



# Verarbeitung austenitischer nichtrostender Stähle – Ein praktischer Leitfaden

# Verarbeitung austenitischer nichtrostender Stähle – Ein praktischer Leitfaden

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei  
1. Auflage 2021

Deutsche Bearbeitung der englischsprachigen Publikation  
*Practical Guidelines for the Fabrication of Austenitic Stainless Steels* (2. Auflage 2020)

ISBN 978-1-907470-14-1

Herausgegeben von der International Molybdenum Association (IMOA), London, Großbritannien  
www.imoa.info

Mitherausgeber:  
International Chromium Development Association (ICDA), Paris, Frankreich, www.icdacr.com und  
Nickel Institute, Toronto, Kanada, www.nickelinstitute.org

Verfasser:  
TMR Stainless, Pittsburgh, PA, USA, Nickel Institute und IMOA  
Überarbeitung der zweiten Auflage:  
Dr. James Fritz, Pittsburgh, PA, USA.  
Herausgeber der ersten Auflage:  
Curt Kovach, Pittsburgh, PA und  
Dr. John Shields, Cleveland, OH, USA.

Übersetzung:  
Thomas Pauly, Viersen, Deutschland

Graphische Umsetzung:  
circa drei, München, Deutschland

Besonderer Dank gilt der Firma Outokumpu für die Bereitstellung technischer Daten.

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.

Titelseite: Schweißarbeiten im Inneren eines Wärmetauschers aus nichtrostendem Stahl © iStock.com/MEDITERRANEAN

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Geschichte der austenitischen nichtrostenden Stähle</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Metallurgie</b>	<b>8</b>
3.1	Arten von nichtrostendem Stahl	8
3.1.1	Austenitischer nichtrostender Stahl	8
3.1.2	Ferritischer nichtrostender Stahl	9
3.1.3	Nichtrostender Duplexstahl	9
3.1.4	Martensitischer nichtrostender Stahl	9
3.1.5	Ausscheidungshärtender nichtrostender Stahl	10
3.2	Phasenbestandteile	10
3.3	Schädliche Sekundärphasen	11
3.3.1	Temperaturgrenzen stabiler Sekundärphasen	11
3.3.2	Kinetik der Sekundärphasenbildung	11
<b>4</b>	<b>Die Rolle der Legierungselemente</b>	<b>15</b>
4.1	Chrom (Cr)	15
4.2	Nickel (Ni)	15
4.3	Molybdän (Mo)	15
4.4	Kohlenstoff (C)	15
4.5	Stickstoff (N)	15
4.6	Mangan (Mn)	15
4.7	Kupfer (Cu)	16
4.8	Silizium (Si)	16
4.9	Niob (Nb) und Titan (Ti)	16
4.10	Schwefel (S) und Phosphor (P)	16
<b>5</b>	<b>Mechanische und physikalische Eigenschaften</b>	<b>17</b>
5.1	Festigkeit	17
5.2	Duktilität und Zähigkeit	19
5.3	Hochtemperaturfestigkeit	19
5.4	Physikalische Eigenschaften	20
<b>6</b>	<b>Korrosionsbeständigkeit</b>	<b>24</b>
6.1	Flächenkorrosion	24
6.2.	Lokalkorrosion	24
6.2.1	Loch- und Spaltkorrosion	24
6.2.2	Auswirkung von Sekundärphasen auf die Lokalkorrosion	26
6.2.3	Spannungsrissskorrosion	26
6.3	Interkristalline Korrosion/Korrosion durch Sensibilisierung	28
6.3.1	Sensibilisierung beim Schweißen/Kornzerfall	28
6.3.2	Messerlinienkorrosion	29
6.4	Galvanische Korrosion	29
6.5	Einfluss der Verarbeitung auf die Korrosionsbeständigkeit	31
<b>7</b>	<b>Verarbeitung – Oberflächen glatt und sauber halten</b>	<b>32</b>
7.1	Anlieferung und Lagerung	32
7.2	Schutzfolien	33
7.3	Vermeidung von Fremdeisenkontamination	34

<b>8</b>	<b>Warm- und Kaltumformung</b>	<b>35</b>	<b>13</b>	<b>Mechanische Verbindungstechniken</b>	<b>68</b>
8.1	Warmumformung	35	13.1	Verbindungstechniken	68
8.2	Halbwarmumformung	36	13.1.1	Schrauben	68
8.3	Kaltumformung	36	13.1.2	Nieten	68
8.3.1	Biegen	37	13.1.3	Clinchen	68
8.3.2	Rollformen	38	13.1.4	Falzen	69
8.3.3	(Streck-)Ziehen	39	13.1.5	Kleben	70
8.3.4	Drücken	40	13.2	Korrosionsaspekte mechanischer Verbindungen	70
8.3.5	Kaltstauchen	40	13.2.1	Spaltkorrosion	70
			13.2.2	Galvanische Korrosion	71
<b>9</b>	<b>Schneiden</b>	<b>41</b>	<b>14</b>	<b>Oberflächenausführungen</b>	<b>72</b>
9.1	Sägen	41	14.1	Oberflächen und technische Leistungsmerkmale	72
9.1.1	Bügelsägen	41	14.2	Werkseitige Oberflächen	73
9.1.2	Bandsägen	41	14.2.1	Grobblech	73
9.2	Schneiden mittels Trennscheibe	41	14.2.2	Bleche und Bänder	73
9.3	Scheren	42	14.3	Mechanische Oberflächenbearbeitung	74
9.3.1	Anforderungen an die Maschinen	42	14.3.1	Sonderoberflächen	76
9.3.2	Abgescherte Kanten	42	14.3.2	Schwabbeln	77
9.3.3	Stanzen und Lochen	43	14.3.3	Schleifmittel für das mechanische Polieren	77
9.4	Wasserstrahlschneiden	44	14.4	Mustergewalzte und geprägte Oberflächen	78
9.5	Plasmaschneiden	45	14.5	Gefärbter nichtrostender Stahl	78
9.6	Laserschneiden	45	14.6	Elektropolieren	80
			14.7	Wiederherstellung und Schutz der Oberfläche nach der Verarbeitung	80
<b>10</b>	<b>Spanende Bearbeitung</b>	<b>46</b>	<b>15</b>	<b>Abschließende Reinigung</b>	<b>81</b>
10.1	Allgemeine Hinweise	46	15.1	Häufig vorkommende Beschädigungen und Oberflächenverunreinigungen	81
10.2	Spanbarkeitsindex unterschiedlicher Sorten nichtrostenden Stahls	47	15.1.1	Fremdeisenkontamination	81
10.3	Drehen	48	15.1.2	Organische Verunreinigungen	81
10.4	Planfräsen mit Hartmetall	48	15.1.3	Verzunderung durch Glühen und Schweißen	82
10.5	Spiralbohren mit Hochleistungs-Schnellschnittstahl-(HSS-)Bohrern	49	15.1.4	Sonstige Fehler	82
			15.2	Abschließende Nachbehandlung	83
<b>11</b>	<b>Wärmebehandlung – Lösungs- und Spannungsarmglühen</b>	<b>51</b>	15.2.1	Sandstrahlen	83
11.1	Lösungsglühen	51	15.2.2	Glasperlenstrahlen	83
11.1.1	Vorbereitung	51	15.2.3	Schleifen und Polieren	83
11.1.2	Temperatur	52	15.2.4	Bürsten und Stahlwolle aus nichtrostendem Stahl	83
11.1.3	Behandlungsdauer	52	15.2.5	Entfettung	84
11.1.4	Glühatmosphäre	53	15.2.6	Säurebeizen	84
11.1.5	Abkühlen	53	15.2.7	Passivierung	85
11.1.6	Nachbehandlung	53	15.2.8	Elektropolieren	85
11.2	Spannungsarmglühen	53	15.3	Einfluss der Reinigungsmethode auf die Korrosionsbeständigkeit	86
<b>12</b>	<b>Schweißen, Hart- und Weichlöten</b>	<b>55</b>		<b>Quellentexte</b>	<b>87</b>
12.1	Schweißen	55		<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>89</b>
12.1.1	Einfluss der physikalischen Eigenschaften auf das Schweißen	55		<b>ASTM Normen</b>	<b>90</b>
12.1.2	Nahtkanten und Ausrichtung	56		<b>DIN EN-Normen</b>	<b>92</b>
12.1.3	Schweißzusatzwerkstoffe	57		<b>Eingetragene Warenzeichen und Handelsnamen</b>	<b>93</b>
12.1.4	Schutzgas	57			
12.1.5	Schweißverfahren	58			
12.1.6	Artverschiedene Schweißungen	62			
12.1.7	Qualitätsaspekte der Schweißung	63			
12.2	Hart- und Weichlöten	66			
12.2.1	Hartlöten	66			
12.2.2	Weichlöten	67			

# 1 Einführung

Austenitische nichtrostende Stähle stehen in einer Vielzahl von Sorten zur Verfügung. Ihre Einsatzfelder reichen vom Innenausbau, z. B. Wandpaneelen und Geländern, bis hin zu Anwendungen unter korrosiven Bedingungen in chemischer Industrie und Energiewirtschaft, etwa in Rohrleitungen und Behältern. Austenitische Standardsorten wie die Stähle vom Typ AISI 304 (EN 1.4301, 1.4307, 1.4541) und Typ AISI 316 (EN 1.4401, 1.4404, 1.4571) sind dabei der Menge nach die wichtigsten Vertreter. Allerdings stellen auch höherlegierte Sorten ihre Kosteneffizienz in unterschiedlichsten anspruchsvollen Anwendungen unter Beweis. Sie werden als austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle bezeichnet. Erzielt wird ihre Beanspruchbarkeit durch – verglichen mit Standardsorten – erhöhte Legierungsgehalte an Chrom (Cr), Molybdän (Mo), Nickel (Ni) und Stickstoff (N). Hierdurch wird allerdings auch die Verarbeitung komplexer als bei Standardsorten. Anwender, Konstrukteure und Verarbeiter müssen über vertiefte Kenntnisse ihrer Eigenschaften verfügen, um sie sachgerecht einzusetzen und zu verarbeiten. Die vorliegende Broschüre vermittelt grundlegende Informationen über derartige nichtrostende Hochleistungsstähle und vergleicht sie mit Standardsorten. Das Hauptaugenmerk liegt darauf, die Verarbeitungseigenschaften der beiden Gruppen einander gegenüberzustellen und Gemeinsamkeiten ebenso wie Unterschiede herauszuarbeiten. Die Informationen sollen diejenigen, die mit der Verarbeitung von Standard- und Hochleistungsarten befasst sind, darin unterstützen, qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen, welche die gestellten Anforderungen unter praktischen Einsatzbedingungen zuverlässig erfüllen.



Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle in der Rauchgasreinigung © Outokumpu

## 2 Geschichte der austenitischen nichtrostenden Stähle

Nichtrostende Stähle wurden als Ergebnis von Pionierleistungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts in England und Deutschland auf den Markt gebracht. In dem darauffolgenden halben Jahrhundert entwickelten die Hersteller eine weitverzweigte Familie von nichtrostenden Stählen, die in den Bereichen Chemie, Energie, Nahrungsmittelproduktion und anderen Branchen zur Anwendung kamen. Die moderne Phase nichtrostender Stähle begann in den 1970er Jahren mit der Einführung neuer sekundärmetallurgischer Verfahren und Gießtechniken. Hierdurch ließen sich sowohl die bereits bestehenden Standardsorten verbessern als auch neue, leistungsfähigere Sorten herstellen – darunter auch austenitische Hochleistungsstähle.

Die neuen Stahlerzeugungstechniken umfassten das AOD- (*argon oxygen decarburization*) und das VOD- (*vacuum oxygen decarburization*) Verfahren. Sie schufen wirtschaftliche Möglichkeiten, äußerst geringe Kohlenstoffgehalte

und hohe Ausbringung zu erzielen sowie die Legierungszusammensetzung (insbesondere den Stickstoffgehalt) präzise zu steuern. Das Elektroschlack-Umschmelzen (ESU), das in einigen Fällen als alternatives oder zusätzliches Verfahren angewandt wird, ermöglicht eine noch bessere Kontrolle der metallurgischen Reinheit sowie ein homogeneres Gefüge mit weniger Einschlüssen. Der Strangguss erhöhte die Effizienz und senkt die Herstellungskosten weiter.

Diese Fortschritte reduzierten die Kosten der niedrig-kohlenstoffhaltigen Standardsorten wie AISI 304L (EN 1.4307) und 316L (1.4404), die bei geschweißten Bauteilen eine höhere Korrosionsbeständigkeit ermöglichten. Der erste austenitische Hochleistungsstahl, bei dem diese neuen Techniken eingesetzt wurde, war die Sorte AISI 904L (UNS N08904, EN 1.4539) eines schwedischen Herstellers. Sie weist einen äußerst geringen Kohlenstoffgehalt auf. So entstand aus einer bestehenden Gusslegierung,

die besonders beständig gegen starke reduzierende Säuren war, eine schweißbare Knetlegierung. 1973 führte ein US-amerikanischer Hersteller den ersten vollständig meerwasserbeständigen austenitischen nichtrostenden Stahl ein, AL-6X® (UNS N08366) mit 6 % Mo und sehr niedrigem Kohlenstoffgehalt. Er diente zur Herstellung von schweißbaren dünnen Blech- und Rohrprodukten. Bis zur Mitte der 1970er Jahre führten Fortschritte in Einsatz und Steuerung von Stickstoff zu verbesserten Sorten mit 6 % Mo, die auch in dicken Abmessungen schweißgeeignet waren und keine schädlichen intermetallischen Phasen bildeten, welche die Lochkorrosionsbeständigkeit herabgesetzt hätten. Eine Liste der UNS-Bezeichnungen dieser stickstofflegierten Sorten mit 6 % Mo findet sich auf Seite 93.

Der steigende Bedarf an wirtschaftlichen Hochleistungssorten für die wachsenden Bereiche Umweltschutz und Energieerzeugung führte in den 1990er Jahren zu noch höheren Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle. Es entstanden drei Sorten mit ca. 7 % Mo und vergleichsweise hohem Stickstoffgehalt, die in aggressivem gechlortem Wasser extrem beständig gegen Lochkorrosion sind: UNS S32654 (EN 1.4652), UNS S31266 (EN 1.4659) und UNS S31277. Ihre Leistungsfähigkeit nähert sich der einiger hoch korrosionsbeständiger Nickellegierungen – zu deutlich niedrigeren Kosten. Eine Liste der mit 7 % Mo legierten Sorten sowie deren Handelsnamen findet sich auf S. 93.

**Tabelle 1** zeigt die chemische Zusammensetzung der gängigeren austenitischen nichtrostenden Stähle der 300er- und 200er-Serie. Nichtrostende Hochleistungsstähle sind in **Tabelle 2** dargestellt. Sie weisen Gehalte an Chrom, Nickel und Molybdän auf, die deutlich über denen der Standardsorten mit 18 % Cr und ca. 8 % Ni liegen. Viele von ihnen enthalten auch Legierungszusätze von Stickstoff.



Rohrboden eines Wärmetauschers während der Verarbeitung © Sandvik

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung\* (Gewichtsprozent) und Wirksumme (PREN) einiger gebräuchlicher austenitischer Knetlegierungen der 300er- und 200er-Serie\*\*

AISI	UNS	EN	C	Mn	N	Cr	Ni	Mo	Cu	Sonstige	PREN***
<b>Repräsentative Standardsorten – 300er-Serie</b>											
304	S30400	1.4301	0,07	2,00	0,10	17,5 19,5	8,0 10,5	–	–	–	18–20
304L	S30403	1.4307	0,03	2,00	0,10	17,5 19,5	8,0 12,0	–	–	–	18–21
321	S32100	1.4541	0,08	2,00	0,10	17,0 19,0	9,0 12,0	–	–	Ti 5x(C+N)min 0,70 max	18–21
347	S34700	1.4550	0,08	2,00	0,10	17,0 19,0	9,0 13,0	–	–	Nb 10xC min 1,00 max	18–21
316	S31600	1.4401	0,08	2,00	0,10	16,0 18,0	10,0 14,0	2,00 3,00	–	–	24–26
316L	S31603	1.4404	0,03	2,00	0,10	16,0 18,0	10,0 14,0	2,00 3,00	–	–	24–26
–	–	1.4435	0,03	2,00	0,11	17,0 19,0	12,5 15,0	2,50 3,00	–	–	27–29
317L	S31703	1.4438	0,03	2,00	0,10	18,0 20,0	11,0 15,0	3,00 4,00	–	–	29–30
<b>Repräsentative Standardsorten – 200er-Serie</b>											
201	S20100	1.4372	0,15	5,5 7,5	0,25	16,0 18,0	3,5 5,5	–	–	–	17–20
201L	S20103	–	0,03	5,5 7,5	0,25	16,0 18,0	3,5 5,5	–	–	–	17–20
201LN	S20153	–	0,03	6,4 7,5	0,10 0,25	16,0 17,5	4,0 5,0	–	1,0	–	17–20

Anmerkungen:

\* gemäß ASTM (soweit verfügbar) für Grobblech, Feinblech und Band oder nach Hersteller-Datenblättern. Eine vollständige Darstellung der Anforderungen an die Zusammensetzung sind diesen Unterlagen zu entnehmen.

\*\* Maximalgehalt, sofern nicht als Bereich oder Mindestgehalt gekennzeichnet. Die Zusammensetzungen gemäß ASTM und EN können leicht voneinander abweichen.

\*\*\* Wirksumme nach der Formel  $PREN = \% Cr + 3.3 (\% Mo + 0,5 \% W) + 16 (\% N)$  auf Basis der typischen Legierungszusammensetzung der jeweiligen Sorte

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung\* (Gewichtsprozent) und Wirksumme (PREN) einiger austenitischer Hochleistungsstähle\*\*

AISI	UNS	EN	C	Mn	N	Cr	Ni	Mo	Cu	Sonstige	PREN***
Alloy 20	N08020	2.4660	0,07	2,00	–	19,0 21,0	32,0 38,0	2,00 3,00	3,00 4,00	(Nb+Ta): 8xC min, 1,00 max	25–27
317LM	S31725	–	0,03	2,00	0,20	18,0 20,0	13,2 17,5	4,00 5,00	–	–	30–32
317LMN	S31726	1.4439	0,03	2,00	0,10 0,20	17,0 20,0	13,5 17,5	4,00 5,00	–	–	31–33
904L	N08904	1.4539	0,02	2,00	0,10	19,0 23,0	23,0 28,0	4,00 5,00	1,00 2,00	–	33–35
–	S31727	–	0,03	1,00	0,15 0,21	17,5 19,0	14,5 16,5	3,80 4,50	2,80 4,00	–	33–35
–	N08028	1.4563	0,02	2,00	0,15 0,25	26,0 28,0	30,0 34,0	3,00 4,00	–	–	38–40
–	S34565	1.4565	0,03	5,00 7,00	0,40 0,60	23,0 25,0	16,0 18,0	4,00 5,00	–	–	45–47
–	N08026	–	0,03	1,00	0,10 0,16	22,0 26,0	33,0 37,2	5,00 6,70	2,00 4,00	–	41–43
–	S32053	–	0,03	1,00	0,17 0,22	22,0 24,0	24,0 26,0	5,00 6,00	–	–	41–43
–	N08926	1.4529	0,02	2,00	0,15 0,25	19,0 21,0	24,0 26,0	6,00 7,00	0,50 1,50	–	41–43
–	S31254	1.4547	0,02	1,00	0,18 0,22	19,5 20,5	17,5 18,5	6,00 6,50	–	–	41–43
–	N08367	1.4529	0,03	2,00	0,18 0,25	20,0 22,0	23,5 25,5	6,00 7,00	0,75	–	43–45
–	S31266	1.4659	0,03	2,00 4,00	0,35 0,60	23,0 25,0	21,0 24,0	5,20 6,20	1,00 2,50	W: 1,5–2,5	48–59
–	S31277	–	0,02	3,00	0,30 0,40	20,5 23,0	26,0 28,0	6,50 8,00	0,50 1,50	–	47–49
–	N08031	1.4562	0,02	2,00	0,15 0,25	26,0 28,0	30,0 32,0	6,00 7,00	1,00 1,40	–	48–50
–	N08354	–	0,03	1,00	0,17 0,24	22,0 24,0	34,0 36,0	7,00 8,00	–	–	48–50
–	N08935	–	0,03	1,20	0,25 0,36	26,0 28,0	34,0 36,0	6,10 7,10	0,4	–	50–53
–	S32654	1.4652	0,02	2,00 4,00	0,45 0,55	24,0 26,0	21,0 23,0	7,00 8,00	0,30 0,60	–	54–56

Anmerkungen:

\* gemäß ASTM (soweit verfügbar) für Grobblech, Feinblech und Band oder nach Hersteller-Datenblättern. Eine vollständige Darstellung der Anforderungen an die Zusammensetzung sind diesen Unterlagen zu entnehmen.

\*\* Maximalgehalt, sofern nicht als Bereich oder Mindestgehalt gekennzeichnet. Die Zusammensetzungen gemäß ASTM und EN können leicht voneinander abweichen.

\*\*\* Wirksumme nach der Formel  $PREN = \% Cr + 3.3 (\% Mo + 0,5 \% W) + 16 (\% N)$  auf Basis der typischen Legierungszusammensetzung der jeweiligen Sorte

# 3 Metallurgie

## 3.1 Arten von nichtrostendem Stahl

Nichtrostende Stähle sind Eisenlegierungen, die mindestens 10,5 % Cr enthalten und im Wesentlichen wegen ihrer Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperatureigenschaften verwendet werden. Bei diesem Chromgehalt bildet sich ein chromreiches Oberflächenoxid, das als Passivfilm oder -schicht bezeichnet wird und den Werkstoff – im Unterschied zu un- und niedriglegiertem Stahl – davor schützt, zu rosten. Es gibt eine Vielzahl von nichtrostenden Stählen; ihnen ist gemeinsam, dass sie alle diese Mindestanforderung an den Chromgehalt erfüllen.

Die nichtrostenden Stähle gliedern sich in fünf Haupt-Kategorien: austenitisch, ferritisch, Duplex (gemischt austenitisch/ferritisch), martensitisch und ausscheidungshärtend. Diese Kategorien beziehen sich auf die Kristallstruktur des Stahls (d. h. die Anordnung der Atome darin) und dessen Wärmebehandlung. Gruppen von Kristallen in einem Metall, die dieselbe Kristallstruktur haben, werden als Phasen bezeichnet. Die drei wesentlichen in nichtrostendem Stahl vorliegenden Phasen sind Austenit, Ferrit und Martensit. Die Mikrostruktur eines nichtrostenden Stahls kann mittels metallographischer Standardverfahren und eines optischen metallographischen Mikroskops festgestellt und quantifiziert werden.

