACE MR0175/ISO15156-3** Petroleum and natural gas industries – materials for use in H<sub>2</sub>S containing environments in oil and gas production



## Anhang 2 - Chemische Zusammensetzung (typische Werte)

	Werkstoffsorte	EN Werkstoffnummer	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W	PREN
Lean-Duplex- Stähle	S32001	1.4482	0.03	19.5-21.5	1.00-3.00	0.6	0.05-0.17	4.00-6.00	1.00	-	21-23
	S82012	1.4635	0.05	19.0-20.5	0.80-1.50	0.10-0.60	0.16-0.26	2.00-4.00	1.00	-	24-26
	S82122	-	0.03	20.5-21.5	1.50-2.50	0.60	0.15-0.20	2.00-4.00	0.50-1.50	-	24-26
	S32101	1.4162	0.04	21.0-22.0	1.35-1.70	0.10-0.80	0.20-0.25	4.00-6.00	0.10-0.80	-	25-27
	S32202	1.4062	0.03	21.5-24.0	1.00-2.80	0.45	0.18-0.26	2.00	-	-	25-28
	S32304	1.4362	0.03	21.5-24.5	3.00-5.50	0.05-0.60	0.05-0.20	2.50	0.05-0.60	-	25-28
	S82011	-	0.03	20.5-23.5	1.00-2.00	0.10-1.00	0.15-0.27	2.00-3.00	0.50	-	25-27
	-	1.4655	0.03	22.0-24.0	3.50-5.50	0.10-0.60	0.05-0.20	2.00	1.00-3.00	-	25-27
	-	1.4669	0.045	21.5-24.0	1.00-3.00	0.50	0.12-0.20	1.00-3.00	1.60-3.00	-	25-27
	S81921	-	0.03	19.0-22.0	2.00-4.00	1.00-2.00	0.14-0.20	2.00-4.00	-	-	27-28
	S82031	1.4637	0.05	19.0-22.0	2.00-4.00	0.60-1.40	0.14-0.25	2.50	1.00	-	27-28
	S82121	-	0.035	21.0-23.0	2.00-4.00	0.30-1.30	0.15-0.25	1.00-2.50	0.20-1.20	-	27-28
	S31500	1.4424	0.03	18.0-19.0	4.30-5.20	2.50-3.00	0.05-0.10	-	-	-	28-29
	S32404	-	0.04	20.5-22.5	5.50-8.50	2.00-3.00	0.20	2.00	1.00-2.00	-	29-30
	S32900	1.4460	0.08	23.0-28.0	2.50-5.00	1.00-2.00	-	1.00	-	-	30-31
	S32003	-	0.03	19.5-22.5	3.00-4.00	1.50-2.00	0.14-0.20	2.00	-	-	30-31
S82441	1.4662	0.03	23.0-25.0	3.00-4.50	1.00-2.00	0.20-0.30	2.50-4.00	0.10-0.80	-	33-34	
Standard-Duplex- Stähle	S31803	1.4462	0.03	21.0-23.0	4.50-6.50	2.50-3.50	0.08-0.20	2.00	-	-	33-35
	S32205	1.4462	0.03	22.0-23.0	4.50-6.50	3.00-3.50	0.14-0.20	2.00	-	-	35-36
	S32950	-	0.03	26.0-29.0	3.50-5.20	1.00-2.50	0.15-0.35	2.00	-	-	36-38
	S32808	-	0.03	27.0-27.9	7.00-8.20	0.80-1.20	0.30-0.40	1.10	-	2.10-2.50	36-38
Super-Duplex- Stähle	S32506	-	0.03	24.0-26.0	5.50-7.20	3.00-3.50	0.08-0.20	1.00	-	0.05-0.30	40-42
	S32520	1.4507	0.03	24.0-26.0	5.50-8.00	3.00-4.00	0.20-0.35	1.50	0.50-2.00	-	40-43
	S32550	1.4507	0.04	24.0-27.0	4.40-6.50	2.90-3.90	0.10-0.25	1.50	1.50-2.50	-	38-41
	S32750	1.4410	0.03	24.0-26.0	6.00-8.00	3.00-5.00	0.24-0.32	1.20	0.50	-	40-43
	S32760	1.4501	0.03	24.0-26.0	6.00-8.00	3.00-4.00	0.20-0.30	1.00	0.50-1.00	0.50-1.00	40-43
	S32906	1.4477	0.03	28.0-30.0	5.80-7.50	1.50-2.60	0.30-0.40	0.80-1.50	0.80	-	41-43
	S39274	-	0.03	24.0-26.0	6.80-8.00	2.50-3.50	0.24-0.32	1.00	0.20-0.80	1.50-2.00	40-42
	S39277	-	0.025	24.0-26.0	6.50-8.00	3.00-4.00	0.23-0.33	0.80	1.20-2.00	0.80-1.20	40-42
Hyper-Duplex- Stähle	S32707	-	0.03	26.0-29.0	5.50-9.50	4.00-5.00	0.30-0.50	1.50	1.00	-	49-50
	S33207	-	0.03	29.0-33.0	6.00-9.00	3.00-5.00	0.40-0.60	1.50	1.00	-	52-53