Austenitische nichtrostende Stähle weisen eine Mikrostruktur auf, die hauptsächlich die Austenitphase enthält. Diese hat eine flächenzentrierte (*face-centered cubic*, FCC-)Kristallstruktur, d. h., die Haupt-Atome befinden sich an den Ecken und mittig auf den Seitenflächen eines kubischen Gitters. Im Unterschied dazu hat die ferritische Phase eine raumzentrierte (*body-centered cubic*, BCC-)Kristallstruktur, die Atome sind also an den Ecken sowie in der Mitte des kubischen Gitters angeordnet. Die martensitische Phase hat eine deutlich gestreckte quaderförmige raumzentrierte (*body-centered tetragonal*, BCT-) Struktur (**Abbildung 1**).

### 3.1.1 Austenitischer nichtrostender Stahl

Die Familie der austenitischen nichtrostenden Stähle ist im Wesentlichen unmagnetisch, weist eine mittlere Dehngrenze, eine hohe Kaltverfestigungsrate, hohe Zugfestigkeit, gute Duktilität und ausgezeichnete Zähigkeit bei niedrigen Temperaturen auf. Anders als bei anderen nichtrostenden Stählen nimmt bei den austenitischen Sorten die Zähigkeit mit sinkender Temperatur nur allmählich ab (**Abbildung 2**). Das Fehlen einer deutlichen Übergangstemperatur (*ductile-to-brittle transition temperature*, DBTT) ist der Grund für die besondere Eignung austenitischer Sorten für die Kryotechnik.

Austenitische nichtrostende Stähle sind gut schweißbar und lassen sich leicht in komplexe Formen bringen. Diese Gruppe nichtrostender Stähle kann nicht durch Wärmebehandlung gehärtet oder verfestigt werden; eine Verfestigung durch Kaltumformung bzw. -verfestigung ist dagegen sehr wohl möglich (siehe ASTM A666). Ein eventueller Nachteil der austenitischen Stähle, insbesondere der Standardsorten, im Vergleich zu ferritischen und Duplex-Stählen ist deren Anfälligkeit für chloridinduzierte Spannungsrissskorrosion.

Die austenitischen Standardsorten (der 300er-Serie) enthalten üblicherweise zwischen 8 und 11 % Nickel und 16 bis 20 % Chrom (siehe Tabelle 1). Das Gefüge austenitischer Standardstähle besteht im Wesentlichen aus austenitischen Körnern mit einem geringen Anteil (meist 1 bis 5 %) von Deltaferrit (**Abbildung 3**). Der Ferritanteil macht diese Sorten leicht ferromagnetisch.

Die nichtrostenden Stähle der 200er-Serie enthalten weniger Nickel, aber mehr Mangan und Stickstoff als jene der 300er-Serie. Diese Untergruppe besitzt eine höhere Ausgangsfestigkeit und eine ausgeprägtere Kaltverfestigungsneigung als die Sorten der 300er-Serie. Wegen ihres niedrigeren Nickelgehalts gelten 200er-Stähle häufig als preisgünstige Alternative zu den 300er-Sorten.

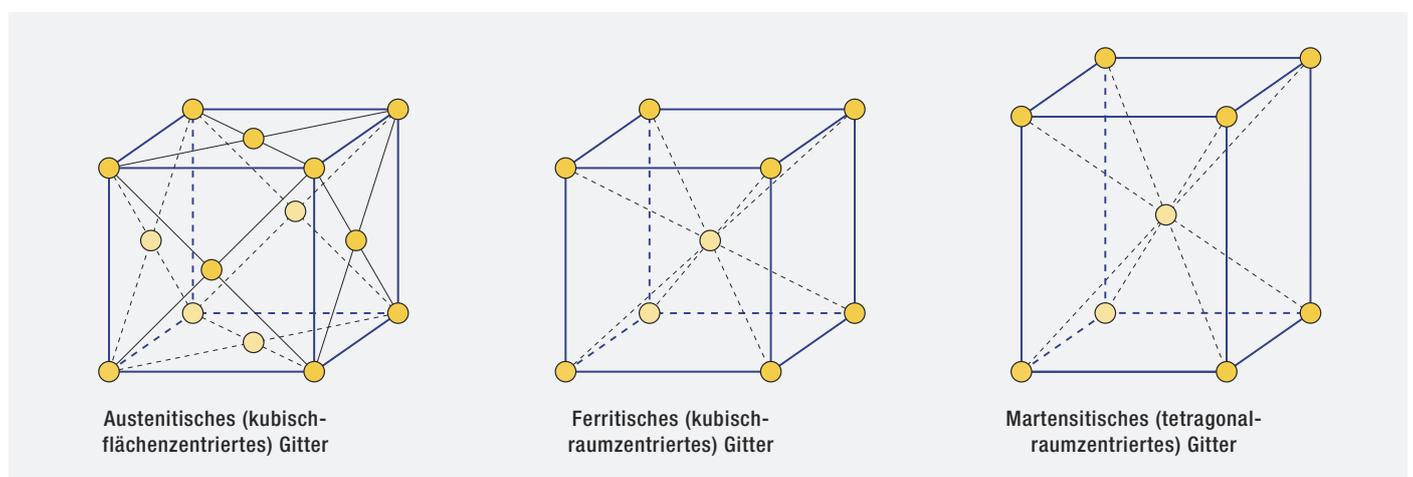


Abbildung 1: Kristallstruktur der austenitischen Phase mit ihrem flächenzentrierten (FCC-)Gitter, der ferritischen Phase mit raumzentriertem (BCC-)Gitter und der martensitischen Phase mit raumzentriertem tetragonalem (BCT-)Gitter

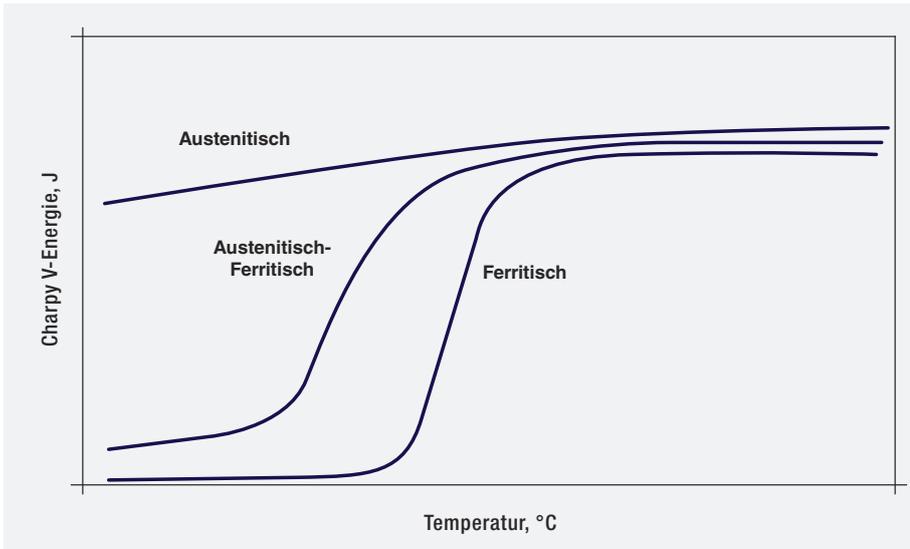


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Übergangstemperatur von austenitischen, ferritischen und (austenitisch-ferritischen) nichtrostenden Duplexstählen (1); die tatsächliche Übergangstemperatur hängt von Werkstoffdicke, chemischer Zusammensetzung und Korngröße ab. Bei ferritischen nichtrostenden Stählen liegt die Übergangstemperatur in der Regel im Bereich von 0 bis -25 °C (von 32 bis -13 °F).

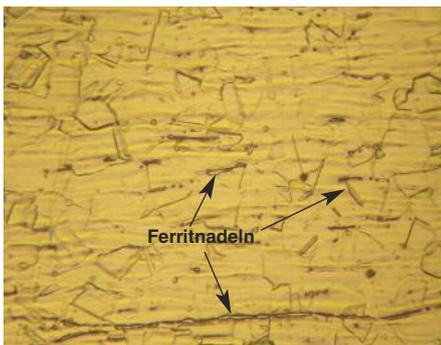


Abbildung 3: Gefüge eines typischen Stahls AISI 304L (EN 1.4307) als Knetlegierung, bestehend aus austenitischen Körnern mit einzelnen Ferritnadeln. © TMR Stainless

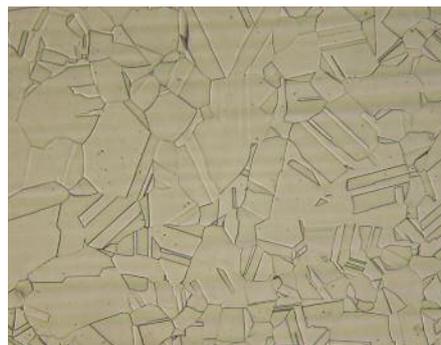


Abbildung 4: Gefüge eines austenitischen Hochleistungsstahls mit 6 % Mo, bestehend ausschließlich aus austenitischen Körnern. © TMR Stainless

Austenitische Hochleistungsstähle weisen eine vollaustenitische Gefügestruktur auf und sind nicht ferromagnetisch (**Abbildung 4**). Im Vergleich zu austenitischen Standardsorten haben sie höhere Gehalte an Nickel, Chrom, Molybdän und üblicherweise auch Stickstoff. Diese Sorten sind darauf ausgelegt, unter aggressiven Bedingungen besonders korrosionsbeständig zu sein, z. B. in starken Säuren, Laugen und chloridreichen Medien wie Brackwasser, Meerwasser oder Sole. Für die Gruppe der Hochleistungsstähle gilt, dass sie in der Tendenz auch höhere Festigkeit und Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion aufweisen als Standardsorten.

### 3.1.2 Ferritischer nichtrostender Stahl

Ferritische nichtrostende Stähle besitzen eine Gefügestruktur aus ferritischer Phase. Allgemein enthalten ferritische Sorten sehr wenig oder gar kein Nickel, sind ferromagnetisch und lassen sich nicht durch Wärmebehandlung härten. Diese Gruppe nichtrostender Stähle weist ähnliche ferromagnetische Eigenschaften auf wie unlegierter Stahl. Im Allgemeinen haben ferritische nichtrostende Stähle eine hohe Festigkeit und sind deutlich beständiger gegen Spannungsrisskorrosion als die austenitischen Sorten der 300er-Serie. Allerdings lassen sie sich auch weniger gut

umformen und schweißen. Ihre Zähigkeit ist gegenüber austenitischen Sorten ebenfalls geringer, zudem nimmt sie mit zunehmender Werkstoffdicke ab. Sie lassen darüber hinaus mit absinkender Temperatur einen ausgeprägten Übergang von duktilem zu sprödem Verhalten erkennen (**Abbildung 2**). Aufgrund dieser Beschränkungen ist ihre Anwendung i. d. R. auf Produkte mit geringer Dicke wie Blech, Band und dünnwandige Rohre begrenzt.

### 3.1.3 Nichtrostender Duplexstahl

Nichtrostende Duplexstähle enthalten annähernd gleiche Anteile von austenitischer und ferritischer Phase und bieten zahlreiche Eigenschaften, die zwischen den austenitischen und ferritischen Sorten liegen. Obwohl sie nicht durch Wärmebehandlung gehärtet werden können, haben sie üblicherweise eine doppelt so hohe Dehngrenze wie austenitische Standardsorten und ihre magnetische Anziehung ist proportional zum Ferritanteil. Das zweiphasige Gefüge verleiht ihnen gegenüber austenitischen Standardsorten auch eine größere Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion.

### 3.1.4 Martensitischer nichtrostender Stahl

Die Familie der martensitischen nichtrostenden Stähle hat ein Gefüge, das hauptsächlich aus martensitischer Phase sowie evtl. geringen Anteilen von Sekundärphasen wie Ferrit, Austenit und Carbiden besteht. Sie ist ferromagnetisch, ähnlich wie unlegierter Stahl. Die endgültige Härte hängt von der jeweiligen Wärmebehandlung ab. Martensitische nichtrostende Stähle weisen hohe Festigkeit, gute Verschleißbeständigkeit, geringe Zähigkeit und eine relativ hohe Übergangstemperatur auf. Sie sind sehr schwierig zu schweißen und erfordern in der Regel eine anschließende Wärmebehandlung. Aus diesem Grund ist ihre Anwendung zumeist auf ungeschweißte Teile beschränkt. Martensitische Sorten haben keine sonderlich hohen Chromgehalte und ein Teil des Chroms ist in Carbidausscheidungen gebunden. Deshalb ist ihre Korrosionsbeständigkeit vergleichsweise gering und liegt zumeist unter jener der austenitischen Standardsorten AISI 304/304L (EN 1.4301/1.4307).

Wegen ihrer begrenzten Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit werden martensitische nichtrostende Stähle dort angewandt, wo hohe Festigkeit und Härte erforderlich sind, z. B. für Schneidwaren, Befestigungsmittel und Wellen.

### 3.1.5 Ausscheidungshärtender nichtrostender Stahl

Auch ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle können durch Wärmebehandlung gehärtet werden. Die Besonderheit dieser Familie nichtrostender Stähle liegt darin, dass ihr Festigkeitszugewinn zum Teil auf einem Ausscheidungsvorgang beruht. Die besondere Wärmebehandlung führt zu feinen intermetallischen Ausscheidungen, die eine erhöhte Festigkeit bewirken. Wegen ihres höheren Chromgehalts haben ausscheidungshärtende Sorten eine höhere Korrosionsbeständigkeit als martensitische und finden dort Verwendung, wo sowohl hohe Festigkeit als auch größere Korrosionsbeständigkeit erforderlich sind. Gängige Anwendungen liegen in Federn, Befestigungselementen, Wellen, Getrieben und Faltenbälgen.

## 3.2 Phasenbestandteile

Die Legierungselemente beeinflussen die Verhältnisse der Gleichgewichtsphasen und üben eine starke Wirkung auf die Stabilität der austenitischen, ferritischen und martensitischen Phase aus. Die als Legierungszusätze verwendeten Elemente können unterteilt werden in Ferrit- und Austenitbildner. Das Phasengleichgewicht hängt von der chemischen Zusammensetzung des Stahls, der Glüh-temperatur und der Abkühlungsrate ab. Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit, Festigkeit, Zähigkeit, Schweißbarkeit und Umformbarkeit können durch das Phasengleichgewicht beeinflusst werden.

Ferritbildende Elemente fördern die Bildung von Ferrit, austenitbildende jene von Austenit. **Tabelle 3** zeigt die wichtigsten ferrit- und austenitbildenden Elemente. Das gewünschte Phasengleichgewicht hängt von der Werkstoffsorte und ihrer beabsichtigten Verwendung ab. Die meisten austenitischen Standard-sorten enthalten im lösungsgeglühten Zustand einen geringen Anteil von Ferrit, der die Schweißbarkeit und die Duktilität bei hohen Temperaturen verbessert.

Tabelle 3: Ferrit- und austenitbildende Legierungszusätze

Ferritbildner	Austenitbildner
Chrom	Nickel
Molybdän	Stickstoff
Silizium	Kohlenstoff
Niob	Mangan
Aluminium	Kupfer
Titan	Kobalt
Wolfram	

Ist der Ferritanteil allerdings zu hoch, kann er andere Eigenschaften wie die Korrosionsbeständigkeit oder die Zähigkeit ungünstig beeinflussen. Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle sind so beschaffen, dass sie im lösungsgeglühten Zustand vollständig austenitisch sind.

Die Steuerung der Phasenbestandteile und damit der Eigenschaften eines

Stahls erfordert ein genaues Austarieren der Legierungselemente. Das Schaeffler-Diagramm (**Abbildung 5**) ist ein Hilfsmittel, das den Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung und den zu erwartenden Phasen zum Zeitpunkt der Erstarrung darstellt, z. B. in einer Schweißnaht. Es ermöglicht dem Anwender, das Phasengleichgewicht aus der jeweiligen chemischen Zusammensetzung abzuleiten. Diese wird dazu benutzt, das jeweilige „Nickel-“ bzw. „Chrom-Äquivalent“ zu berechnen, das dann im Diagramm abgetragen wird. Die Gleichungen für diese im Schaeffler-Diagramm benutzten Parameter lauten:

$$\text{Ni-Äquivalent} = \% \text{ Ni} + 30 \% \text{ C} + 0,5 \% \text{ Mn} + 30 \% \text{ N}$$

$$\text{Cr-Äquivalent} = \% \text{ Cr} + \% \text{ Mo} + 1,5 \% \text{ Si} + 0,5 \% \text{ Nb}$$

Ein typischer austenitischer nichtrostender Hochleistungsstahl mit rund 20 % Cr, 6 % Ni und 0,2 % N liegt im Diagramm bei einem Nickeläquivalent von rund 24 und einem Chromäquivalent von etwa 26 und damit innerhalb der reinen Austenit-Zone nahe der Linie „kein Ferrit“. Zum Vergleich: Eine Standard-sorte wie AISI 304 (EN 1.4301) hat eine

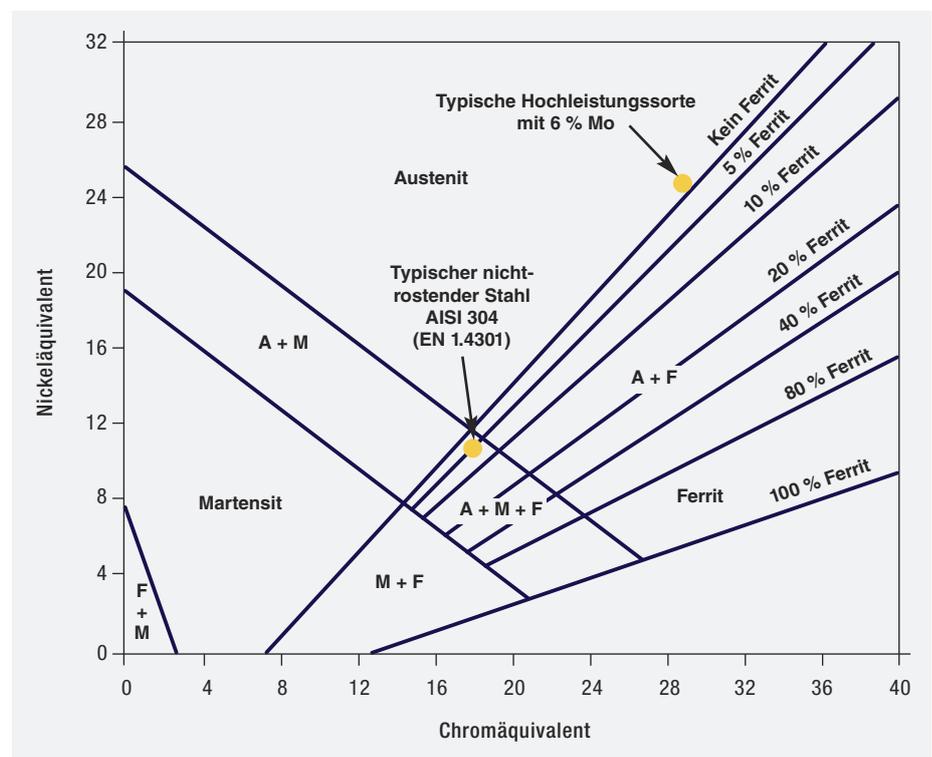


Abbildung 5: Das Schaeffler-Diagramm zeigt den Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die Menge von Ferrit und Austenit im Mikrogefüge des Werkstoffs im Ausgangszustand (2).

Zusammensetzung, die sich in der zweiphasigen Zone von Austenit und Ferrit (A+F) situiert, was einem geringen Ferritanteil entspricht (Abbildung 5). Ferritische Sorten liegen in der Ferritzone des Diagramms und Duplexstähle in der zweiphasigen Zone (A+F).

### 3.3 Schädliche Sekundärphasen

Das ideale Mikrogefüge austenitischer nichtrostender Hochleistungsstähle besteht in einer homogenen Struktur aus austenitischen Körnern ohne jegliche Sekundärphasen. Das gilt auch für austenitische Standardsorten, allerdings ist ein geringer Ferritanteil möglich. Gleichwohl entsprechen diese Idealzustände zumeist nicht der Gleichgewichtsbedingung für austenitische nichtrostende Stähle. Weitere Sekundärphasen können auftreten, wenn nichtrostende Stähle hohen Temperaturen ausgesetzt werden. Sie sind im Allgemeinen den Eigenschaften abträglich. Stahlhersteller und -verarbeiter müssen die Parameter der Wärmebehandlung, des Schweißens und anderer Verarbeitungsschritte genau steuern, um die Bildung derartiger schädlicher Sekundärphasen zu verhindern. Alle austenitischen nichtrostenden Stähle zeigen eine gewisse Neigung zur Bildung von Sekundärphasen. Austenitische Hochleistungsstähle sind wegen ihres hohen Legierungsmittelgehalts allerdings dafür besonders anfällig. Daher ist ein vertieftes Verständnis der Bildung und Steuerung dieser Phasen ausschlaggebend für den sachgerechten Einsatz austenitischer nichtrostender Hochleistungsstähle.

Welche Sekundärphase sich bildet, hängt von der Zusammensetzung des nichtrostenden Stahls und der Historie seiner Wärmebehandlung ab. Bei der 200er- und 300er-Serie richtet sich das Hauptaugenmerk auf Chromcarbid ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ). Im Temperaturbereich von 425–900 °C (800–1650 °F) können sich an den Grenzen des austenitischen Korns Chromcarbid bilden. Ausgeprägte Ausscheidungen bilden ein durchgängiges Geflecht von Carbiden entlang der Korngrenzen. Damit sich Chromcarbid bilden können, müssen sich Chrom und Kohlenstoff aus dem nichtrostenden Stahl an den Korngrenzen miteinander verbinden (wo günstigere energetische Bedingungen für Keimbildung und

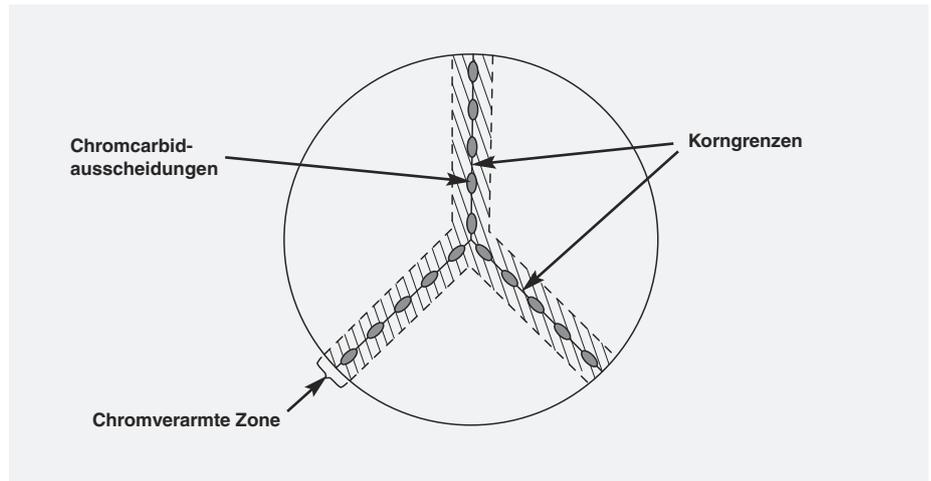


Abbildung 6: Schematische Darstellung sensibilisierter Korngrenzen bei einem austenitischen nichtrostenden Stahl (3)

Wachstum von Chromausscheidungen herrschen). Hierdurch liegt im Bereich entlang der Korngrenzen der Chromgehalt und damit auch die Korrosionsbeständigkeit niedriger als im Ausgangswerkstoff. Dieser „Sensibilisierung“ genannte Vorgang ist bekannt und gut erforscht. **Abbildung 6** zeigt die schematische Darstellung eines sensibilisierten Mikrogefüges mit Ausscheidungen an den Korngrenzen und einer entsprechenden chromverarmten Zone.

Ähnliche Vorgänge spielen sich bei anderen Sekundärphasen ab, allerdings unterscheiden sich Temperatur und Zeit. Zwei wichtige Phasen, die bei austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen auftreten können, sind die Sigma- und die Chi-Phase. Diese werden als intermetallische Verbindungen bezeichnet, weil sie eher chemischen Verbindungen als Metallen ähneln. Sie enthalten neben Eisen sehr hohe Chrom- und/oder Molybdänanteile, sind spröde und können die Korrosionsbeständigkeit in der angrenzenden chrom- und molybdänverarmten Zone herabsetzen. Die nachstehenden Abschnitte sind der Frage gewidmet, wie sie entstehen und wie sie sich beherrschen lassen.

#### 3.3.1 Temperaturgrenzen stabiler Sekundärphasen

Bei oder oberhalb der Lösungsglüh-temperatur lösen sich Carbide und intermetallische Phasen und bleiben in Lösung. Unterhalb dieser Temperatur können sich, je nach chemischer

Zusammensetzung des nichtrostenden Stahls, eine oder mehrere intermetallische Phasen bilden. Bei der Sorte AISI 304 (EN 1.4301) beispielsweise beginnen Chromcarbid unterhalb von 900 °C (1650 °F) zu entstehen. Mit steigendem Legierungsgehalt steigt auch die Neigung zur Bildung anderer Sekundärphasen. Gleichzeitig steigt auch die Temperatur, unterhalb derer Sekundärphasen entstehen können. Bei einigen der besonders hoch legierten austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstähle kann sich die Chi-Phase bei so hohen Temperaturen wie 1095 °C (2000 °F) bilden. Hieraus ergibt sich, dass austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle zur Optimierung der Korrosionsbeständigkeit bei deutlich höheren Temperaturen lösungsgelüht werden müssen als Standardsorten, üblicherweise oberhalb von 1095 °C (2000 °F).

#### 3.3.2 Kinetik der Sekundärphasenbildung

Die Kinetik oder die Rate, mit der sich Sekundärphasen beim Abkühlen bilden, ist für das Glühen und Schweißen dieser Stähle ein äußerst wichtiger Faktor. Unabhängig von der Sorte muss nichtrostender Stahl ausreichend schnell abgeschreckt werden, um die Bildung von Sekundärphasen zu vermeiden. Um den Zusammenhang zwischen der Abkühlungsgeschwindigkeit und der Sorte darzustellen, eignet sich ein Blick auf die Sorte AISI 304 (EN 1.4301) und ihre häufigste Sekundärphase, Chromcarbid. Wie aus dem Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm für die Initiation

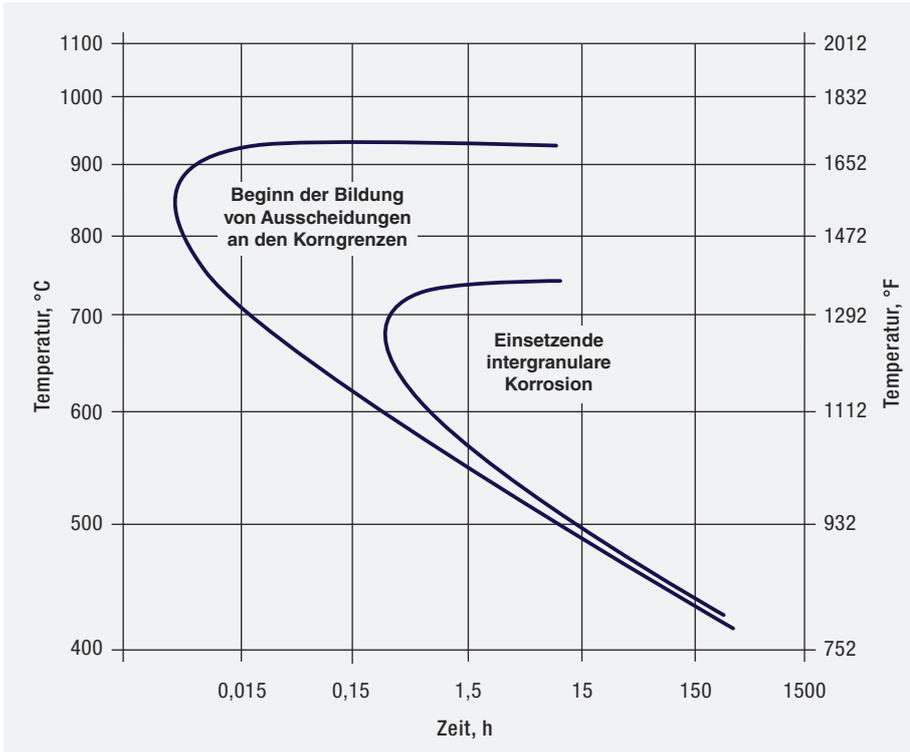


Abbildung 7: Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm für einen Stahl des Typs AISI 304 (EN 1.4301) mit 0,05 % Kohlenstoff, das die Initiation von Carbidausscheidungen an den Korngrenzen zeigt, und entsprechendes Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramm für den Einsatz interkristalliner Korrosion, ermittelt anhand eines  $H_2SO_4$ - $Cu_2SO_4$  Tests (4).

der Bildung von Chromcarbiden an den Korngrenzen in **Abbildung 7** ersichtlich, setzt die Bildung von Chromcarbiden während der Abkühlung unterhalb von  $900\text{ }^\circ\text{C}$  ( $1650\text{ }^\circ\text{F}$ ) ein. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Carbide bilden, nimmt mit sinkender Temperatur bis etwa  $850\text{ }^\circ\text{C}$  ( $1560\text{ }^\circ\text{F}$ ) schnell zu. Bei dieser Temperatur ist sie dann sehr hoch. Bei weiterer Abkühlung unter  $850\text{ }^\circ\text{C}$  ( $1560\text{ }^\circ\text{F}$ ) verlangsamt sich die Kinetik der Carbidbildung aufgrund der temperaturbedingt langsameren Diffusion von Chromatomen an die Korngrenzen und die Bildung von Chromcarbiden dauert länger. Die Einbuße an Korrosionsbeständigkeit, die mit der Bildung von Chromcarbiden einhergeht, lässt sich durch das entsprechende Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramm in **Abbildung 7** darstellen. Es zeigt, dass die Sorte AISI 304 (EN 1.4301) schnell auf Temperaturen deutlich unter  $800\text{ }^\circ\text{C}$  ( $1300\text{ }^\circ\text{F}$ ) abgekühlt werden muss, wenn ein Verlust an Korrosionsbeständigkeit vermieden werden soll.

Der Zeit-Temperatur-Bereich für diesen Verlust an Korrosionsbeständigkeit ist gegenüber dem Zeit-Temperatur-Bereich der Carbidbildung versetzt, insbesondere bei höheren Temperaturen. Dieser Unterschied zwischen den beiden Kurven hängt mit der höheren Chromdiffusionsrate bei höheren Temperaturen zusammen. Sie ermöglicht eine Heilung chromverarmter Zonen durch Rückdiffusion bei erhöhten Temperaturen, so dass kein Verlust an Korrosionsbeständigkeit eintritt.

**Abbildung 8** zeigt Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramme für eine Reihe von Stählen des Typs AISI 304 (EN 1.4301, 1.4307, 1.4541) mit unterschiedlichen Kohlenstoffgehalten, die wesentliche Faktoren der Sensibilisierung erkennen lassen. Die Kinetik der Chromcarbidausscheidung ist in Stählen mit geringerem Kohlenstoffgehalt deutlich verlangsamt. Für die Praxis bedeutet das, dass diese Stähle nach dem Glühen oder Schweißen schnell unter die Nase der Kurve heruntergekühlt werden müssen, damit eine Sensibilisierung und das damit verbundene Risiko der interkristallinen Korrosion vermieden

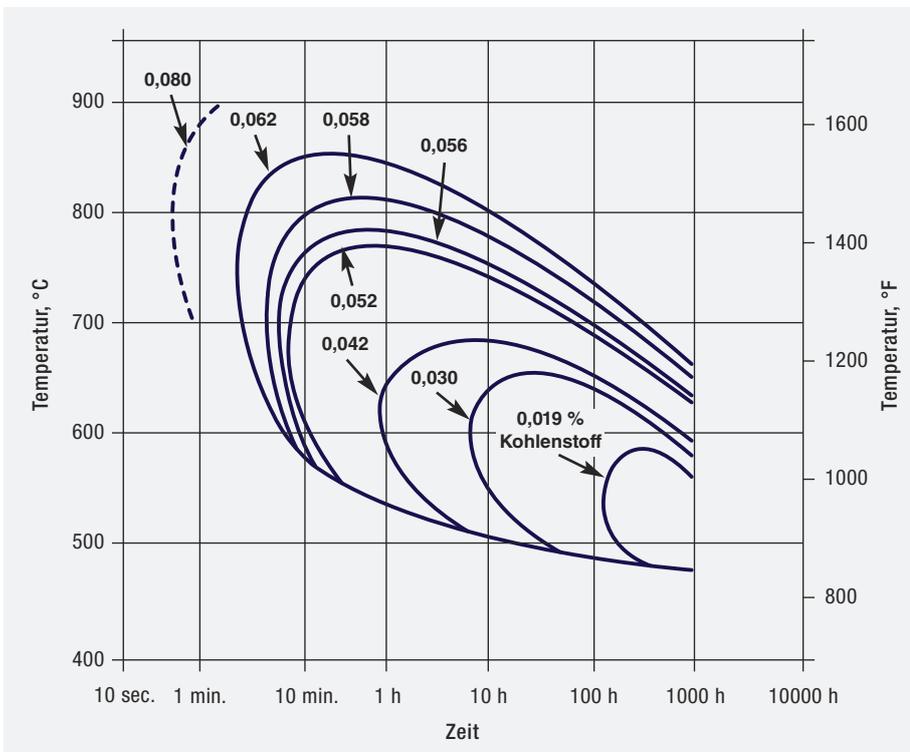


Abbildung 8: Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramm für Stahl des Typs AISI 304 (EN 1.4301) mit unterschiedlichen Kohlenstoffgehalten (5)

wird. Die Absenkung des Kohlenstoffgehalts verlängert die für die Abkühlung zur Verfügung stehende Zeit und erleichtert es so, Sensibilisierung zu vermeiden.

Der Einsatz kohlenstoffarmer Sorten ist ein gangbarer Weg, sie zu verhindern. „Low-Carbon- (L-)Sorten“ AISI 201L, 304L und 316L (EN 1.4372, 1.4307 und 1.4404) wurden speziell darauf ausgelegt, beim Schweißen der Sensibilisierung entgegenzuwirken. Eine alternative Lösung besteht in der Stabilisierung mit Titan (Ti) oder Niob (Nb). Als Legierungselemente finden sie sich in Sorten wie AISI 321 oder 347 (EN 1.4541 oder 1.4550). Sie sind bevorzugte Bindungspartner für Kohlenstoff und bilden damit Titan- und Niobcarbide. Der gebundene Kohlenstoff steht dann für die Bildung von Chromcarbidausscheidungen nicht mehr zur Verfügung. Stickstoffmodifizierte Standardsorten weisen den zusätzlichen Vorteil auf, dass sich die Chromcarbidgebildung verlangsamt, was ebenfalls der Sensibilisierung entgegenwirkt.

Das Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm für den Stahl AISI 316 (EN 1.4401) mit 2 % Mo und einem Kohlenstoffgehalt von 0,066 % (**Abbildung 9**) zeigt, dass sich darin Chromcarbide in nur fünf Minuten bilden können, während Sekundärphasen wie die Sigma-, Chi- oder Lavesphase erst nach deutlich längeren Zeiträumen auftreten (zumeist 10 Stunden und mehr). Bei austenitischen Hochleistungsstählen ist die Bildung von Sigma- oder Chi-Phasen allerdings problematischer als die von Chromcarbide. Der Grund hierfür liegt in dem niedrigen Kohlenstoffgehalt der austenitischen Hochleistungsstähle, der deren Anfälligkeit für Sensibilisierung durch Chromcarbide herabsetzt, während höhere Chrom- und Molybdängehalte die schnelle Bildung intermetallischer Sigma- und Chi-Phasen begünstigen. Das Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramm für einen hochlegierten Stahl mit 6 % Mo in **Abbildung 10** zeigt, bei welcher Zeit und Temperatur sich an den Korngrenzen Sigma- und Chi-Phase zu bilden beginnen und wann 50 % der Korngrenzen Ausscheidungen aufweisen.

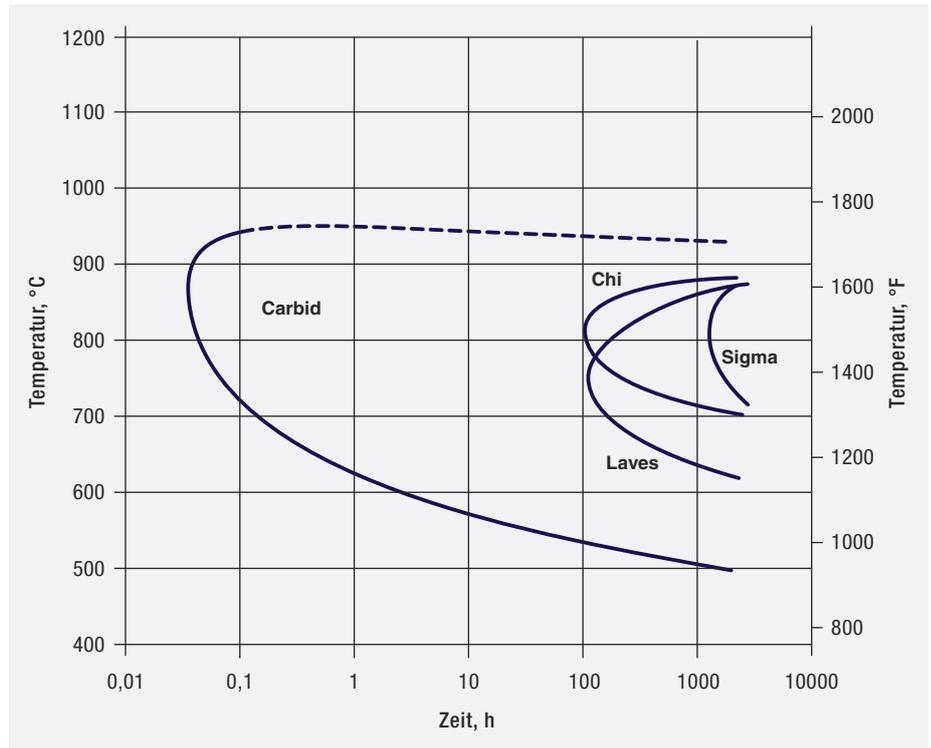


Abbildung 9: Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm für einen nichtrostenden Stahl AISI 316 (EN 1.4401) mit 0,066 % Kohlenstoff: Sekundär- (Chi-, Sigma- und Laves-)Phasen treten erst nach langer Zeit auf (6).

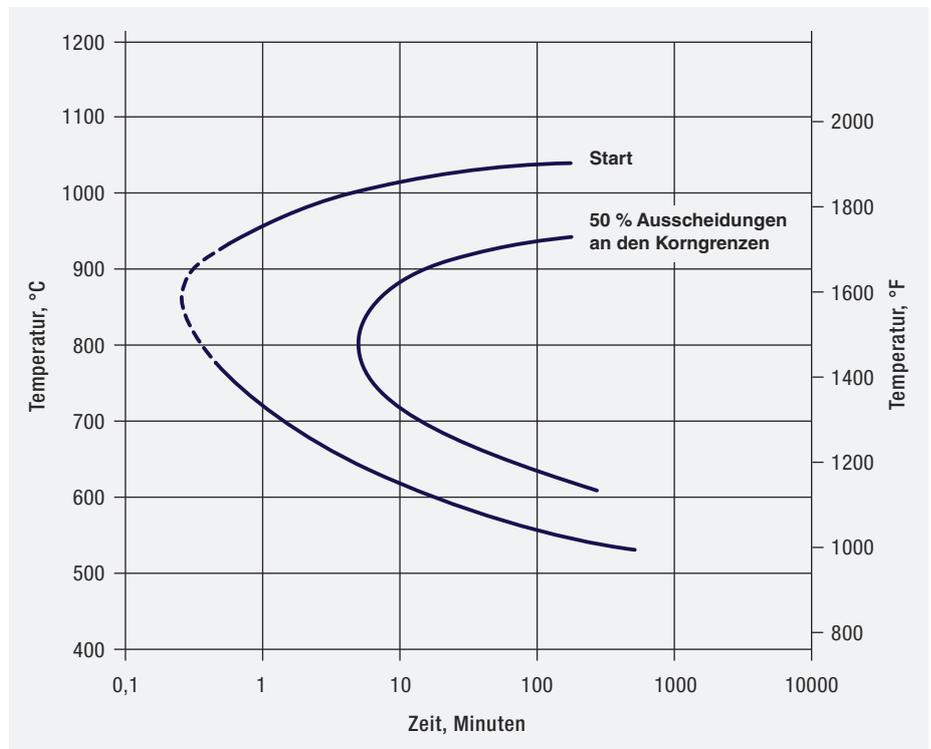
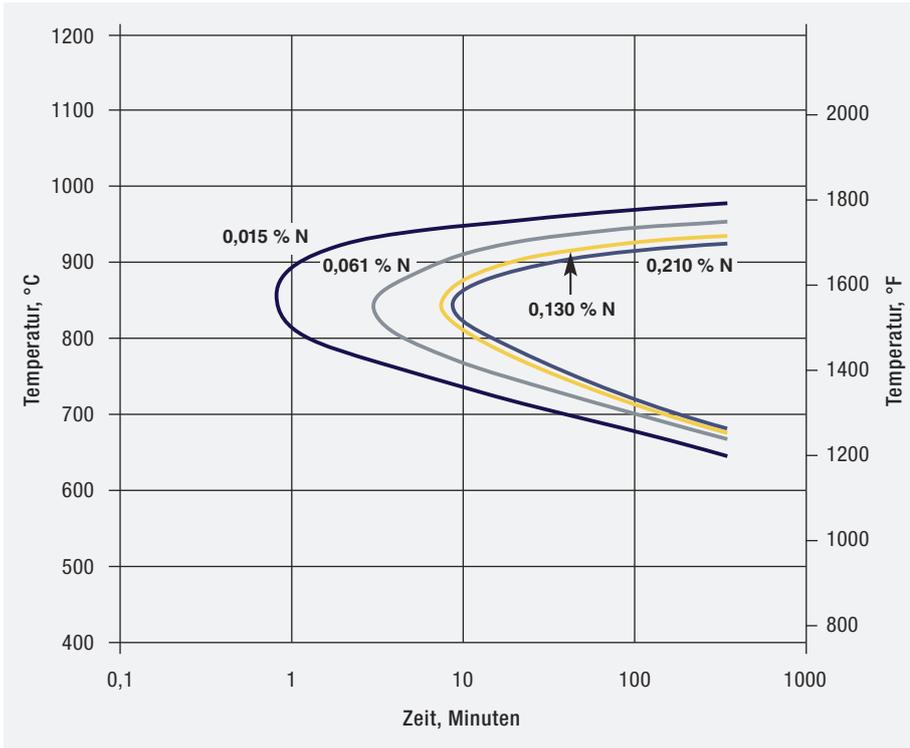


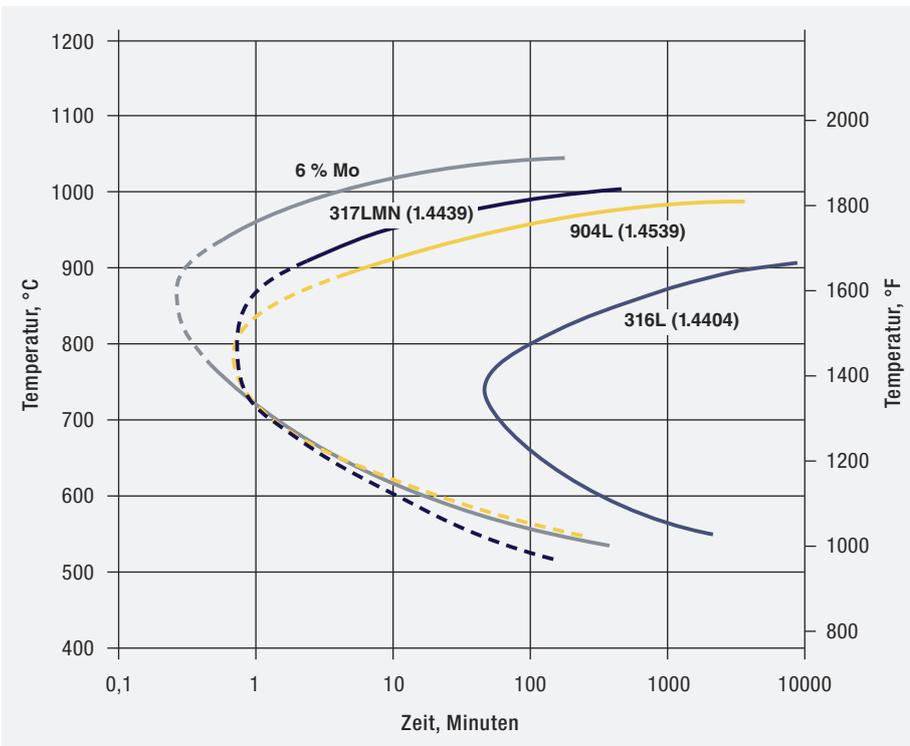
Abbildung 10: Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramm für einen nichtrostenden Stahl UNS S31254 (EN 1.4547), ermittelt anhand des Auftretens von Ätzgrübchen an den Korngrenzen nach elektrolytischem Ätzen in einer Lösung aus 3M HClO<sub>4</sub> + 1M HCl bei 28 °C (82 °F) (7)



Wie oben bereits angesprochen, verzögert Stickstoff die Bildung dieser Phasen. Es senkt auch die maximale Ausscheidungstemperatur und vermindert die Menge an intermetallischen Phasen im Gefüge (8). Diese Effekte zeigen sich in **Abbildung 11**. Darin wurden Stähle der Sorte AISI 904L (EN 1.4539), bei denen die Stickstoffgehalte zwischen 0,015 % und 0,210 % variierten, daraufhin untersucht, inwiefern der Stickstoffgehalt die Sensibilisierungskinetik beeinflusst. Mit zunehmendem Stickstoffanteil verlangsamt sich die Bildung von Sekundärphasen-Ausscheidungen, was geringere Abkühlgeschwindigkeiten beim Glühen oder Schweißen erlaubt und die Gefahr der Sensibilisierung reduziert.