### Anhang 3 - Entsprechungen zwischen den Sorten nichtrostender Stähle in der internationalen Norm ISO 15510:2010

						
4460-312-00-I	X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	S31200			S22553
4480-312-60-J	X2CrNiMoN25-7-3	1.4481	S31260		SUS329J4L	S22583
4424-315-00-I	X2CrNiMoSiMnN19-5-3-2-2	1.4424	S31500			
4462-318-03-I	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	S32205, S31803	F51, F60	SUS329J3L	S22053
4162-321-01-E	X2CrMnNiN21-5.1	1.4162	S32101			
4062-322-02-U	X2CrNiN22-2	1.4062	S32202			
4362-323-04-I	X2CrNiN23-4	1.4362	S32304			S23043
4507-325-50-X	X3CrNiMoCuN26-6-3-2	1.4507	S32550			S25554
4507325-20-I	X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	S32520			
4501-327-60-I	X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	S32760			S27603
4410-327-50-E	X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	S32750			S25073
4658-327-07-U	X2CrNiMoCoN28-8-5-1	1.4658	S32707			
4477-329-06-E	X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	S32906			
4480-329-00-U	X6CrNiMo26-4-2	1.4480	S32900	329	SUS329J1	
4485-332-07-U	X2CrNiMoN31-8-4	1.4485	S33207			



## Anhang 4 - Vergleich der Spannungsrisskorrosions-Beständigkeit ungeschweißter austenitischer und Duplex-Stähle in beschleunigten Laborversuchen (Ref. 2.1)

Werkstoffsorte	Sorte EN 1.4307 (ASTM 304L) Sorte EN 1.4404 (ASTM 316L)	1.4424	1.4162 1.4062	1.4462	Super-Duplex-Stähle	Hyper-Duplex-Stähle
42 % MgCl <sub>2</sub> , Kochen, 154 °C, U-Biegeversuch						
35 % MgCl <sub>2</sub> , Kochen, 125 °C, U-Biegeversuch						
Tropfenverdampfungs- versuch, 0.1M NaCl, 120 °C, 0.9 x Y.S.						
Wick-Versuch 1500 ppm Cl als NaCl bei 100 °C						
33 % LiCl <sub>2</sub> , Kochen, 120 °C, U-Biegeversuch						
40 % CaCl <sub>2</sub> , 100 °C, 0.9 x Y.S.						
25-28 % NaCl, Kochen, 106 °C, U-Biegeversuch						
26 % NaCl, Autoklav, 155 °C, U-Biegeversuch						
26 % NaCl, Autoklav, 200 °C, U-Biegeversuch						
600 ppm Cl (NaCl) Autoklav, 300 °C, U-Biegeversuch						
100 ppm Cl (Meersalz + O <sub>2</sub> ), Autoklav, 230 °C, U-Biegeversuch						