Da der Chrom- und Molybdängehalt bei den besonders hochlegierten Sorten erheblich sein kann, bilden sich intermetallische Phasen noch schneller. Stickstoffzusätze sind hilfreich, allerdings können auch sehr hohe Stickstoffgehalte von 0,20 bis 0,50 % den Beginn der Bildung von Ausscheidungen nicht bis in den wünschenswerten Bereich von 10 Minuten oder mehr verschieben.

Abbildung 11: Einfluss von Stickstoff auf die Sensibilisierungskinetik des Stahls AISI 904L (EN 1.4539), ermittelt durch Ätzung in Oxalsäure, im Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramm (8)



**Abbildung 12** zeigt repräsentative Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramme verschiedener marktgängiger Sorten, erstellt mittels elektrolytischer Ätztechniken. Der größere Molybdängehalt der höherlegierten Sorten beschleunigt den Beginn der Ausscheidung intermetallischer Phasen, erhöht die maximale Ausscheidungstemperatur und verzögert die Ausscheidung von Nitridphasen (8). Wie aus **Abbildung 12** ersichtlich, kann es bei den höchstlegierten nichtrostenden Stählen in weniger als einer Minute zur Bildung intermetallischer Phasen kommen. Derartige Legierungen erfordern es zweifellos, Werkstoffdicke und Wärmeeinbringung beim Schweißen zu begrenzen sowie schnell und kontrolliert abzukühlen, um die Bildung sekundärer Phasen zu vermeiden.

Abbildung 12: Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsdiagramm für verschiedene marktgängige Sorten austenitischer nichtrostender Stähle mit unterschiedlichen Molybdän- und Stickstoffgehalten; bei dem Stahl AISI 316L (EN 1.4404) handelt es sich um eine molybdänreiche Variante mit 0,021 % C und 2,6 % Mo, die 6-%-Mo-Sorte entspricht jener in **Abbildung 10** (7).

# 4 Die Rolle der Legierungselemente

Die chemische Zusammensetzung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die metallurgische Struktur eines Stahls, seine mechanischen und physikalischen Eigenschaften sowie seine Korrosionsbeständigkeit. Sowohl die Legierungselemente als auch die unbeabsichtigt in den Erzeugungsprozess eingetragenen Begleitelemente beeinflussen diese Eigenschaften.

Legierungselemente wie Chrom, Molybdän und Nickel werden auf Stellvertreterplätzen in die Kristallstruktur eingebaut, d. h., sie treten an den Ecken und Flächenmittelpunkten des austenitischen Gitters an die Stelle von Eisen. Kohlenstoff und Stickstoff positionieren sich aufgrund ihrer geringen Größe in den Freiräumen zwischen den Gitteratomen, den Zwischengitterplätzen. Dabei bringen sie große Spannungen in das Gitter ein und wirken so ausgeprägt härtend. Legierungselemente beeinflussen die Stahleigenschaften in unterschiedlicher Weise – mal günstig, mal ungünstig. Die Entscheidung für eine bestimmte Legierungszusammensetzung zwingt zuweilen dazu, eine Eigenschaft in bestimmtem Umfang zugunsten einer anderen zu opfern. Die nachfolgenden Kapitel stellen die Funktion wichtiger Legierungselemente in austenitischen nichtrostenden Stählen dar.

## 4.1 Chrom (Cr)

Chrom ist das Element, das nichtrostende Stähle zu solchen macht. Ein Mindestgehalt von 10,5 % ist erforderlich, damit sich die spezielle Passivschicht bildet. Sie schützt den nichtrostenden Stahl wirksam unter Bedingungen wie aggressiven Wässern, zahlreichen Säuren und sogar stark oxidierenden heißen Gasen. Die Korrosionsbeständigkeit verbessert sich in einer Vielzahl von Medien, wenn der Chromgehalt über den Schwellenwert von 10,5 % hinaus steigt. Daher haben viele nichtrostende Stähle einen deutlich höheren Chromgehalt. Beispiele sind Standardsorten wie AISI 304 (EN 1.4301) mit 18 % Cr und austenitische nichtrostende Hochleistungsarten mit 20–28 % Cr.

## 4.2 Nickel (Ni)

Die Hauptfunktion von Nickel ist die Bildung und Stabilisierung des Austenits. Ohne 8 % Ni wäre der Stahl AISI 304 (EN 1.4301) kein austenitischer nichtrostender Stahl und würde auch nicht dessen günstigen mechanischen Eigenschaften aufweisen. Er wäre dann eine ferritische Sorte mit deutlich anderer Festigkeit und Zähigkeit. Wenn der Chromanteil erhöht wird, muss auch der Nickelanteil steigen, damit das austenitische Gefüge erhalten bleibt. Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle mit hohem Chrom- und Molybdängehalten erfordern hierfür Nickelanteile von ca. 20 %. Nickel verbessert zudem die Korrosionsbeständigkeit in bestimmten reduzierenden Säuren und verbessert jenseits von 20 % auch die Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion. Ferner verringert es die Kaltverfestigungseigung, weswegen es besonders in solchen Legierungen enthalten ist, die für das Tiefziehen, Drücken oder Kaltstauchen bestimmt sind.

## 4.3 Molybdän (Mo)

Molybdän verbessert die Loch- und Spaltkorrosionsbeständigkeit in chloridhaltigen Medien. Im Zusammenspiel mit Chrom und insbesondere Stickstoff erhöht es die Beständigkeit unter solchen Bedingungen. Dieser Synergieeffekt ist der Grund für die außerordentlich hohe Beständigkeit von nichtrostenden austenitischen Hochleistungsstählen gegen Loch- und Spaltkorrosion. Molybdän erhöht zudem die Korrosionsbeständigkeit unter reduzierenden Bedingungen, etwa in Salzsäure und verdünnter Schwefelsäure. Der Mindestgehalt an Molybdän liegt bei rund 2 %, wie er etwa beim Stahl AISI 316 (EN 1.4401) vorliegt. Höchstlegierte Sorten enthalten bis zu 7,5 % Mo.

Molybdän ist ein Ferritbildner, was das Phasengleichgewicht beeinflusst. Es trägt auch zur Bildung verschiedener unerwünschter Sekundärphasen bei und bildet ein instabiles Hochtemperatur-Oxid, das die Oxidationsbeständigkeit

bei hohen Temperaturen beeinträchtigt. Auch diesen Faktoren muss bei der Anwendung molybdänhaltiger Sorten Rechnung getragen werden.

## 4.4 Kohlenstoff (C)

Kohlenstoff stabilisiert und stärkt den Austeniten, weswegen er speziell für Hochtemperaturanwendungen wie Kesselrohre von Vorteil ist. Weiteren Nutzen hat er nicht. Wie bereits erwähnt, kann er unter bestimmten Bedingungen nachteilig für die Korrosionsbeständigkeit sein. Bei den meisten nichtrostenden Stählen ist der Kohlenstoff auf den niedrigsten praktisch erreichbaren Wert begrenzt. Bei kohlenstoffarmen Standardsorten für Schweißkonstruktionen (AISI 304L/EN 1.4307, 201L/1.4371, 316L/1.4404) liegt er bei maximal 0,030 %, bei höherlegierten Sorten sogar bei nur 0,020 %.

## 4.5 Stickstoff (N)

Stickstoff stabilisiert und stärkt den Austeniten und verzögert die Bildung von Sekundärphasen. Er findet sich sowohl in Standard- als auch in Hochleistungsarten. Den kohlenstoffarmen Sorten („L-Sorten“) wird er in geringen Mengen (bis max. 0,1 %) zugesetzt, um den Festigkeitsverlust auszugleichen, der durch den niedrigen C-Gehalt entsteht. Standard- und Hochleistungsarten verleiht er Festigkeit und verzögert die carbidbedingte Sensibilisierung sowie die Bildung von Sekundärphasen. Ferner verbessert er die Beständigkeit gegen chloridinduzierte Loch- und Spaltkorrosion, weswegen einige der höchstlegierten Stähle bis zu 0,5 % Stickstoff enthalten.

## 4.6 Mangan (Mn)

Die Stahlerzeuger setzen Mangan für die Desoxidation der Schmelze ein, so dass dieses Element in kleinen Mengen in allen nichtrostenden Stählen enthalten ist. Mangan ist auch ein Austenitbildner und verbessert die Löslichkeit von Stickstoff in nichtrostendem Stahl. Bei der 200er-Serie ersetzt es daher teilweise



Austenitischer nichtrostender Stahl kommt in der pharmazeutischen Industrie in großem Umfang zur Anwendung. © iStock.com/4X-image

Nickel um höhere Stickstoffgehalte zu ermöglichen und somit für verbesserte Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu sorgen. Er findet sich zu diesem Zweck auch in einigen nichtrostenden Hochleistungsstählen.

#### 4.7 Kupfer (Cu)

Kupfer verbessert die Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Stählen in reduzierenden Säuren, z. B. bestimmten Mischungen von Schwefel- und Phosphorsäure. Es wird daher einigen Hochleistungsstählen hinzulegiert, die speziell auf solche Medien ausgelegt sind.

#### 4.8 Silizium (Si)

Silizium ist insgesamt günstig für austenitische nichtrostende Stähle, weil es die

Korrosionsbeständigkeit in konzentrierten Säuren und stark oxidierenden Medien verbessern kann. Bei Sonderedelstählen der Sorte UNS S30600 (EN 1.4361) wurde von erhöhter Lochkorrosionsbeständigkeit berichtet. Ebenso wie Mangan dient auch Silizium der Desoxidation von geschmolzenem nichtrostendem Stahl. In geringen Mengen weist der Stahl stets kleine Oxideinschlüsse auf, die Silizium, Mangan und andere desoxidierende Elemente enthalten. Wird deren Anteil zu hoch, können sie sich ungünstig auf die Oberflächenqualität und insbesondere die Poliereignung auswirken.

#### 4.9 Niob (Nb) und Titan (Ti)

Diese Elemente sind äußerst starke Carbidbildner und werden als Alternative zu einem niedrigen Kohlenstoffgehalt eingesetzt, um der Sensibilisierung ent-

gegenzuwirken. Nb und Ti verbessern die Hochtemperaturfestigkeit. Sie sind auch in den Sorten AISI 347 und 321 (EN 1.4550 und 1.4541) enthalten, die häufig in Kesseln und in Raffinerien Anwendung finden, bei denen hohe Hochtemperaturfestigkeit und Schweiß-eignung erforderlich sind. Nb und Ti werden auch für bestimmte Desoxidationsverfahren eingesetzt und sind daher gelegentlich auch in Hochleistungsstählen in Spuren anzutreffen.

#### 4.10 Schwefel (S) und Phosphor (P)

Schwefel wirkt sich sowohl günstig als auch schädlich auf die Eigenschaften von nichtrostendem Stahl aus. Der wichtigste nützliche Effekt liegt in der verbesserten Spanbarkeit. Bedeutende Nachteile sind schlechtere Warmverarbeitbarkeit und erhöhte Gehalte an Mangansulfid-Einschlüssen, welche die Lochkorrosionsbeständigkeit herabsetzen. Da austenitische Hochleistungsstähle ohnehin schwer warm zu verarbeiten sind, liegt ihr Schwefelgehalt in der Praxis an der Untergrenze des Erreichbaren, bei 0,001 %. Schwefel dient bei nichtrostenden austenitischen Hochleistungsstählen üblicherweise nicht als Legierungszusatz. Allerdings finden sich bei Standardsorten häufig höhere Schwefelgehalte (0,005–0,017 %), um beim Autogenschweißen das Durchschweißen zu verbessern und die Spanbarkeit zu erhöhen.

Phosphor hat keinerlei positive Wirkungen und verschlechtert die Warmumformbarkeit beim Schmieden und Warmwalzen. Darüber hinaus begünstigt Phosphor ebenso wie Schwefel die Heißrissbildung bei der Abkühlung von Schweißnähten. Sein Gehalt wird daher stets auf das niedrigstmögliche Niveau begrenzt.

# 5 Mechanische und physikalische Eigenschaften

Als Werkstofffamilie weisen die austenitischen nichtrostenden Stähle hohe Festigkeit in Kombination mit ausgezeichneter Zähigkeit auf. Ihre Festigkeit geht auf die feste Lösung sowohl von substituierenden Legierungselementen als auch von Stickstoff- und Kohlenstoffeinlagerungen auf den Zwischengitterplätzen zurück. Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich nicht durch Wärmebehandlung härten. Höhere Festigkeit lässt sich allein durch Kaltumformung erzielen. Austenitische nichtrostende Stähle haben einen relativ hohen Kaltverformungs-Verfestigungskoeffizienten sowie eine hohe Kaltverfestigungsrate, so dass ihre Festigkeit durch Kaltumformung stark zunimmt. Sie sind äußerst umformbar und können viel Energie aufnehmen, bevor sie brechen. Diese Legierungen behalten sowohl unter Kryobedingungen als auch bei hohen Temperaturen gute mechanische Eigenschaften bei.

## 5.1 Festigkeit

**Tabelle 4** fasst die mechanischen Eigenschaften nichtrostender austenitischer Hochleistungsstähle und Standardsorten bei Raumtemperatur zusammen. Im Vergleich zu der gängigen 300er-Serie haben Sorten der 200er-Serie sowie Hochleistungsstähle höhere Dehngrenzen und Zugfestigkeiten. Der Grund hierfür liegt im Wesentlichen in der Einlagerung von N und C in Zwischengitterpositionen, aber auch im höheren Legierungsgehalt an substituierenden Elementen wie Mo, Ni und Cr. **Abbildung 13** zeigt, wie der Zusatz von Stickstoff die Festigkeit dieser Stähle erhöht. So steigert z. B. eine Erhöhung des Stickstoffgehalts von 0,05 % auf 0,20 % die Dehngrenze von 270 MPa (39 ksi) auf 340 MPa (49 ksi). Hieraus ergeben sich wesentliche Auswirkungen auf die Mindest-Festigkeitswerte in den Normen. ASTM A240 beispielsweise schreibt für die Sorte 304L (EN 1.4307) mit ca. 0,05 % N eine Mindest-Dehngrenze von 170 MPa (25 ksi) fest, für die Sorte 304N (EN 1.4315) 240 MPa (35 ksi).

Eine weitere Steigerungsstufe stellt die Sorte UNS S31266 mit 0,50 % N dar, deren Mindest-Dehngrenze bei 420 MPa (61 ksi) liegt.

Da austenitische nichtrostende Stähle nicht durch Wärmebehandlung gehärtet werden können, werden sie i. d. R. in lösungsgeglühtem Zustand hergestellt. Werden höhere Festigkeiten gefordert, sind einige Produkte ab Werk in kaltverfestigtem Zustand verfügbar. Die Kaltverfestigung während der weiteren Verarbeitung, z. B. durch (Druck-)Umformen, Gesenkformen und Kaltziehen führen zu äußerst hohen Festigkeitswerten. Eine hohe Kaltverfestigungsrate kann bei manchen Verarbeitungsverfahren zu Schwierigkeiten führen, etwa zu Beschränkungen der Werkstoffdicke durch die Stärke der verfügbaren Maschinen. Ggfs. ist eine Zwischen-

glühung nötig, um den Stahl hinreichend weich für eine weitere Umformung zu machen. Hohe Kaltverfestigungsraten können zudem bei der spanenden Bearbeitung insofern Probleme bereiten, als das Schneidwerkzeug die Oberfläche des Werkstücks verfestigt. Für die Zerspanung austenitischer nichtrostender Stähle werden große Spantiefen und geringe Schnittgeschwindigkeiten empfohlen. **Abbildung 14** zeigt einen Vergleich der Kaltverfestigung bei austenitischen Sorten der 300er- und 200er-Serie sowie Hochleistungsstählen.

Die Festigkeitszunahme bleibt bei gemäßigten Temperaturen erhalten, nicht jedoch bei hohen Temperaturen. Ein kaltverfestigter Werkstoff behält folglich seine hohen Festigkeitswerte beim Glühen oder Schweißen nicht bei.

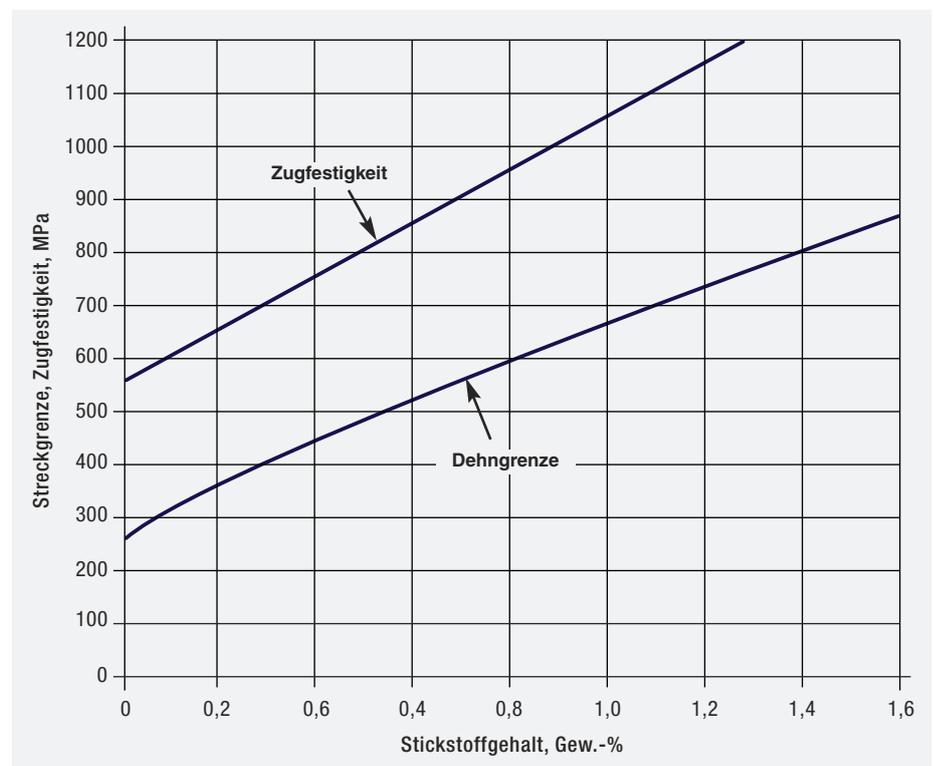


Abbildung 13: Einfluss von Stickstoff auf die Festigkeit nichtrostender Stähle (9)

Tabelle 4: Mindestwerte der mechanischen Eigenschaften von Standardstählen der 300er- und 200er-Serie sowie austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen

AISI	UNS	EN	0,2 %-Dehngrenze		Zugfestigkeit		Bruchdehnung	Härte, max	
			MPa	ksi	MPa	ksi		%	Brinell
<b>Austenitische Standardsorten – 300er-Serie</b>									
304	S30400	1.4301	205	30	515	75	40	201	92
304L	S30403	1.4307	170	25	485	70	40	201	92
321	S32100	1.4541	205	30	515	75	40	217	95
347	S34700	1.4550	205	30	515	75	40	201	92
316L	S31603	1.4404	170	25	485	70	40	217	95
317L	S31703	1.4438	205	30	515	75	40	217	95
<b>Austenitische Standardsorten – 200er-Serie</b>									
201	S20100	1.4372	260	38	515	75	40	217	95
201L	S20103	–	260	38	655	95	40	217	95
201LN	S20153	–	310	45	655	95	45	241	100
<b>Austenitische Hochleistungsarten</b>									
Alloy 20	N08020	2.4660	240	35	550	80	30	217	95
317LM	S31725	–	205	30	515	75	40	217	95
317LMN	S31726	1.4439	240	35	550	80	40	223	96
904L	N08904	1.4539	220	31	490	71	35	–	90
–	S31727	–	245	36	550	80	35	217	–
–	N08028	1.4563	500	73	214	31	40	–	90
–	S34565	1.4565	415	60	795	115	35	241	100
–	N08026	–	241	35	551	80	30	217	95
–	S32053	–	295	43	640	93	40	217	96
–	N08926	1.4529	295	43	650	94	35	–	–
–	S31254	1.4547	310	45	655	95	35	223	96
–	N08367	1.4529	310	45	655	95	30	241	–
–	S31266	1.4659	420	61	750	109	35	–	–
–	S31277	–	360	52	770	112	40	–	–
–	N08031	1.4562	276	40	650	94	40	–	–
–	N08354	–	295	43	640	93	40	217	96
–	N08935	–	425	62	750	109	35	–	–
–	S32654	1.4652	430	62	750	109	40	250	–

Anmerkung: Diese mechanischen Eigenschaften betreffen die ASTM-Sorten gemäß den UNS-Sortenbezeichnungen. Die EN-Sorten in der zweiten Spalte sind ähnlich, aber nicht notwendigerweise identisch. Ein Werkstoff, der die Anforderungen eines Normensystems erfüllt, z. B. ASTM, erfüllt nicht zwangsläufig die eines anderen, z. B. EN oder JIS.

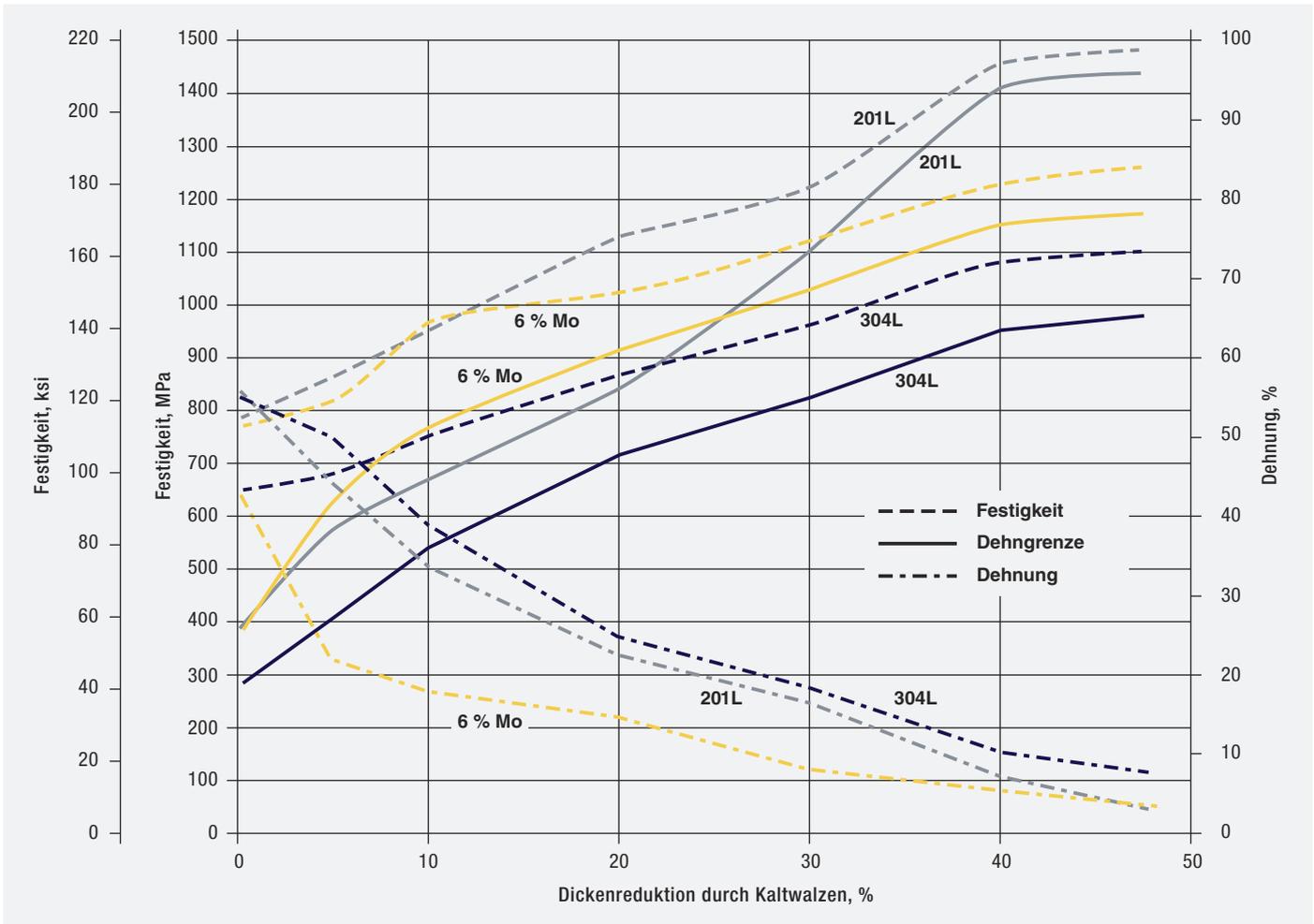


Abbildung 14: Wirkung der Kaltumformung auf Festigkeit und Duktilität der Sorten AISI 201L (EN 1.4371), 304L (1.4307) und des mit 6 % Mo legierten Hochleistungsstahls UNS N08367 (EN 1.4529)

## 5.2 Duktilität und Zähigkeit

Austenitische nichtrostende Stähle weisen mit Bruchdehnungen, die mit 60–70 % weit über den Mindestanforderungen der Normen liegen, eine ausgezeichnete Umformbarkeit auf. Der bei manchen Sorten zur Festigkeitssteigerung hinzulegierte Stickstoff verringert nicht die Duktilität. Ursächlich für die gute Umformbarkeit ist die kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur austenitischer Stähle, die zudem sehr gute Zähigkeit bei Raumtemperatur und darunter sicherstellt. Im Unterschied zu unlegiertem Stahl und einigen anderen Werkstoffen lassen austenitische nichtrostende Stähle bei tiefer werdenden Temperaturen keine klare Übergangstemperatur erkennen, weswegen sie in der Kryotechnik Standardwerkstoffe sind.

Auch wenn die Kaltumformung Duktilität und Zähigkeit verringert, ist dieser Verlust jedoch graduell. Auch austenitische Stähle mit einer Dickenreduktion von 20 % weisen zumeist immer noch eine Bruchdehnung von 15 % oder mehr auf (Abbildung 14). Kaltumformung vermindert die Duktilität, weil sich die Dichte der Versetzungen gegenüber dem Ausgangswerkstoff erhöht. Umgekehrt macht eine Glühbehandlung die Wirkung der Kaltumformung durch Rekristallisation rückgängig, wodurch die Festigkeit abnimmt und Duktilität und Zähigkeit wieder steigen.

## 5.3 Hochtemperaturfestigkeit

Austenitische nichtrostende Stähle weisen bei erhöhten Temperaturen gute Festigkeitswerte auf. Die meisten

Standardsorten sind für Druckgefäße zugelassen. Die ASME-Druckbehälternorm gibt die zulässigen Auslegungswerte für Temperaturen bis 427 °C (800 °F) an. Für Ofenanwendungen, bei denen keine besondere Druckbeanspruchung vorliegt, können nichtrostende Standardstähle und einige spezifische hitzebeständige Sorten bis zu 1100 °C (2010 °F) zur Anwendung kommen. Nichtrostende austenitische Hochleistungsstähle sind im Hinblick auf Korrosionsbeständigkeit optimiert; gleichwohl behalten sie ihre bei Raumtemperatur vorhandenen Festigkeitsvorteile auch bei hohen Temperaturen bei. So beträgt z. B. nach ASME die höchstzulässige Spannung bei 427 °C (800 °F) für die Hochleistungssorte N08367 (EN 1.4519) 124 MPa (18 ksi), beim nichtrostenden Stahl AISI 316 (EN 1.4401) dagegen

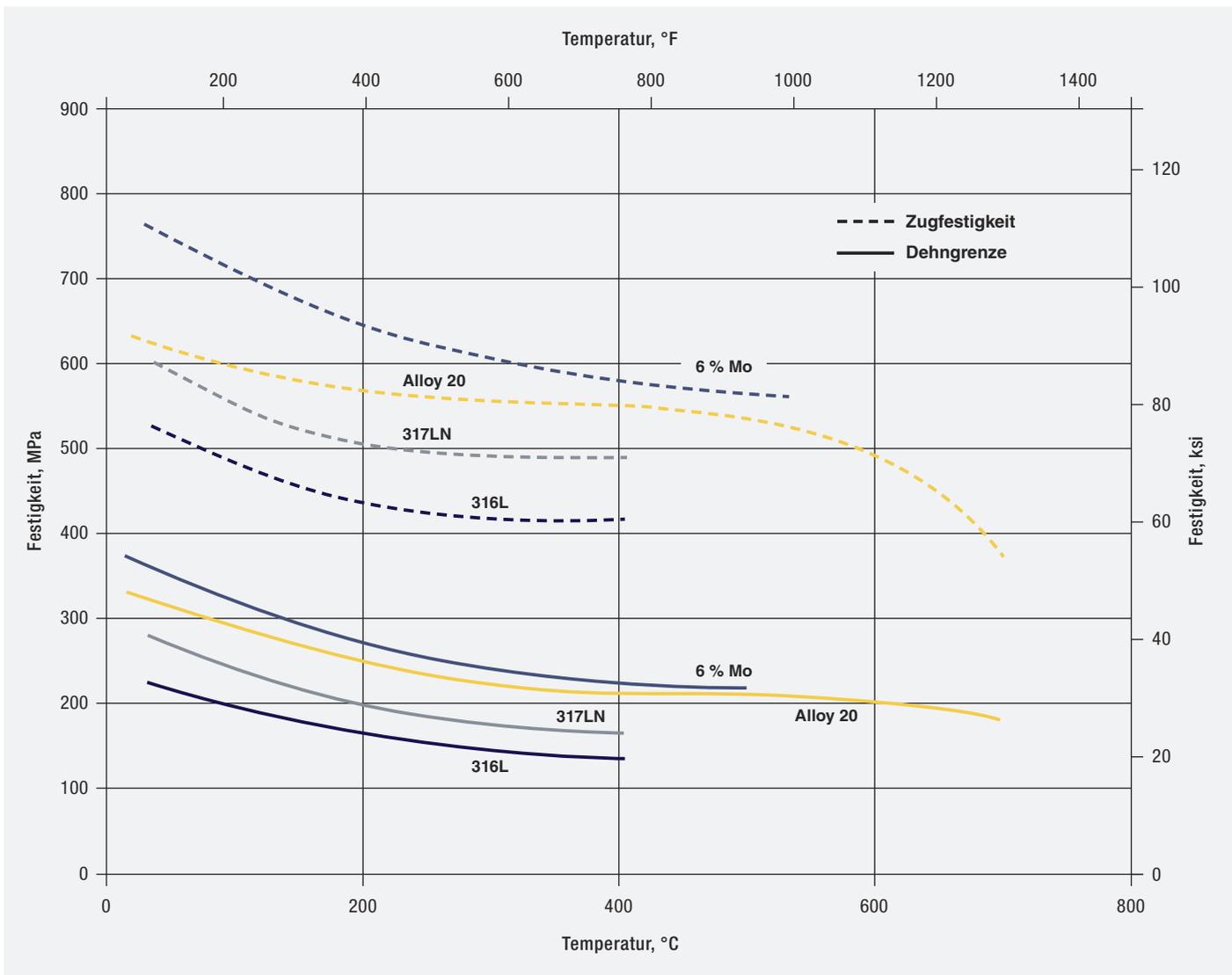


Abbildung 15: Hochtemperaturfestigkeit von drei austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen, Alloy 20 (EN 2.4660), AISI 317N (EN 1.4434) und UNS N08367 (EN 1.4529), im Vergleich zur Sorte AISI 316L (EN 1.4404) (10)

66 MPa (9,6 ksi). **Abbildung 15** vergleicht die Hochtemperatur-Festigkeitsdaten der Sorte AISI 316 (EN 1.4401) mit denen dreier austenitischer nichtrostender Hochleistungsstähle.

Über ihre gute Hochtemperaturbeständigkeit hinaus weisen austenitische nichtrostende Stähle den Vorteil auf, dass sie – im Unterschied zu ferritischen und Duplex-Stählen – jenseits von 300 °C (570 °F) keine versprödende α'-Phase bilden. Allerdings können bei austenitischen Hochleistungsstählen im Temperaturbereich 500–1050 °C

(930–1925 °F) versprödende Chi- und Sigma-Phasen entstehen.

Ihre gute Hochtemperaturfestigkeit kann sich auf die Verarbeitung sowohl positiv als auch negativ auswirken. Beim Glühen eines Bauteils wirkt sie dem Verzug durch das Eigengewicht entgegen. Verzieht sich dagegen ein Bauteil, z. B. beim Schweißen, ist es auch schwerer zu richten, als wenn es aus einem weniger festen Werkstoff bestünde. Wie oben bereits erwähnt, können hochfeste Stähle die Stärke der zur Verfügung stehenden Maschinen

übersteigen und so die verarbeitbaren Abmessungen nach oben begrenzen.

#### 5.4 Physikalische Eigenschaften

Alle austenitischen nichtrostenden Stähle haben ähnliche physikalische Eigenschaften. Im Vergleich zu unlegierten Stählen ist der Elastizitätsmodul etwas niedriger, der Wärmeausdehnungskoeffizient höher und die Wärmeleitfähigkeit niedriger. **Tabellen 5** und **6** verzeichnen die physikalischen Eigenschaften austenitischer nichtrostender Stähle im Detail.

Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften austenitischer Standard- und Hochleistungssorten bei Raumtemperatur

AISI	UNS	EN	Spezifisches Gewicht		Spezifische Wärme		Elektrischer Widerstand		Elastizitätsmodul	
			g/cm <sup>3</sup>	lb/in <sup>3</sup>	J/kg-K	Btu/lb/°F	Ω-mm <sup>2</sup> /m	micro Ω in	GPa	10 <sup>6</sup> psi
<b>Repräsentative Standardsorten – 300er-Serie</b>										
304L	S30403	1.4307	8,03	0,290	500	0,120	0,72	28,3	193	28,0
321	S32100	1.4541	7,89	0,285	500	0,120	0,72	28,3	193	28,0
347	S34700	1.4550	7,97	0,288	500	0,120	0,73	28,7	200	29,0
316L	S31603	1.4404	7,95	0,287	469	0,112	0,74	29,1	193	28,0
317L	S31703	1.4438	7,95	0,287	460	0,110	0,79	31,1	200	29,0
<b>Repräsentative Standardsorte – 200er-Serie</b>										
201	S20100	1.4372	7,86	0,284	502	0,120	0,67	26,4	207	30,0
<b>Austenitische nichtrostende Hochleistungssorten</b>										
Alloy 20	N08020	2.4660	8,08	0,292	502	0,120	1,08	42,5	193	28,0
Alloy 825*	N08825	–	8,14	0,294	440	0,015	1,13	44,5	193	28,0
317LM	S31725	–	7,95	0,287	460	0,110	0,79	31,1	200	29,0
317LMN	S31726	1.4439	8,02	0,290	502	0,112	0,85	33,5	200	29,0
904L	N08904	1.4539	7,95	0,287	461	0,110	0,95	37,4	190	28,0
–	S31727	–	8,02	0,290	460	0,109	0,86	33,9	203	29,4
–	N08028	1.4563	8,00	0,290	460	0,109	0,99	39,0	105	28,3
–	S34565	1.4565	8,00	0,290	510	0,122	0,92	36,2	190	28,0
–	N08026	–	8,13	0,294	461	0,110	1,08	42,5	186	27,0
–	S32053	–	8,06	0,291	460	0,109	0,93	36,6	188	27,3
–	N08926	1.4529	8,15	0,294	461	0,110	0,88	34,6	192	27,8
–	S31254	1.4547	7,95	0,287	498	0,119	0,85	33,5	200	29,0
–	N08367	1.4529	8,06	0,291	461	0,110	0,89	35,0	195	28,2
–	S31266	1.4659	8,20	0,297	450	0,113	1,00	39,4	195	28,3
–	S31277	–	8,02	0,289	454	0,109	1,00	39,4	191	27,7
–	N08031	1.4562	8,03	0,290	440	0,105	1,00	39,4	195	28,3
–	N08354	–	8,16	0,295	440	0,105	1,03	40,6	193	28,0
–	N08935	–	8,06	0,291	450	0,110	1,05	41,3	192	27,8
–	S32654	1.4652	8,00	0,290	510	0,122	0,78	30,7	188	27,6

\* Alloy 825 ist eine Nickelbasislegierung, kein nichtrostender Stahl

Tabelle 6: Physikalische Eigenschaften austenitischer Standard- und Hochleistungsstähle bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen

AISI	UNS	EN	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (754 °F)	500 °C (932 °F)
<b>Elastizitätsmodul unter Zug GPa (10<sup>6</sup> psi)</b>								
201	S20100	1.4372	200 (29,0)	194 (28,1)	186 (27,0)	179 (26,0)	172 (24,9)	165 (23,9)
304	S30400	1.4301	193 (28,0)	193 (28,0)	193 (28,0)	187 (27,1)	183 (26,5)	179 (26,0)
321	S32100	1.4541	193 (28,0)	193 (28,0)	193 (28,0)	188 (27,3)	183 (26,5)	178 (25,8)
316L	S31603	1.4404	200 (29,0)	194 (28,1)	185 (26,8)	177 (25,7)	169 (24,5)	160 (23,2)
317LMN	S31726	1.4439	200 (29,0)	194 (28,1)	186 (27,0)	179 (26,0)	171 (24,8)	163 (23,6)
–	S34565	1.4565	193 (28,0)	187 (27,1)	180 (26,1)	173 (25,1)	165 (23,9)	157 (22,9)
–	N08926	1.4529	193 (28,0)	186 (27,0)	179 (26,0)	173 (25,1)	168 (24,4)	162 (23,6)
–	S32053	–	188 (27,3)	184 (26,7)	178 (25,8)	172 (24,9)	165 (23,9)	–
–	N08367	1.4529	195 (28,3)	189 (27,4)	180 (26,1)	172 (24,9)	163 (23,6)	158 (23,0)
–	S31266	1.4659	190 (27,6)	185 (26,8)	179 (26,0)	174 (25,2)	166 (24,1)	158 (23,0)
–	N08354	–	198 (28,7)	194 (28,1)	189 (27,4)	183 (26,5)	177 (25,7)	172 (24,9)
–	N08935	–	192 (27,8)	187 (27,1)	180 (26,1)	174 (25,2)	168 (24,4)	161 (23,4)
–	S32654	1.4652	189 (27,4)	184 (26,7)	177 (25,7)	170 (24,7)	163 (23,6)	–
<b>Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient - Temperaturbereich 20 °C (68 °F) bis T - 10<sup>-6</sup>/K (10<sup>-6</sup>/°F)</b>								
304	S30400	1.4301	–	16,6 (9,20)	16,9 (9,40)	17,4 (9,65)	17,6 (9,75)	18,0 (10,00)
321	S32100	1.4541	–	16,0 (8,89)	16,5 (9,17)	17,0 (9,44)	17,5 (9,72)	18,0 (10,00)
316L	S31603	1.4404	–	16,5 (9,17)	16,9 (9,38)	17,3 (9,61)	17,6 (9,78)	18,0 (10,00)
201	S20100	1.4372	–	16,6 (9,20)	–	–	–	–
Alloy 20	N08020	2.4660	–	14,9 (8,27)	15,2 (8,44)	15,5 (8,61)	15,9 (8,83)	16,1 (8,94)
317LMN	S31726	1.4439	–	16,6 (9,22)	17,2 (9,55)	17,8 (9,89)	18,5 (10,30)	–
904L	N08904	1.4539	–	15,3 (8,50)	15,7 (8,72)	16,1 (8,94)	16,5 (9,17)	16,9 (9,39)
–	S31727	–	–	15,9 (8,83)	16,4 (9,11)	16,7 (9,28)	17,0 (9,44)	17,2 (9,55)
–	S34565	1.4565	–	14,5 (8,00)	15,5 (8,60)	16,3 (9,00)	16,8 (9,30)	17,2 (9,50)
–	N08026	–	–	14,8 (8,22)	14,9 (8,29)	15,3 (8,52)	15,7 (8,73)	16,0 (8,89)
–	S32053	–	–	14,5 (8,00)	15,0 (8,28)	15,4 (8,55)	15,8 (8,78)	–
–	N08926	1.4529	–	15,0 (8,33)	15,7 (8,72)	16,1 (8,94)	16,4 (9,11)	16,7 (9,28)
–	S31254	1.4547	–	16,5 (9,17)	17,0 (9,44)	17,5 (9,72)	18,0 (10,00)	18,0 (10,00)
–	N08367	1.4529	–	15,3 (8,50)	15,5 (8,60)	15,7 (8,80)	16,0 (8,90)	16,0 (8,90)
–	S31266	1.4659	–	15,0 (8,33)	15,5 (8,61)	16,0 (8,90)	16,3 (9,06)	16,5 (9,17)
–	N08354	–	–	14,1 (7,83)	14,6 (8,11)	14,8 (8,22)	15,1 (8,40)	15,4 (8,55)
–	N08935*	–	–	14,1 (7,81)	14,7 (8,15)	15,1 (8,37)	15,4 (8,56)	15,7 (8,71)
–	S32654	1.4652	–	15,0 (8,33)	15,4 (8,55)	15,8 (8,78)	16,2 (9,00)	–

Tabelle 6 (Fortsetzung): Physikalische Eigenschaften austenitischer Standard- und Hochleistungsstähle bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen

AISI	UNS	EN	20 °C (68 °F)	100 °C (212 °F)	200 °C (392 °F)	300 °C (572 °F)	400 °C (752 °F)	500 °C (932 °F)
<b>Wärmeleitfähigkeit - W/m·K (Btu in/hr ft<sup>2</sup> °F)</b>								
304	S30400	1.4301	14,6 (100)	16,2 (112)	17,0 (117)	19,6 (135)	20,3 (140)	21,4 (148)
316L	S31603	1.4404	14,0 (97)	14,9 (103)	16,0 (111)	17,3 (120)	18,6 (129)	19,9 (138)
317LMN	S31726	1.4439	14,0 (97)	14,4 (100)	–	–	–	–
201	S20100	1.4372	15 (104)	16,2 (112)	–	–	–	21,4 (148)
Alloy 20	N08020	2.4660	11,6 (81)	13,1 (91)	15,0 (104)	16,6 (115)	18,2 (126)	19,6 (136)
904L	N08904	1.4539	11,5 (80)	13,1 (91)	15,1 (105)	–	–	–
–	S31727	–	12,5 (87)	14,1 (98)	16,2 (112)	18,2 (126)	19,9 (138)	21,8 (151)
–	S34565	1.4565	14,5 (101)	14,5 (101)	–	–	–	–
–	N08026	–	11,6 (81)	13,1 (91)	15,0 (104)	16,6 (115)	18,2 (126)	19,6(136)
–	S32053	–	11,6 (81)	12,5 (87)	14,4 (100)	16,1 (112)	17,6 (122)	–
–	N08926	1.4529	12,0 (83)	12,9 (89)	14,4 (100)	16,5 (114)	18,5 (128)	20,1 (139)
–	S31254	1.4547	13,4 (92)	14,5 (100)	15,9 (110)	17,3 (119)	18,7 (129)	20,2 (139)
–	N08367	1.4529	11,5 (80)	13,0 (90)	15,1 (105)	17,2 (120)	19,3 (134)	21,2 (147)
–	S31266	1.4659	12,0 (83)	–	13,0 (90)	–	14,0 (97)	–
–	N08354	–	11,3 (78)	13,2 (91)	15,3 (106)	17,6 (122)	19,1 (132)	20,8 (144)
–	N08935	–	10,1 (70)**	11,8 (82)	13,7 (95)	15,4 (107)	17,2 (119)	18,7 (130)
–	S32654	1.4652	8,6 (59)	9,8 (68)	11,3 (78)	12,6 (87)	14,5 (100)	–

\* Temperatur 30 °C (86 °F) bis T

\*\* gemessen bei 23 °C (73 °F)

# 6 Korrosionsbeständigkeit

Zwar bieten austenitische Standard-sorten häufig ausreichende Korrosionsbeständigkeit, die höchste wird jedoch mit Hochleistungssorten erreicht.

Obwohl jeder dieser Stähle spezifische Eigenschaften hat, ist ihnen allen eine überragende Beständigkeit gegen eine oder mehrere der drei folgenden Korrosionsarten gemeinsam: Flächenkorrosion, Loch- bzw. Spaltkorrosion sowie Spannungsrisskorrosion.

Die Korrosionsbeständigkeit beruht bei allen nichtrostenden Stählen auf einer äußerst dünnen Chromoxidschicht, dem sogenannten Passivfilm. Damit ein nichtrostender Stahl unter bestimmten Bedingungen korrosionsbeständig ist, muss der Passivfilm eine wirksame Barriere gegenüber der Umgebung bilden. Wird er zerkratzt oder anderweitig beschädigt, muss er sich schnell wieder neu bilden, d. h. repassivieren. Bei Hochleistungssorten verbessert deren erhöhter Gehalt an Chrom und Molybdän die Schutzwirkung der Passivschicht, macht also den Werkstoff korrosionsbeständiger. Dennoch kann der Passivfilm unter ungünstigen Bedingungen versagen. Ein allgemeines Versagen führt zu Flächenkorrosion. Eine örtliche Durchbrechung des Passivfilms verursacht Lokalkorrosion, z. B. Lochkorrosion. Aufgrund ihres höheren Molybdängehalts sind nichtrostende austenitische Hochleistungsstähle gegen Versagen beständiger als Standardsorten.