 Riss zu erwarten

 Riss möglich

 Riss nicht zu erwarten

 unzureichende Daten



## Anhang 5 - Physikalische Eigenschaften gemäß EN 10088-1:2014-12

Stahlbezeichnung		spezifisches Gewicht	Elastizitätsmodul bei				Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20 °C und			Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	Spezifische Wärme bei 20 °C	elektrischer Widerstand bei 20 °C	Magnetisierbarkeit
EN Kurzname	EN Werkstoffnummer		kg/dm <sup>3</sup>	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	100 °C	200 °C				
				GPa				$10^{-6} \times K^{-1}$					
X2CrNiN22-2	1.4062	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	480	0.68	Ja
X2CrCuNiN23-2-2	1.4669	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	13	475	0.8	
X2CrNiN23-4	1.4362	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	7.7	205	200	190	180	13.0	14.0	14.5	15	500	0.75	
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	15.0	13	500	0.8	
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	7.7	205	200	190	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	
X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	7.7	200	194	186	180	11.5	12.0	12.5	13	470	0.8	
X2CrNiMoCoN28-8-5-1	1.4658	7.8	197	189	178	168	12.5	-	13.5	12	470	0.8	
untypische austenitisch-ferritische nichtrostende Stähle													
X2CrNiCuN23-4	1.4655	7.8	200	194	186	180	13.0	13.5	14.0	15	500	0.8	Ja



## Anhang 6 - Mechanische Eigenschaften, Flachprodukte

DIN EN 10088-2 Nichtrostende Stähle - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung

Stahlbezeichnung		Produktform	Dicke mm max.	0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ MPa min. (längs)	Zugfestigkeit $R_m$ MPa	Bruchdehnung		Kerbschlagarbeit (ISO V) $KV_2 > 10$ mm Dicke		Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion	
EN Kurzname	EN Werkstoff- nummer					$A_{80} < 3$ mm Dicke, % min. längs + quer	$A_{80} \geq 3$ mm Dicke, % min. längs + quer	J min. längs	J min. quer	im Lieferzustand	im geschweißten Zustand
Standardsorten											
X2CrNiN23-4	1.4362	C	8	450	650 bis 850	20	20	-	-	ja	ja
		H	13.5	400				100	60		
		P	75	400	630 bis 800	25	25				
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	C	8	500	700 bis 950	20	20	-	-	ja	ja
		H	13.5	460				25	25		
		P	75	460	640 to 840	25	25				
Sondersorten											
X2CrNiN22-2	1.4062	C	6.4	530	700 bis 900	20	20	-	-	ja	ja
		H	10	480	680 bis 900	30	30	80	80		
		P	75	450	650 bis 850	30	30	80	60		
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	C	8	450	700 bis 900	25	25	100	60	ja	ja
		H	13.5								
		P	75	400	680 bis 900						
X2CrNiCuN23-4	1.4655	C	8	420	600 bis 850	20	20	-	-	ja	ja
		H	13.5	400				100	60		
		P	75	400	630 bis 800	25	25				
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	C	6.4	530	700 bis 900	20	30	-	-	ja	ja
		H	10	480	680 bis 900	30	30	80	80		
		P	75	450	650 bis 850	30	30	60	60		
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	C	6.4	500	700 bis 900	20	30	-	-	ja	ja
		H	10	480	660 bis 900	30	30	100	60		
		P	75	450	650 bis 850	30	30	100	60		
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	C	6.4	550	750 bis 900	20	25	-	-	ja	ja
		H	13	550	750 bis 900	-	25	80	80		
		P	75	480	680 bis 900	-	25	60	60		

C: kaltgewalzt; H: warmgewalzt; P: Grobblech



Stahlbezeichnung		Produktform	Dicke mm max.	0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ MPa min. (längs)	Zugfestigkeit $R_m$ MPa	Bruchdehnung		Kerbschlagarbeit (ISO V) $KV_2 > 10$ mm Dicke		Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion	
EN Kurzname	EN Werkstoff- nummer					$A_{80} < 3$ mm Dicke, % min. längs + quer	$A_{80} \geq 3$ mm Dicke, % min. längs + quer	J min. längs	J min. quer	im Lieferzustand	im geschweißten Zustand
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	C	8	550	750 bis 1000	20	20	-	-	ja	ja
		H	13.5	530				100	60		
		P	75	530	730 bis 930	25	25				
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	C	8	550	750 bis 1000	20	20	-	-	ja	ja
		H	13.5	530				100	60		
		P	75	530	730 bis 930	20	20				
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	P	75	530	730 bis 930	25	25	100	60	ja	ja
X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	C	8	650	800 bis 1050	20	20	-	-	ja	ja
		H	13.5	550	750 bis 1000	20	20	100	60		
		P	75	550							