Bei der Planung gilt es, jeweils die kostengünstigste Sorte auszuwählen, deren Passivschicht den jeweiligen Bedingungen standhält. Verarbeiter und Anwender müssen die Faktoren kennen, die bei unsachgemäßer Handhabung die sortentypische Korrosionsbeständigkeit einer Legierung herabsetzen können. Der vorliegende Abschnitt ist einigen Grundprinzipien gewidmet, die der Korrosionsbeständigkeit von nichtrostendem Stahl zugrunde liegen. Detailliertere Informationen über die Beständigkeit unter spezifischen Bedingungen finden sich in den im Anhang genannten Quellen. Die Referenzen 11 bis 13 zeigen die Korrosionsbeständig-

keit verschiedener nichtrostender Stähle in häufig vorkommenden Medien.

## 6.1 Flächenkorrosion

Als Flächenkorrosion wird ein gleichmäßiger Metallabtrag bezeichnet, der zu einem im Wesentlichen gleichmäßigen Querschnittsverlust führt. Bei nichtrostenden Stählen findet Flächenkorrosion sich am häufigsten in warmen, starken Säuren. Ihr Auftreten deutet darauf hin, dass die vorliegenden Bedingungen für die gewählte Stahlsorte zu aggressiv sind. Unter oxidierenden Bedingungen schaffen Sorten mit höherem Chromgehalt häufig Abhilfe, unter reduzierenden dürften sich Sorten mit mehr Chrom, Nickel, Molybdän und Kupfer günstiger verhalten. Bereits geringe Verunreinigungen mit Halogeniden oder oxidierenden Verbindungen können sich stark auf die Aggressivität von säurehaltigen Medien auswirken und deren oxidierende bzw. reduzierende Wirkung beeinflussen. Hierdurch verändern sich folglich auch die Korrosionseigenschaften des nichtrostenden Stahls. Zu bedenken ist, dass keine Legierung unter allen Bedingungen die beste ist, ebenso wie hochlegierte Sorten nicht unbedingt in allen Medien besser sein müssen als niedriger legierte.

## 6.2 Lokalkorrosion

### 6.2.1 Loch- und Spaltkorrosion

Loch- und Spaltkorrosion finden in eng abgegrenzten Bereichen der Oberfläche eines Metalls statt. Da die Passivschicht in unterschiedlichster Weise durchbrochen werden kann, ist Lokalkorrosion häufig der Grund für Schäden an nichtrostendem Stahl. Lochkorrosion tritt auf vergleichsweise sauberen, blanken Oberflächen auf, wobei angrenzende Bereiche häufig wenig oder gar keine Korrosion aufweisen. Spaltkorrosion entsteht in Bereichen wie Spalten oder Engstellen, in denen der nichtrostende Stahl nur einen eingeschränkten Austausch mit der Lösung insgesamt hat. Solche Stellen treten typischerweise bei überlappenden

Nähten, unter O-Ringen und Dichtungen, in Kupplungen, an den Nähten geschweißter Rohre sowie unter Schmutz, Öl, Fett, Markierungen, Klebeband, Schutzfolien, Zunder und Korrosionsprodukten auf. Wo Spalte entstehen, verändern sich die lokalen Bedingungen gegenüber der chemischen Zusammensetzung des Ausgangsmediums. Der Grund hierfür liegt in der Reaktion des Mediums mit den Metalloberflächen im Spalt und im Massentransport zwischen Spalt und Außenbereich. Die Folge: Im Spalt wird der Chloridgehalt höher und der pH-Wert niedriger. Es entsteht ein batterieähnlicher Effekt, der innerhalb des Spalts Korrosion fördert und sie im Bereich direkt neben dem Spalt verringert.

Lokalkorrosion ist ein besonders bedenklicher Schadensmechanismus, weil sie schnell voranschreitet und in relativ kurzer Zeit Durchbrüche und Lecks verursachen kann.

Loch- und Spaltkorrosion kann durch höhere Cr-, Mo- und N-Gehalte entgegengewirkt werden, weswegen diese Elemente in nichtrostenden Hochleistungssorten die Haupt-Legierungszusätze bilden. Ausgehend von Erfahrungswerten wurde die sog. Wirksumme (pitting resistance equivalent number, PREN) formuliert. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Legierungsgehalt eines Stahls und seiner relativen Beständigkeit gegen Lochkorrosion. Für austenitische und Duplex-Sorten nichtrostenden Stahls wird zumeist folgende Formel angesetzt:

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

Der PREN-Wert kann dabei helfen, den geeigneten nichtrostenden Stahl für chloridhaltige Umgebungen auszuwählen. Versagt eine Sorte mit einem bestimmten PREN-Wert unter den gegebenen Bedingungen durch Loch- oder Spaltkorrosion, muss eine Sorte mit höherer Wirksumme gewählt werden. Zwar lässt sich nicht angeben, um wie viel höher der Wert sein muss, um die

Korrosion zu verhindern; eine Sorte mit niedrigerem PREN-Wert würde aber mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ebenfalls versagen. Ist eine Sorte in bestimmten chloridhaltigen Umgebungen erfahrungsgemäß beständig, aber nicht verfügbar, ist es wirtschaftlich sinnvoll, eine andere Sorte mit gleicher oder höherer Wirksumme auszuwählen.

Auch wenn diese Formel erstellt wurde, um nichtrostende Stähle in eine Rangfolge der Lochkorrosionsbeständigkeit zu bringen, ermöglicht sie auch eine Einordnung hinsichtlich der Spaltkorrosionsbeständigkeit. Die Wirksumme beschreibt die Korrosionsbeständigkeit unter idealtypischen Bedingungen; Faktoren wie intermetallische Phasen, unsachgemäße Wärmebehandlung, Beeinträchtigungen der Oberfläche oder mangelnde Oberflächen-Nachbehandlung sind hierbei nicht berücksichtigt. Wegen dieser Beschränkungen sollte der PREN-Wert nur als Anhaltspunkt dienen. Auch ist er als Kriterium ungeeignet, wenn Allgemeinkorrosion als vorherrschender Schadensmechanismus zu erwarten ist.

Faktoren, die Loch- und Spaltkorrosion Vorschub leisten, sind erhöhte Halogenid-(insbesondere Chlorid-)Gehalte, Oxidantien, erhöhte Temperaturen und eher saure Bedingungen, die nicht ausgeprägt genug sind, um Flächenkorrosion auszulösen. Konstruktionsbedingte Spalte, etwa bei Schraubverbindungen, sowie Schichtbildungen im System, z. B. Verzunderungen, stellen ungünstige konstruktive und betriebsseitige Voraussetzungen dar. Nachlässige Verarbeitung kann ebenfalls Lokalkorrosion begünstigen, wenn sie raue Oberflächen schafft, die zu Ausgangspunkten von Korrosion werden. Schweißfehler wie Schlackeeinschlüsse, Einbrandkerben und Zündstellen oder Anlauffarben sind Bereiche, in denen es häufig zu Lochfraß kommt. Zuweilen liegen auch Fehler beim Aufschmelzen und Schweißen vor, die zu unerwünschten Einschlüssen oder intermetallischen Phasen führen, welche die Beständigkeit gegen Lokalkorrosion beeinträchtigen.

Laboruntersuchungen zur Loch- und Spaltkorrosion in stark korrosiven Test-

lösungen dienen dazu, verschiedene Legierungen im Hinblick auf ihre relative Korrosionsbeständigkeit in eine Rangfolge zu bringen und die Entwicklung verbesserter Sorten voranzutreiben. Die Rangfolge wird mittels der kritischen Lochfraßtemperatur (*critical pitting temperature*, CPT) bzw. der kritischen Spaltkorrosionstemperatur (*critical crevice temperature*, CCT) angegeben. Die kritische Temperatur ist der niedrigste Wert, ab dem bei steigender Temperatur Korrosion einsetzt (ein hoher Wert ist also besser als ein niedriger). Für alle Legierungen gilt: Der CCT-Wert ist niedriger als der CPT-Wert, weil Spaltkorrosion früher einsetzt als Lochkorrosion. **Abbildung 16** zeigt die kritischen Spalt- und Lochkorrosionstemperaturen für einige nichtrostende Stähle und drei Nickellegierungen, ermittelt in Standard-Eisenchlorid-Testlösungen. Zu beachten sind die überragende Beständigkeit austenitischer nichtrostender Hochleistungsstähle im Vergleich zur Standardsorte AISI 316 (EN 1.4401) und der deutliche Unterschied in CCT und CPT der jeweiligen Legierung.

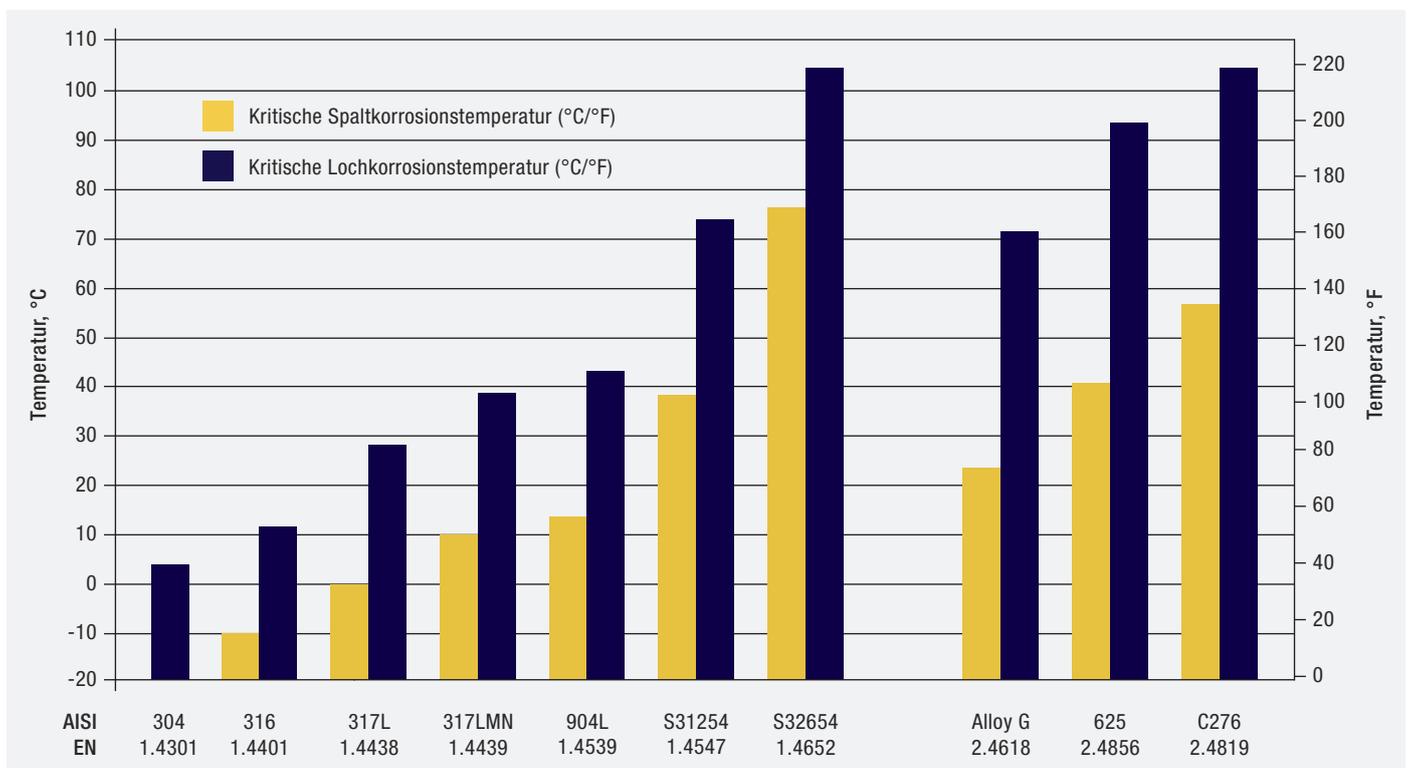


Abbildung 16: Kritische Loch- und Spaltkorrosionstemperaturen bei nichtrostenden Stählen und Nickellegierungen, gemessen in einer Testlösung von 6 Masse-% Eisenchlorid (10)

Die Testrangfolge und die entsprechenden kritischen Temperaturen erlauben keine detaillierte Voraussage der Korrosionsbeständigkeit einer Legierung in anderen Medien als der Testlösung; allerdings weisen Werkstoffe mit höheren CPT- und CCT-Werten im Allgemeinen unter einer Vielzahl realer Bedingungen eine höhere Korrosionsbeständigkeit auf. Praktische Betriebserfahrungen erlauben es, eine Korrelation zwischen den kritischen Temperaturen und dem tatsächlichen Verhalten festzustellen. So ist z. B. die Sorte AISI 316L (EN 1.4404) mit einem CPT-Wert gemäß ASTM G48 von 10 °C (50 °F) für Rohre von Dampfkondensatoren in Meerwasser nicht geeignet. Die Hochleistungssorte UNS S31254 (EN 1.4547) mit einer CPT von 75 °C (167 °F) ist demgegenüber praxisbewährt.

### 6.2.2 Auswirkung von Sekundärphasen auf die Lokalkorrosion

Zwar bestehen austenitische nichtrostende Stähle im Wesentlichen aus der Austenitphase, aber dennoch enthalten sie auch geringe Mengen anderer Phasen. Diese gehen auf den Stahlerzeugungsprozess zurück. So bilden sich u. a. kleine Mengen von oxidischen und sulfidischen Einschlüssen beim Frischen. Auch entsteht Ferrit, wie bereits in Abschnitt 3.1.1 erwähnt. Zusätzlich zu diesen üblichen Phasen, die keine wesentlichen Auswirkungen auf die Korrosionsbeständigkeit haben, können auch unerwünschte Sekundärphasen entstehen, etwa Chromcarbid, Chi- und Sigmaphase, die sie verschlechtern (s. Abschnitt 3.3). Auch wenn es weder nötig noch möglich ist, nichtrostende Stähle von unerwünschten Sekundärphasen völlig freizuhalten, so muss ihr Anteil dennoch eng begrenzt werden, denn überhöhte Gehalte können Loch- und Spaltkorrosion begünstigen, indem sie die Passivschicht destabilisieren.

Bei austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen können sich die Chi- und Sigmaphase im Zentrum von (Grob-)Bleichen bilden, weil sich Legierungselemente bei der Erstarrung dort anreichern. Ebenso können sie unter dem Einfluss hoher Temperaturen beim Schweißen oder Glühen an den Korngrenzen entstehen, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben. Solche Phasen

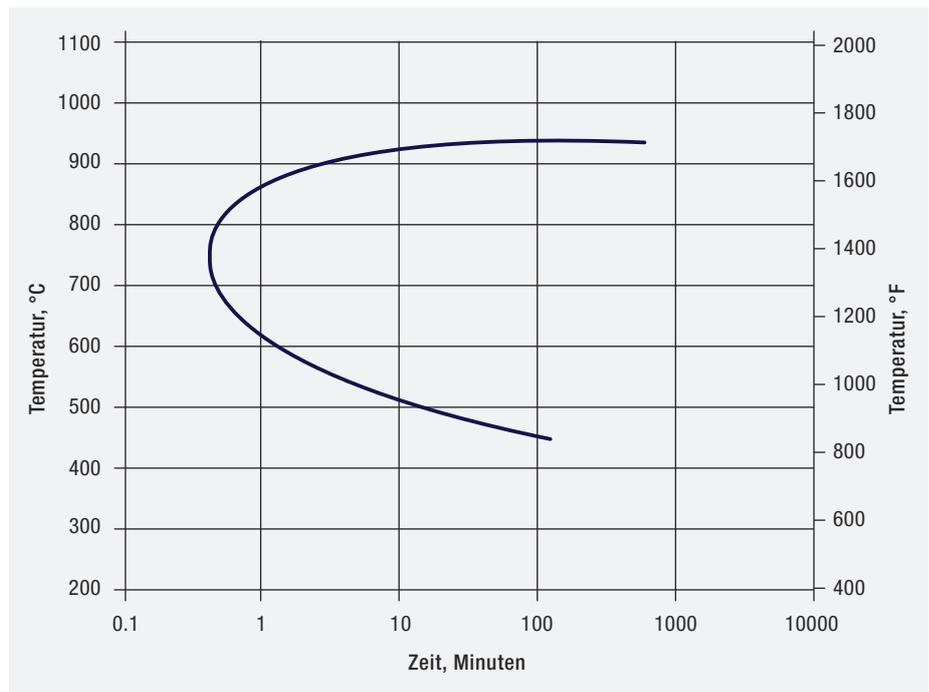


Abbildung 17: Isothermische Ausscheidungskinetik des austenitischen Hochleistungsstahls UNS S31254 (EN 1.4547) mit 6 % Molybdän (10)

sind reich an Chrom- und Molybdän. Diese Elemente werden benachbarten Bereichen des Stahls entzogen, was deren Korrosionsbeständigkeit herabsetzt. Entstehen solche Phasen bei der Stahlerzeugung in Blechmitte, sind sie unschädlich, weil die nachfolgende Walz- und Glühbehandlung das Gefüge wieder homogenisiert und die intermetallischen Phasen auflöst. Bilden sie sich dagegen bei der Verarbeitung an den Korngrenzen, können sie sehr nachteilig sein.

**Abbildung 17** verdeutlicht, bei welcher Temperatur und Einwirkungsdauer sich Sigma- und Chi-Phase bei einem Hochleistungsstahl mit 6 % Molybdän zu bilden beginnt. Es zeigt sich, dass bei 700 °C (1290 °F) das Zeitfenster bis zur Bildung schädlicher Sekundärphasen sehr klein ist. Die thermischen Zyklen des Schweißens und Glühens müssen also genau gesteuert und der Verbleib im kritischen Temperaturbereich begrenzt werden, um schädliche Sekundärphasen zu vermeiden. Haben sie sich gebildet, können sie durch vollständiges Lösungsglühen mit nachfolgender schneller Abkühlung aufgelöst werden, was die volle Korrosionsbeständigkeit der Legierung wiederherstellt.

### 6.2.3 Spannungsrissskorrosion

Das Zusammentreffen von Zugspannung, spezifischen Umgebungsbedingungen und einem dafür anfälligen nichtrostenden Stahl kann sog. Spannungsrissskorrosion (*stress corrosion cracking, SCC*) auslösen. Versagen durch Spannungsrissskorrosion tritt bei austenitischen nichtrostenden Stählen zumeist in chloridhaltigen Umgebungen auf (chloridinduzierte Spannungsrissskorrosion). Auch wenn sie die häufigste Variante der Spannungsrissskorrosion ist, gibt es auch andere Formen, die bei austenitischen nichtrostenden Stählen durch ätzende Substanzen, Wasserstoffsulfid und Polythionsäuren ausgelöst werden.

Voraussetzung für das Auftreten von Spannungsrissskorrosion ist, dass eine Art der Zugspannung gemeinsam mit spezifischen korrosiven Bedingungen auftritt. Die Zugspannung kann von den Einsatzbedingungen ausgehen, es kann sich aber auch um verarbeitungsbedingte Restspannungen z. B. nach dem Schweißen oder Umformen handeln. Da Restspannungen oft recht hoch sind, stellen sie häufig einen Einflussfaktor für das Auftreten von Spannungsrissskorrosion dar.

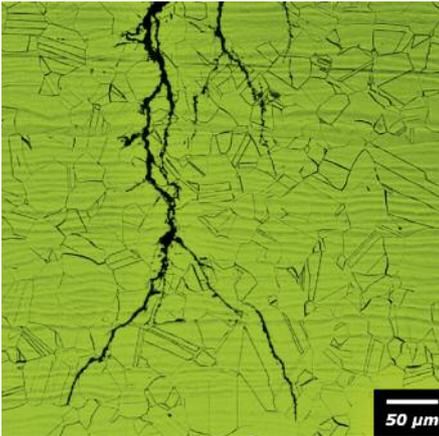


Abbildung 18: Ausbreitung von transkristalliner Spannungsrissskorrosion bei einem austenitischen nichtrostenden Stahl, der hohen Temperaturen und Chloridkonzentrationen ausgesetzt war.

### 6.2.3.1 Chloridinduzierte Spannungsrissskorrosion

Wenn chloridinduzierte Spannungsrissskorrosion bei geglühtem austenitischem nichtrostendem Stahl auftritt, stellt sie sich typischerweise in Form verzweigter interkristalliner Risse dar (**Abbildung 18**), deren Morphologie durch die Spannungsverteilung bestimmt wird. Sensibilisierung verstärkt die Anfälligkeit für Spannungsrissskorrosion und leistet interkristallinen Rissen Vorschub. Große Spannung, hohe Temperaturen, hoher Chloridgehalt und niedriger pH-Wert erhöhen jeweils die Auftretenswahrscheinlichkeit von Spannungsrissskorrosion. Die austenitischen Standardstähle einschließlich der Sorten AISI 304/304L, 316/316L (EN 1.4301/1.4307, 1.4401/1.4404) sowie die Stähle der 200er-Serie sind allesamt anfällig für diese Korrosionsart, selbst bei vergleichsweise niedrigen Chloridgehalten und Temperaturen. Wenngleich austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle deutlich beständiger gegen chloridinduzierte Spannungsrissskorrosion sind, so sind sie dagegen dennoch nicht immun und können sie bei relativ hohen Temperaturen und Chloridgehalten erleiden. **Abbildung 19** basiert auf einer Auswertung von Fallstudien mit den dazugehörigen Daten zu chloridinduzierter Spannungsrissskorrosion bei den Sorten AISI 304 (EN 1.4301) und AISI 316 (EN 1.4401) in neutralen Wässern. Schon ein Chloridgehalt von weniger als 1 ppm reicht nahe dem Siedepunkt oder darüber aus, Rissbildung zu ver-

ursachen. Bei Temperaturen unterhalb von 50 °C (122 °F) zeigen diese Stähle nur selten Spannungsrisse, sofern sie vollständig eingetaucht sind. Unter aufkonzentrierenden Bedingungen, etwa bei abwechselnd nassen und trockenen Oberflächen unter Dämmungen oder bei Feuchtigkeitsniederschlag auf nichtrostendem Stahl kann chloridinduzierte Spannungsrissskorrosion durchaus auch unterhalb von 50 °C (122 °F) auftreten.

Austenitische nichtrostende Stähle, deren Nickelgehalt über den 8–12 % der Sorten AISI 304 (EN 1.4301, 1.4307, 1.4541) und 316 (EN 1.4401, 1.4404, 1.4571) liegen, verhalten sich in puncto chloridinduzierte Spannungsrissskorrosion deutlich günstiger. So setzt Spannungsrissskorrosion bei Sorten mit 6 % Mo (**Abbildung 19**) erst bei deutlich höheren Temperaturen und Chloridgehalten ein. Die Temperaturschwelle liegt deutlich über 100 °C (212 °F), was darauf hindeutet, dass siedende neutrale Chloridlösungen unter atmosphärischen Bedingungen bei Hochleistungsarten mit 6 % Mo voraussichtlich keine Spannungsrissskorrosion auslösen –

eine deutliche Verbesserung gegenüber den Sorten AISI 304 (EN 1.4301, 1.4307, 1.4541) und AISI 316 (EN 1.4401, 1.4404, 1.4571).

### 6.2.3.2 Spannungsrissskorrosion in anderen Medien

Stark ätzende Medien erzeugen bei nichtrostendem Stahl eine Art von Spannungsrisssen, die als Laugenrissbildung bezeichnet wird. Die Sorten AISI 304 (EN 1.4301, 1.4307, 1.4541) und AISI 316 (EN 1.4401, 1.4404, 1.4571) sowie andere Standardsorten sind hierfür bei Temperaturen oberhalb von ca. 100 °C (212 °F) anfällig. Laugenrissbildung kann interkristallin oder mit einer verzweigten transkristallinen Morphologie auftreten, wodurch sie häufig von chloridinduzierter Spannungsrissskorrosion nicht zu unterscheiden ist. Ein Anstieg des Nickelgehalts erhöht die Rissbeständigkeit in ätzenden Medien – alle Hochleistungsarten übertreffen also die Standardsorten. Gleichwohl sind für Anwendungen wie Natronlauge-Verdampfer, die bei fast 150 °C (300 °F) unter äußerst aggressiven Bedingungen arbeiten, nur Nickellegierungen geeignet.

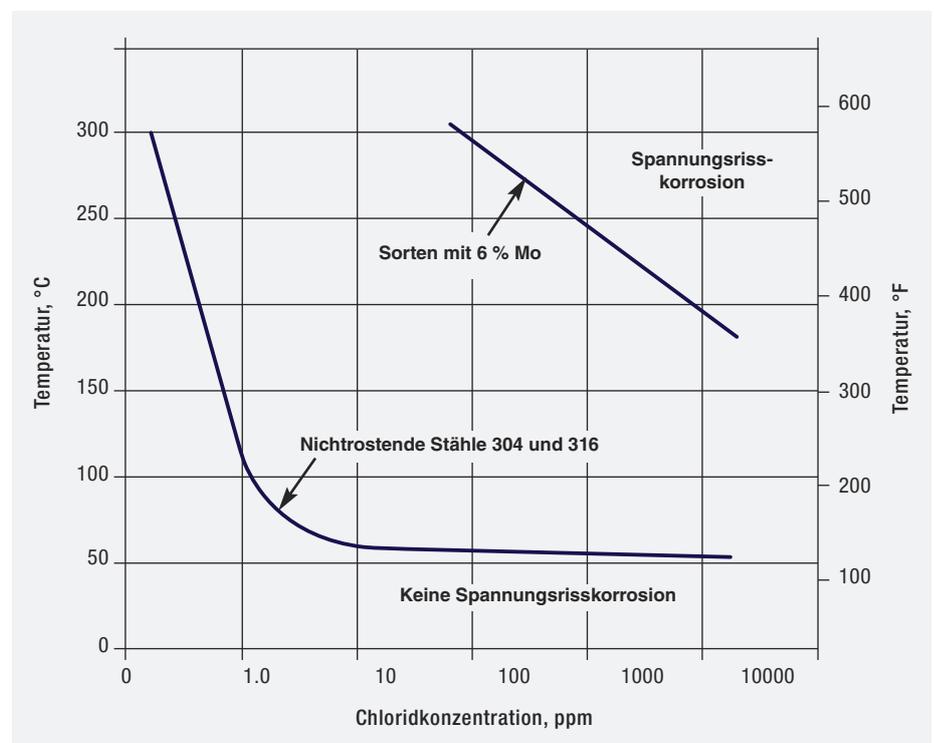


Abbildung 19: Schwellen der Spannungsrissskorrosion in nahezu neutralem chloriertem Wasser bei den Stählen AISI 304 und 316 (EN 1.4301 und 1.4401) im Vergleich zu einem nichtrostenden austenitischen Hochleistungsstahl mit 6 % Mo

Unter Bedingungen, in denen ein relativ hoher Wasserstoffgehalt vorliegt, kann es zu Rissbildung kommen, die als Wasserstoffversprödung bekannt ist. Dazu zählen Wasserstoff unter hohem Druck, starke Säuren sowie saure Lösungen mit Substanzen wie Cyaniden, Arsen, Antimon oder Sulfiden, welche die Wasserstoff-Rekombinationsreaktion beeinträchtigen und das Eindringen von Wasserstoffionen in das Metall fördern. Anwendungen, bei denen galvanische Ströme auftreten, z. B. das Galvanisieren oder kathodischer Schutz, können ebenfalls Wasserstoffversprödung auslösen. Risse, die aus dem Eindringen von Wasserstoff in das Metall resultieren, verlaufen zumeist interkristallin. In geglühtem Zustand sind alle austenitischen nichtrostenden Standardstähle gegen Wasserstoffversprödung sehr beständig – mit Ausnahme metastabiler Sorten wie AISI 301 und 201 (EN 1.4310 oder 1.4372), die Martensit enthalten können. Allerdings kann jede Sorte, die zur Steigerung von Festigkeit und Härte stark umgeformt wurde, dafür anfällig sein.

Wasserstoffversprödung unter Einwirkung von Sulfiden – sulfidinduzierte Rissbildung – ist in der Öl- und Gasindustrie ein weitverbreitetes Problem. Die NACE-Norm MR0175 sowie ISO 5156 enthalten detaillierte Informationen über zugelassene Sorten und Härtegrade, die akzeptabel sind, wenn sulfidinduzierte Rissbildung vermieden werden soll.

Polythionsäure ( $H_2S_4O_6$ ) kann bei sensibilisiertem austenitischem nichtrostendem Stahl Spannungsrisskorrosion verursachen. Die Rissmorphologie ist dabei interkristallin. Durch Einsatz lösungsgeglühter Stähle AISI 304L oder 316L (EN 1.4307 oder 1.4404) bzw. sensibilisierungsbeständiger Sorten wie AISI 321 und 347 (EN 1.4541 und 1.4550) lässt sich dieses Problem vermeiden. Allerdings können selbst niedrig kohlenstoffhaltige Stähle sensibilisiert werden, wenn sie lange in entsprechenden Temperaturbereichen verbleiben. Bei den stabilisierten Sorten kann ein abschließendes Stabilisierungsglühen (das bei niedrigeren Temperaturen stattfindet als das Lösungsglühen) erforderlich sein, um Angriffen vorzubeugen.

### 6.3 Interkristalline Korrosion/ Korrosion durch Sensibilisierung

Interkristalline Korrosion tritt schnell an den Korngrenzen oder in deren Nähe auf, ohne dass die Körner selbst nennenswert angegriffen würden. Bei austenitischen nichtrostenden Standardstählen ist diese Art der Korrosion zumeist die Folge von Sensibilisierung während des Schweißens oder der Wärmebehandlung (siehe Abschnitt 3.3). Je nach Stärke der Sensibilisierung und Korrosivität des Mediums kann die Korrosion unterschiedliche Erscheinungsformen annehmen. Bei mäßiger Sensibilisierung ist Lochfraß wahrscheinlich. Existiert ein zusammenhängender Verbund von Chromcarbiden entlang der Korngrenzen, tritt interkristalline Korrosion auf und einzelne Körner können sich von der Oberfläche lösen. Eine Kombination von sensibilisiertem Mikrogefüge, Zugspannung und korrosiven Einflüssen kann zu intergranularer Spannungsrissbildung führen. Konstrukteure und Verarbeiter haben drei Möglichkeiten, Sensibilisierung und nachfolgende interkristalline Korrosion zu vermeiden:

- Verwendung einer kohlenstoffarmen Sorte, z. B. AISI 201L (EN 1.4371), 304L (1.4307), 316L (1.4404) oder 317L (1.4438). Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle werden ausschließlich in kohlenstoffarmer Version hergestellt. Der niedrige Kohlenstoffgehalt verlängert die Zeit, in der bei der Abkühlung die Bildung von Chromcarbiden eintritt, d. h. bis zur Sensibilisierung (Abbildung 8). So lassen sich auch dickwandige Bauteile warmumformen und schweißen, ohne dass es zu Sensibilisierung kommt. Sind diese Stähle allerdings unter Betriebsbedingungen längere Zeit dem kritischen Temperaturbereich ausgesetzt, verhindern auch L-Sorten die Sensibilisierung nicht.
- Verwendung einer stabilisierten austenitischen Sorte wie AISI 321 (EN 1.4541) oder 347 (1.4550), bei der ein stabilisierendes Element den Kohlenstoff bindet. Hierzu dienen üblicherweise Titan (Ti) und Niob (Nb). Diese Sorten erfordern eine geeignete stabilisierende Wärmebehandlung, bei der sich vor allem

Titan- und Niobcarbide bildet, während das Chrom in fester Lösung bleibt und weiterhin für Korrosionsbeständigkeit sorgt.

- Lösungsglühen des sensibilisierten Werkstoffs zur Wiederherstellung seiner Korrosionsbeständigkeit. Die hierfür empfohlenen Temperaturen liegen bei 1040–1175 °C (1900–2150 °F). Das Lösungsglühen mit nachfolgender schneller Abkühlung muss dabei die letzte Wärmebehandlung sein, welcher das Bauteil ausgesetzt ist. Die Behandlung vermindert nicht das Risiko, dass Bauteile im Betrieb bei langem Aufenthalt im kritischen Temperaturbereich sensibilisiert werden.

Nichtrostende Hochleistungsstähle sind niedrig-kohlenstoffhaltige Legierungen, die so viel Stickstoff enthalten, dass Sensibilisierung normalerweise nicht auftritt. Allerdings können sich auch bei ihnen intermetallische Phasen bilden, wenn sie Temperaturbedingungen ausgesetzt sind, die, wie oben beschrieben, auch bei Standardsorten zu Sensibilisierung führen. Intermetallische Phasen vermindern Lochkorrosionsbeständigkeit und Zähigkeit.

#### 6.3.1 Sensibilisierung beim Schweißen/ Kornerfall

Während des Schweißens wird der Werkstoff bis zur (oder bis nahe an die) Schmelztemperatur erhitzt. Beim Erhitzen und Abkühlen befinden sich die Schweißnaht und die Wärmeeinflusszone eine gewisse Zeit im Temperaturbereich für Sensibilisierung. Ob Sensibilisierung eintritt, hängt von der Legierung, der Werkstoffdicke und der Wärmeeinbringung ab. **Abbildung 20** illustriert schematisch den typischen Temperaturverlauf in der Schweißnaht und den benachbarten Bereichen, die für Kornerfall anfällig sind. Die Abbildung zeigt auf beiden Seiten der Schweißnaht eine sensibilisierte Zone. Kornerfall lässt sich durch genaue Steuerung der Schweißparameter sowie die Nutzung eines oder mehrerer der oben genannten Ansätze minimieren.

Aus den in Abschnitt 6.3 genannten Gründen erleiden austenitische nicht-

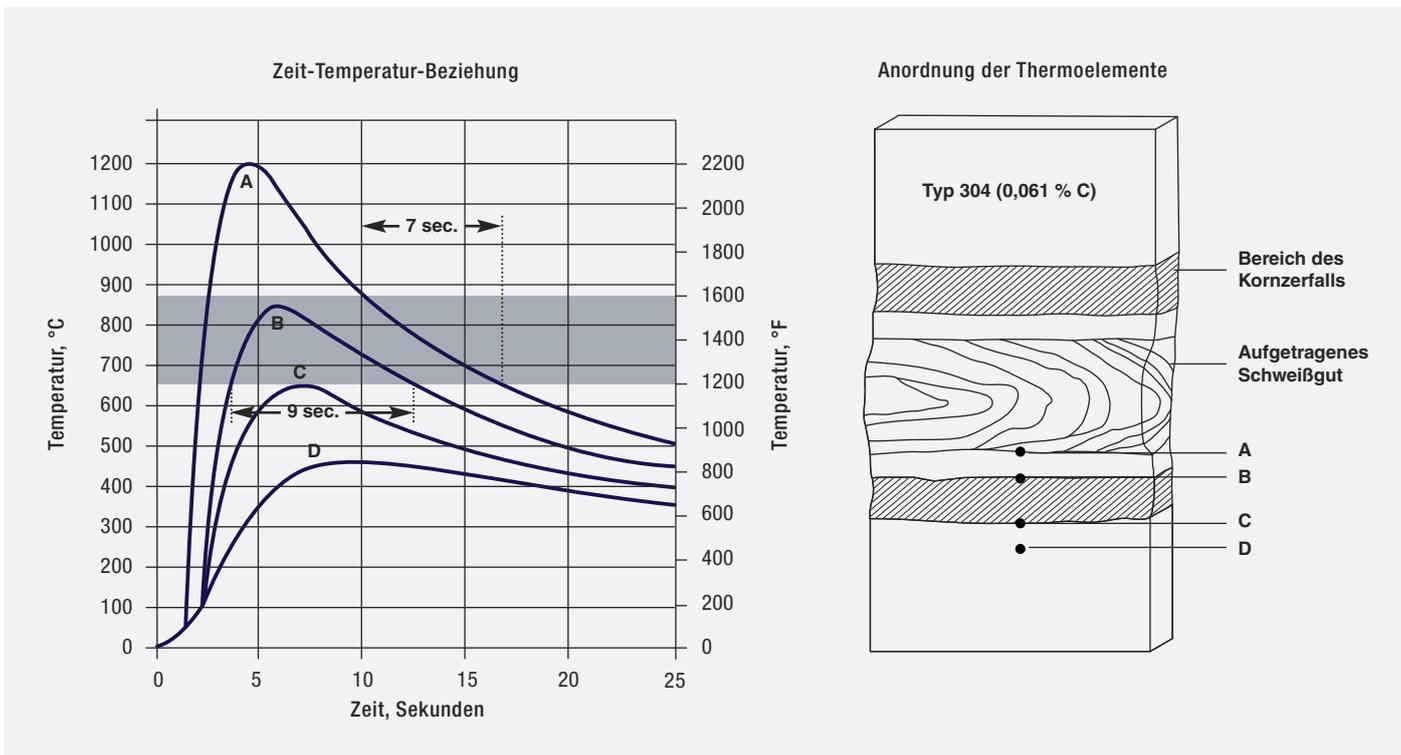


Abbildung 20: Zeit-Temperatur-Profil des Lichtbogen-Handschweißens von nichtrostendem Stahl AISI 304 (EN 1.4301) und sich daraus ergebende Zonen der Sensibilisierung und des Kornzerfalls; der Temperaturbereich, in dem eine schnelle Sensibilisierung stattfindet, ist in der linken Zeichnung als graues Band gekennzeichnet (14).

rostende Hochleistungsstähle beim Schweißen in der Regel keine Sensibilisierung durch Chromcarbidgebildung. Allerdings kann der Temperaturzyklus beim Schweißen die Bildung intermetallischer Phasen begünstigen, die nachteilig für die Lochkorrosionsbeständigkeit sind. Die Schweißparameter müssen so gewählt werden, dass der Verbleib im kritischen Temperaturbereich möglichst kurz gehalten wird: Wärmeeintrag und Zwischenlagentemperatur müssen begrenzt, mehrlagige Schweißnähte auf ein Mindestmaß reduziert werden (siehe Kapitel 12). Geringer Wärmeeintrag und niedrige Zwischenlagentemperaturen gehen auch mit schnellerer Abkühlung einher und minimieren dadurch die Zeit innerhalb des kritischen Temperaturbereichs.

### 6.3.2 Messerlinienkorrosion

Messerlinienkorrosion ist eine besondere Form der Sensibilisierung, die ausschließlich bei stabilisierten Sorten wie AISI 321 (EN 1.4541) oder 347 (1.4550) auftritt. Werden beim Schweißen

Titan- oder Niobcarbide gelöst, können sich bei der anschließenden Wärmebehandlung Chromcarbide bilden. Dieses Phänomen ergibt eine sehr schmale sensibilisierte Zone entlang der Schweißnaht, daher ihr Name. Die meisten austenitischen Stähle und folglich auch die Hochleistungsarten sind für Messerlinienkorrosion nicht anfällig, weil sie nicht stabilisiert sind.

## 6.4 Galvanische Korrosion

Wenn ein Metall in ein korrosives Medium eingebracht wird, entwickelt es ein Korrosionspotential, das die Korrosionsrate dieses Werkstoffs in dem jeweiligen Medium widerspiegelt. Metalle mit sehr niedriger Korrosionsrate haben ein positives Korrosionspotential und sind edel, solche mit hoher Korrosionsrate weisen ein negatives Korrosionspotential auf und sind aktiv. **Abbildung 21** zeigt die Korrosionspotentiale verschiedener Metalle und Legierungen in Meerwasser. Diese Darstellung wird als galvanische Reihe bezeichnet – in diesem Fall bezogen auf Meerwasser.

Die Wahrscheinlichkeit von galvanischer Korrosion ist hoch, wenn drei Faktoren zusammentreffen: (a) Zwei oder mehr Metalle werden gemeinsam in ein korrosives Medium eingetaucht, (b) sie sind miteinander in Kontakt bzw. elektrisch leitend verbunden und (c) sie haben in dem jeweiligen Medium unterschiedliche Korrosionspotentiale. Verglichen mit der Korrosionsrate, die das jeweilige Metall für sich in demselben Medium hätte, korrodiert bei dieser Korrosionsart das aktivere Metall schneller; gleichzeitig wird das edlere gegen Korrosion geschützt und korrodiert langsamer. Steht beispielsweise unlegierter Stahl in Verbindung, ist beschleunigte (galvanische) Korrosion zu erwarten, weil der unlegierte Stahl aktiver ist und zwischen beiden ein großer Unterschied im Korrosionspotential besteht.

Die galvanische Reihe kann dazu dienen, vorauszusagen, ob metallische Mischverbindungen zu galvanischer Korrosion führen. Metalle und Legierungen, die in der galvanischen Reihe nahe beieinander



der Oberfläche des aktiven Metalls. Folglich ist die galvanische Korrosion in dem Maße stärker, wie der Flächenanteil des edleren gegenüber dem des unedleren steigt. Ein bekanntes Beispiel für ein ungünstiges Flächenverhältnis ist der Einsatz von Nieten aus unlegiertem Stahl (mit kleiner Oberfläche) zur Befestigung von Blechen aus nichtrostendem Stahl (mit großer Oberfläche).

Lösungen, galvanische Korrosion zu minimieren, liegen darin, metallische Mischverbindungen zu vermeiden, Isolatoren zu verwenden, um die unterschiedlichen Metalle elektrisch voneinander zu trennen, Metalle miteinander zu paaren, die in der galvanischen Reihe (Abbildung 21) nahe beieinander liegen oder die Flächenverhältnisse so zu gestalten, dass das korrosionsanfälliger Material einen deutlich höheren Flächenanteil hat. Ist eine ungünstige Paarung nicht zu vermeiden, lässt sich galvanische Korrosion verhindern, indem der edlere Werkstoff im Bereich der Kontaktfläche lackiert oder anderweitig beschichtet wird. Es

sollte also nicht die weniger edle Metalloberfläche beschichtet werden, denn jeder Defekt in der Schutzschicht würde ein besonders ungünstiges Verhältnis von edler zu aktiver Oberfläche ergeben und letztere würde im Bereich des Oberflächendefekts beschleunigt angegriffen.

### 6.5 Einfluss der Verarbeitung auf die Korrosionsbeständigkeit

Das vorliegende Kapitel war bisher vor allem den metallurgischen und medienseitigen Faktoren der Korrosion gewidmet. Viele Korrosionsprobleme, die unter Praxisbedingungen auftreten, sind allerdings auf unsachgemäße Verarbeitung zurückzuführen. Die Korrosionsbeständigkeit von nichtrostendem Stahl ist an das Vorhandensein einer durchgängigen Passivschicht gebunden. Leider führen manche Verarbeitungspraktiken zu einer Schädigung der Passivschicht und beeinträchtigen damit die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffs. Zwei große Bereiche von Schadensursachen

lassen sich erkennen: Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächenkontamination. Die Oberflächenbeschaffenheit umfasst übermäßige Rauheit, Restspannungen und Chromverarmung. Kontamination bedeutet die Ablagerung von Fremdstoffen auf der Oberfläche. Die Liste der möglichen Verunreinigungen ist lang, zu den häufigsten zählen jedoch chloridhaltige Markierungen oder Lösungsmittel, Fremdeisenkontamination durch Werkzeuge sowie Verzunderung durch Glühen und Schweißen. Kapitel 7 und 14 behandeln diese Themen und geben Empfehlungen, wie Verarbeiter deren Auswirkungen vermeiden oder minimieren können.

Glücklicherweise lässt sich der verarbeitungsbedingten Korrosion durch ein Verständnis ihrer Ursachen und entsprechende Gegenmaßnahmen vorbeugen. Hierzu gehört ein gutes Handling ebenso wie eine gründliche abschließende Reinigung. **Tabelle 7** fasst typische Korrosionsprobleme und deren verarbeitungsbedingte Ursachen zusammen.

Tabelle 7: Möglicher Einfluss von Verarbeitungsverfahren auf die Korrosionsart (der tatsächliche Einfluss ist evtl. von einer Vielzahl von Einflüssen abhängig)

Verarbeitungsvorgang	Gebräuchliche Sorten nichtrostenden Stahls			
	304, 316 1.4301, 1.4401	304L, 316L 1.4307, 1.4404	321, 347, 316Ti 1.4541, 1.4550, 1.4571	Hochleistungssorten
Warmumformung (nach vollständiger Entfernung von Zunder aus der vorangegangenen Wärmebehandlung)	IGK	IGK	IGK	IGK, LK, SK
Kaltumformung	SRK	SRK	SRK	SRK
Zerspanung	SRK	SRK	SRK	SRK
Schweißen				
thermische Effekte	IGK		MSK	LK, SK
spannungsbedingte Effekte	SRK	SRK	SRK	SRK
Anlauffarben	LK, SK	LK, SK	LK, SK	LK, SK
grob geschliffene Oberflächen	LK, SK	LK, SK	LK, SK	LK, SK
Mechanische (Schraub-, Niet- oder Falz-)Verbindungen	SK, GK	SK, GK	SK, GK	SK, GK
Fremdeisenkontamination (verarbeitungsbedingt)	LK, SK	LK, SK	LK, SK	LK, SK

IGK = intergranulare Korrosion, LK = Lochkorrosion, SK = Spaltkorrosion, SRK = Spannungsrissskorrosion, MSK = Messerschnittkorrosion, GK = galvanische Korrosion

# 7 Verarbeitung – Oberflächen glatt und sauber halten

Bei der Verarbeitung nichtrostender Stähle lautet die wichtigste Regel, die Oberflächen glatt und sauber zu halten. Nachlässigkeiten bei Handhabung und Verarbeitung können zur Durchbrechung der Passivschicht und zu verminderter Korrosionsbeständigkeit führen. Oberflächenverunreinigungen, insbesondere durch Partikel von unlegiertem Stahl sowie Zunder, aber auch Oberflächen, die bei der Verarbeitung, beim Transport oder auf der Baustelle aufgeraut und verkratzt werden, sind weitverbreitete Schäden. Geschliffene nichtrostende Stähle mit einer Rauheit  $R_a$  von mehr als  $50 \mu\text{m}$  (20 Mikrozoll) sind zumeist in ihrer Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigt. Einbußen an Korrosionsbeständigkeit

durch grobe Schriffe können durch Passivierung minimiert werden.