C: kaltgewalzt; H: warmgewalzt; P: Grobblech



## Anhang 7 - Mechanische Eigenschaften, Langprodukte

DIN EN 10088-3 Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung

Stahlbezeichnung		Dicke t oder Durchmesser d	Härte	0,2 %-Dehngrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Kerbschlagarbeit	Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion	
EN Kurzname	EN Werkstoffnummer	mm	HB max.	MPa min.	MPa	% min. (längs)	KV <sub>J</sub> min. (längs)	im Lieferzustand	im geschweißten Zustand
Standardsorten									
X2CrNiN23-4	1.4362	≤160	260	400	600 bis 830	25	100	ja	ja
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	≤160	270	450	650 bis 880	25	100	ja	ja
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	≤160	260	450	620 bis 880	20	85	ja	ja
Sondersorten									
X2CrNiN22-2	1.4062	≤160	290	380	650 bis 900	30	40	ja	ja
X2CrCuNiN23-2-2	1.4669	≤160	300	400	650 bis 900	25	100	ja	ja
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	≤50	260	450	700 bis 900	25	100	ja	ja
		50 < t ≤ 160	260	400	680 bis 900	25	100	ja	ja
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	≤160	290	400	650 bis 900	25	60	ja	ja
X2CrMnNiMoN21-5-3	1.4482	≤160	-	400	650 bis 900	25	60	ja	ja
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	≤160	290	450	650 bis 900	25	60	ja	ja
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	≤160	270	500	700 bis 900	25	100	ja	ja
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	≤160	290	530	730 bis 930	25	100	ja	ja
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	≤160	290	530	730 bis 930	25	100	ja	ja
X2CrNiMoN29-7-2	1.4477	≤10	310	650	800 bis 1050	25	100	ja	ja
		10 < t ≤ 160	310	550	750 bis 1000	25	100	ja	ja



## ISER

Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER) ist eine Gemeinschaftsorganisation von Unternehmen und Institutionen aus den Bereichen:

- Edelstahlherstellung,
- Edelstahlhandel und Anarbeitung
- Edelstahlverarbeitung,
- Oberflächenveredelung,
- Legierungsmittelindustrie,
- Marktforschung und Verlage für nichtrostende Stähle.

Die Aufgaben der ISER umfassen die firmenneutrale Information über Eigenschaften und Anwendungen von Edelstahl Rostfrei.

Weitere Informationen:  
[www.edelstahl-rostfrei.de](http://www.edelstahl-rostfrei.de)

Kontakt:  
[info@edelstahl-rostfrei.de](mailto:info@edelstahl-rostfrei.de)

## ISSF

Das International Stainless Steel Forum (ISSF) ist eine nicht-kommerzielle Forschungs- und Marktförderungsorganisation. Sie wurde 1996 gegründet und ist eine gemeinsame Initiative der Hersteller nichtrostender Stähle weltweit.

Vision:  
 Die Zukunft nachhaltig gestalten mit nichtrostendem Stahl

Mitglieder:  
 ISSF hat zwei Kategorien von Mitgliedern:  
 a) Unternehmen, die Hersteller von nichtrostendem Stahl sind (integrierte Werke oder Walzwerke),  
 b) fördernde Mitglieder, die regionale oder nationale Gemeinschaftsorganisationen dieser Industrie sind.

Das ISSF hat gegenwärtig 49 Mitglieder aus 27 Ländern, die den Großteil der Gesamtproduktion nichtrostender Stähle repräsentieren.

Weitere Informationen finden Sie auf der Website  
[www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org)

Kontakt:  
[issf@issf.org](mailto:issf@issf.org)

## IMPRESSUM

Dokumentation „Nichtrostende Duplex-Stähle“  
 1. deutschsprachige Auflage 2021  
 Herausgeber:  
 Informationsstelle Edelstahl Rostfrei,  
 Düsseldorf (D)

Der Inhalt der vorliegenden Dokumentation leitet sich ab aus der ISSF-Publikation „Duplex Stainless Steels“. Übersetzung und Bearbeitung der englischen Sprachfassung:  
 Thomas Pauly, Viersen (D)

Die in dieser Broschüre enthaltenen Informationen vermitteln Orientierungshilfen. Gewährleistungsansprüche können hieraus nicht abgeleitet werden. Nachdrucke bzw. Veröffentlichungen im Internet, auch auszugsweise, sind nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und mit deutlicher Quellenangabe gestattet.

[www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org)  
[www.edelstahl-rostfrei.de](http://www.edelstahl-rostfrei.de)