Verarbeiter sollten ein genaues Prozedere festlegen, wie die Oberfläche geschützt wird, während der Werkstoff die verschiedenen Arbeitsvorgänge durchläuft. Sie sollten Warenannahme und Lagerung, alle innerbetrieblichen Transport- und Verarbeitungsschritte sowie die Lagerung der Fertigerzeugnisse, deren Auslieferung und Handhabung unmittelbar vor der Montage umfassen. Das Verfahren sollte die Nachverfolgbarkeit beginnend bei den Werkszertifikaten, der Lieferung und Lagerung der Ausgangsprodukte bis zur Auslieferung des fertigen Teils sicherstellen.

## 7.1 Anlieferung und Lagerung

Verarbeiter sollten nichtrostenden Stahl in wasserfester Schutzverpackung bestellen und möglichst in geschlossenen Fahrzeugen anliefern lassen. Das gilt besonders, wenn die Gefahr der Beaufschlagung mit halogenid-(salz-)haltigen Verschmutzungen besteht, etwa beim Transport über See oder auf der Straße bei Tausalzeinsatz. Lieferungen auf offenen Fahrzeugen sollten geprüft werden. Sofern Wasser in die Verpackung eingedrungen sein könnte, sollte diese geöffnet werden, damit sie austrocknen kann. Wenn Salz auf die Oberflächen gelangt ist, sollte die Verpackung geöffnet und die Oberfläche gründlich



Lagerung für nichtrostende Stahlcoils und Zuschnitte in einem sauberen Service-Center © Vogel-Bauer

abgespült werden. Verpackter nichtrostender Stahl sollte in einem sauberen und trockenen Innenraum gelagert werden.

Grobbleche, Rohre und andere großformatige Produkte können, falls erforderlich, in überdachten Außenbereichen gelagert werden. Diese sollten frei von Salz aus Meeresluft oder Streumitteln sein, ebenso von Luftverschmutzungen wie sauren Gasen oder Schleifstaub. Regale sollten so konstruiert sein, dass sie eine Kontamination mit Fremdeisen ausschließen und den Kontakt mit stehendem Wasser verhindern. Öle, Farben oder andere vor Ort aufgebrauchte schützende Beschichtungen sollten bei Lagerung und Verarbeitung nicht benutzt werden.

Nichtrostender Stahl sollte in einem sauberen Bereich gelagert werden, getrennt von unlegiertem Stahl und in größerem Abstand zu dessen Verarbeitung. Die gemischte Verarbeitung von nichtrostendem und unlegiertem Stahl im selben Arbeitsbereich macht eine Verunreinigung der Oberflächen des nichtrostenden Stahls mit Schleifstäuben wahrscheinlich. Dieser Aspekt ist besonders wichtig, denn Oberflächen von nichtrostendem Stahl, die mit Partikeln von unlegiertem Stahl (Fremdeisen) kontaminiert sind, können Flugrost zeigen, der im späteren Betrieb zu Lochkorrosion führen kann.

Blechezuschnitte sollten horizontal in Holzverpackungen gelagert werden, damit sie plan bleiben und die Kanten nicht beschädigt werden. Sie sollten mit Papier- oder Kunststoff-Zwischenlagen gestapelt sein, damit die Oberflächen in ihrer Qualität erhalten bleiben. Karton oder andere Materialien, die Abdrücke hinterlassen könnten, sollten bei hochglänzenden Oberflächen vermieden werden. Kisten sollten abgedeckt werden, um die Ablagerung von Verschmutzungen aus der Luft zu minimieren. Dickere Erzeugnisse sollten (nahezu) senkrecht in Gestellen an einem überdachten, trockenen Ort gelagert werden, so dass Staubablagerungen und Fußandrücke vermieden werden.

Nichtrostender Stahl darf nicht im Kontakt mit oder in der Nähe von verzinktem Stahl und Kupfer gelagert werden.

Oberflächenverunreinigungen mit Kupfer sowie mit Zink und anderen Metallen mit niedriger Schmelztemperatur können bei Schweißen oder Wärmebehandlung zu Versprödung führen (Flüssigmetallversprödung oder Löttrissigkeit).

## 7.2 Schutzfolien

Nichtrostende Flachprodukte können mit einer Schutzfolie bestellt werden, die speziell darauf ausgelegt ist, die Oberflächen während des Laserschneidens, Biegens, Rollformens, Stanzens und anderer Verarbeitungsschritte sowie beim Transport an die Baustelle zu schützen. Solche Folien, die während der Verarbeitung auf dem Blech verbleiben können, vermindern die Gefahr von Kratzern, Kerben und Oberflächenverunreinigungen durch Metallpartikel. Sie sind besonders in Anwendungen mit hohen optischen und funktionellen Ansprüchen von Nutzen, etwa bei Architekturbauteilen, Hausgeräten oder Oberflächen für den Lebensmittelkontakt. Diese abziehbaren Folien verbleiben während der kurzfristigen Lagerung sowie der Verarbeitung auf dem Blech.

Derartige Folien sind i. d. R. nicht dazu bestimmt, ultravioletter Strahlung ausgesetzt zu werden, z. B. Sonnenlicht. Lässt sich die Einwirkung von UV-Licht nicht vermeiden, muss ggfs. die Folie vor dem Transport des fertigen Teils und seinem Einbau entfernt und neu aufgebracht werden. Auch kurzzeitige UV-Einwirkung kann Folien, die darauf nicht ausgelegt sind, schädigen. Sie werden dann brüchig und lassen sich kaum noch ohne Spuren von der Oberfläche entfernen. Auf der Baustelle z. B., wo sie (auch kurzzeitig) der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, schützen UV-beständige Folien zuverlässig die Oberfläche von Bauteilen. UV-beständige Folien sind normalerweise auch besser gegen extreme Temperaturschwankungen beständig, wie sie bei der Lagerung auftreten können.

Alle Folien haben eine begrenzte Lebensdauer, die von ihrem Herstellungszeitpunkt und den Einwirkungsbedingungen abhängt, darunter von den auftretenden Höchsttemperaturen und anderen die Haltbarkeit beeinflussenden Faktoren. Die Lebensdauer der Folien kann, je nach den Beanspruchungsbedingungen, drei, aber auch neun Monate betragen. Die



Eine abziehbare Folie schützt die Oberfläche des nichtrostenden Stahls während der Verarbeitung und des Transports vor Kratzern und Schmutz.  
© IMO A

verbleibende Lebensdauer der Folie sollte festgestellt werden; vor Ablauf ihres Ablaufdatums ist sie zu entfernen. Beim Kauf von foliengeschützten Produkten empfiehlt es sich, Restlebensdauer der Folie und Lagerungsbedingungen wie Temperatur und UV-Einstrahlung zu erfragen.

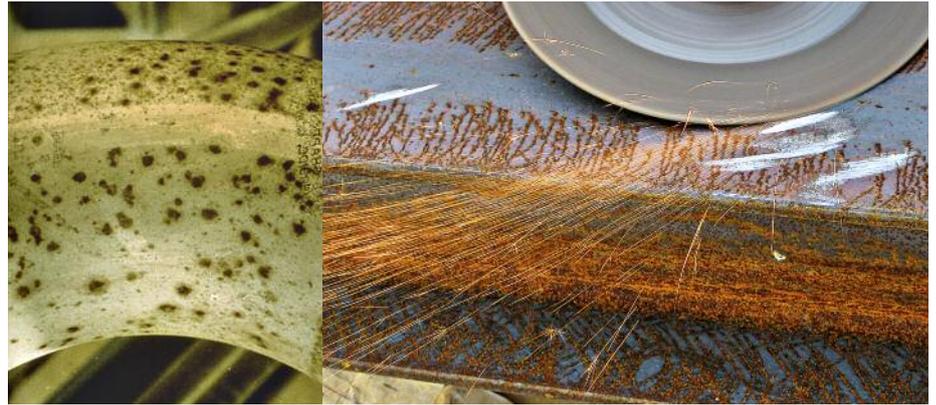
Ungünstigstenfalls können nach dem Abziehen Folienreste auf der Oberfläche verbleiben, die schwierig zu entfernen sind. Es gibt die unterschiedlichsten Klebstoffe. Daher empfiehlt es sich, Empfehlungen zu deren Entfernung vom Folienhersteller einzuholen. Manche lassen sich mit haushaltsüblichen Reinigern entfernen, andere erfordern spezielle Reinigungsmittel. Kleberreste sind so schnell wie möglich zu beseitigen.

Auch foliengeschützter nichtrostender Stahl sollte unter kontrollierten Temperaturbedingungen und bei niedriger Feuchtigkeit gelagert werden. Alle Folien sind für Feuchtigkeit und Regen durchlässig, aber auch für darin gelöste Salze und Schadstoffe. Hierdurch kann Spaltkorrosion entstehen, insbesondere wenn Chloride vorliegen, etwa in Küstennähe oder bei Streusalzeinsatz. Aus diesem Grunde sollte nichtrostender Stahl, der für eine potentiell chloridbeaufschlagte Außenanwendung vorgesehen ist, bis zum Einbau abseits der Baustelle gelagert werden und die Folie entfernt werden, sobald die Teile montiert sind.

### 7.3 Vermeidung von Fremdeisenkontamination

Der Kontakt mit unlegiertem Stahl ist in allen Phasen des Transportes und der Verarbeitung zu vermeiden. Klemmen, Bänder, Ketten, Haken und andere Utensilien sollten entweder aus nichtrostendem Stahl bestehen oder mit Kunststoff oder Pappe abgedeckt sein, so dass Fremdeisenkontamination vermieden wird. Für die Verarbeitung nichtrostender Stähle sollte ein gesonderter Werkzeugsatz vorgehalten werden. Dazu ist es hilfreich, die für Stahl und nichtrostenden Stahl bestimmten Werkzeuge farblich zu kennzeichnen.

Schleifscheiben und -bänder sowie Strahlmittel für nichtrostenden Stahl (Glas- oder Keramikperlen, Kugeln aus Siliziumcarbid oder nichtrostendem Stahl) müssen ebenfalls frei von Fremdeisen sein und müssen nichtrostendem Stahl vorbehalten bleiben. Wurden sie einmal für unlegierten Stahl eingesetzt, sind sie für nichtrostenden Stahl nicht mehr brauchbar. Kontaminierte Schleif- und Strahlmittel arbeiten eisenhaltige Partikel in die Oberfläche ein und können zu Rost führen. Stahlkugeln sind als Strahlmittel für nichtrostenden Stahl ungeeignet. Aus demselben Grund sind auch für die Reinigung nur Bürsten

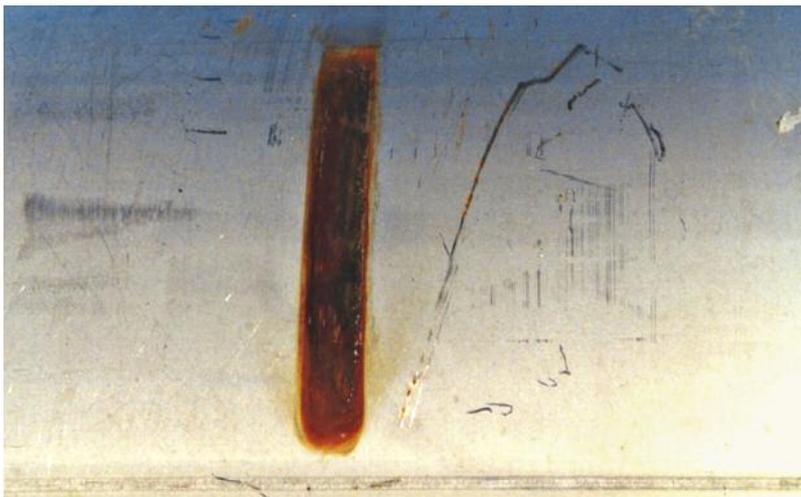


Die Oberfläche des nichtrostenden Stahlbogens links wurde mit Partikeln aus unlegiertem Stahl kontaminiert. Eine mögliche Ursache liegt in Schleifarbeiten in unmittelbarer Nähe und der Einwirkung von Funkenflug auf die nichtrostende Stahloberfläche.

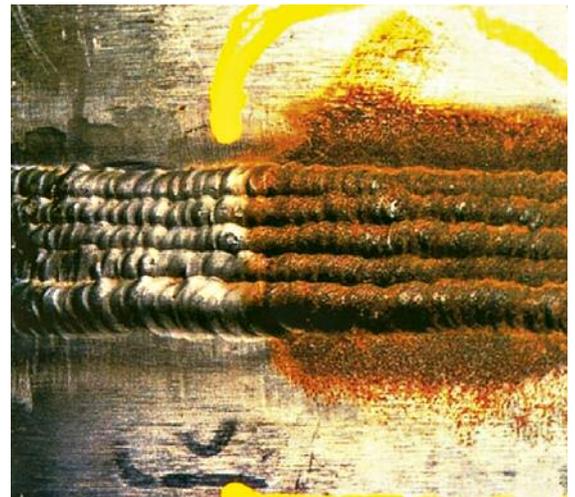
oder Metallschwämme aus nichtrostendem Stahl zu verwenden. Auch sie dürfen nicht zuvor bereits für unlegierten Stahl benutzt worden sein.

Rollen, Pressen und Matrizen erfordern, wenn sie zuvor für unlegierten Stahl eingesetzt wurden, eine gründliche Reinigung von Stahlpartikeln und Oxiden. Schutzfolie oder eine Papierzwischenlage kann die Übertragung von Stahlpartikeln von Umformwerkzeugen auf nichtrostenden Stahl verhindern. Hat Fremdeisenkontamination stattgefunden, sollte sie

entfernt und die Oberfläche durch eine passivierende Säurebehandlung (siehe Abschnitt 15.1.1) wiederhergestellt werden. Wurde in größerem Umfang Fremdeisen in die Oberfläche eingebracht, ist u. U. eine eingreifendere Beizbehandlung (siehe Abschnitt 15.2.6) angezeigt, um das gesamte Fremdeisen mit einer akzeptablen Behandlungsdauer zu entfernen. Der kostengünstigste Weg liegt auf jeden Fall darin, Fremdeisenkontamination gar nicht erst entstehen zu lassen.



Bänder aus unlegiertem Stahl haben Spuren auf einem Rohr aus nichtrostendem Stahl hinterlassen.



Bürsten aus unlegiertem Stahl, die zur „Reinigung“ von nichtrostendem Stahl eingesetzt werden, können Verfärbungen und Rost verursachen. Hierzu dürfen nur Bürsten aus nichtrostendem Stahl eingesetzt werden. © Outokumpu Stainless

# 8 Warm- und Kaltumformung

## 8.1 Warmumformung

Austenitische nichtrostende Stähle weisen bei Warmwalzen, Schmieden und Extrusion ausgezeichnete Umformeigenschaften auf. Austenitische Standardsorten haben eine höhere Warmfestigkeit als unlegierte Stähle; bei Hochleistungssorten liegt sie wiederum deutlich höher als bei Standardsorten. Die Dickenreduktion pro Umformdurchgang ist also geringer als bei unlegierten Stählen und kann, insbesondere bei Hochleistungssorten, durch die Leistungsgrenzen der Anlage begrenzt werden. Es ist wichtig, nichtrostende Stähle bei der Warmumformung vollständig durchzuwärmen. Wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit dauert das länger als bei unlegierten Stählen. Dabei können Hochleistungssorten mit hohem Molybdängehalt schnell verzundern. Deshalb muss der Anlagenführer die Haltezeit während des Vorheizens auf ein Minimum begrenzen.

Da austenitische nichtrostende Stähle bei sehr hohen Temperaturen schnell an Duktilität verlieren, wird die maximale Temperatur während der Warmumformung deutlich unter der Schmelz-

temperatur gehalten. Ursächlich für den Duktilitätsverlust ist bei austenitischen Standardstählen die Bildung von Deltaferrit. Im Falle der Hochleistungssorten geht sie auf Sulfid- oder Phosphidphasen im Mikrogefüge zurück, die bei niedrigeren Temperaturen schmelzen. Eine Umformung bei sehr hohen Temperaturen sollte auch vermieden werden, da es hierbei zu ausgeprägter Verzunderung kommen kann. Die Temperaturuntergrenze wird auf einem Niveau gehalten, auf dem sich der Stahl immer noch dynamisch rekristallisieren und bei der Umformung weicher werden kann, d. h. oberhalb jener Temperatur, bei der er sich schnell kaltverfestigt. Wegen des möglichen Verlustes an Zähigkeit, besonders bei Hochleistungssorten, sollte die untere Temperaturgrenze oberhalb der Temperatur liegen, bei der sich unerwünschte Phasen, z. B. Sigma-Phase, bilden.

**Tabelle 8** führt die Temperaturbereiche für die Warmumformung von unterschiedlichen Gruppen nichtrostender Stähle auf. Die obere Temperaturgrenze liegt bei allen bei ca. 1175–1200 °C (2150–2200 °F), die Untergrenze ist

dagegen stark sortenabhängig. Bei den Standardsorten liegt sie vergleichsweise niedrig, bei höher legierten Stählen dagegen wesentlich höher – eine Folge ihrer hohen Festigkeit und ihrer Neigung, intermetallische Phasen zu bilden. Diese Sortenabhängigkeit der unteren Temperaturgrenze bedeutet, dass der Verarbeitungsbereich für die Warmumformung mit zunehmendem Legierungsgehalt kleiner wird.

Bei Hochleistungssorten ist er also am geringsten. Es ist wichtig, während des Warmumformens das Werkstück durch und durch auf Temperatur zu halten und Zonen mit niedriger Temperatur zu vermeiden (z. B. Ecken, die bei ansonsten rotglühender Oberfläche sichtbar dunkler sind als das übrige Teil oder gar schwarz). Kältere Bereiche können sich bis unter die Mindest-Umformtemperatur abkühlen und dann nicht mehr duktil genug sein, um sich noch weiter umformen zu lassen.

Das Werkstück sollte nach der Warmumformung lösungsgeglüht und in Wasser/Luft abgeschreckt werden, um ein gleichmäßiges Mikrogefüge zu gewährleisten,

Tabelle 8: Warmumformungsbereiche und Lösungsglühtemperaturen für austenitische nichtrostende Stähle

Sorten	Temperaturbereich der Warmumformung		Lösungsglühtemperaturen <sup>1</sup>	
	°C	°F	°C	°F
Standardsorten AISI 201, 304, 316, 321 (EN 1.4372, 1.4301, 1.4401, 1.4541)	870–1200	1600–2200	1040 min.	1900 min.
Hitzebeständige Sorten AISI 309, 310 (EN 1.4828, 1.4841)	980–1175	1800–2150	1050 min.	1925 min.
Sorten mit 6 % Mo und 0,2 % N S31254 (EN 1.4547), S31266 (EN 1.4659), N08367 (EN 1.4529), N08926 (EN 1.4529)	980–1150	1800–2100	1150 min.	2100 min.
	900–1200	1650–2190	1150 min.	2100 min.
	1000–1260	1830–2300	1105 min.	2025 min.
	900–1200	1650–2190	1100 min.	2010 min.
Sorte mit 7 % Mo und 0,5 % N S32654 (EN 1.4652)	1100–1200	2000–2200	1150 min.	2100 min.

<sup>1</sup> Die hier aufgeführten Lösungsglühtemperaturen ergeben sich aus den Anforderungen von ASTM A480/A480M. Die Angaben in der europäischen Norm EN 10088 können hiervon abweichen. Bei einigen Legierungen können Temperaturen oberhalb des Mindestwerts erforderlich sein, um Sekundärphasen in angemessener Zeit zu entfernen.



Warmumformung der Segmente eines Behälterkopfes © Antonius Vesselheads BV

das praktisch frei von Sensibilisierung, schädlichen Sekundärphasen und übermäßigen Restspannungen ist. Bei Standardsorten vermindert ein vollständig lösungsgeglühtes Gefüge das Risiko der Sensibilisierung während des späteren Schweißens; bei Hochleistungssorten verlängert es die für das Schweißen zur Verfügung stehende Zeit bis zur Bildung von Chi- und Sigma-Phasen. Eine Lösungsglühlung baut auch Restspannungen ab, die bei der späteren Verarbeitung oder im Gebrauch zu Verzug führen können.

Wenn die Temperatur des Werkstücks zu keinem Zeitpunkt unter die Lösungsgeglühtemperatur abfällt, kann der Warmumformprozess auch als „prozessimmanenter Glühvorgang“ betrachtet werden. Der durchgängige Wärmeeinfluss und die anschließende Abschreckung können dann einen separaten Lösungsgeglüh-Zyklus ersetzen. Bei dieser verfahrensimmanenten Glühbehandlung ist allerdings die Temperatursteuerung von grundlegender Bedeutung. Es muss sichergestellt sein, dass die Lösungsgeglühtemperatur durchgängig im gesamten Werkstück vorliegt.

Austenitische nichtrostende Stähle erfordern nach der Warmumformung eine Abschreckung, um Ausscheidungen von Carbiden und schädlichen Sekundärphasen zu vermeiden. Das richtige Kühlmittel hängt vom Querschnitt und der Zusammensetzung des Werkstücks ab, bei Standardsorten insbesondere vom Kohlenstoffgehalt, bei höherlegierten Sorten vom Molybdängehalt. Nichtstabilisierte Sorten mit einem Kohlenstoffgehalt von mehr als 0,030 % sollten zur Vermeidung von Sensibilisierung in Wasser abgeschreckt werden.

Stabilisierte Sorten wie AISI 321 (EN 1.4541), 347 (1.4550) oder 316Ti (1.4571) können in Luft gekühlt werden. Sorten mit mehr als 3 % Mo sollten in Wasser abgeschreckt werden, um die Bildung intermetallischer Phasen zu vermeiden. Mit zunehmendem Querschnitt wird auch eine höhere Kühlkapazität erforderlich, damit sich das Werkstück auch in der Querschnittsmitte rasch abkühlt und Sekundärphasen vermieden werden.

## 8.2 Halbwarmumformung

Grobblech aus austenitischem nichtrostendem Stahl wird häufig in erwärmtem Zustand umgeformt, weil die bei hohen Temperaturen verringerte Festigkeit von Vorteil ist. Anders als ferritische und Duplex-Sorten bilden austenitische Stähle bei Temperaturen bis zu rund 480 °C (900 °F) keine Sekundärphasen. Hier liegt auch die Obergrenze für die Halbwarmumformung austenitischer Sorten. Bei kohlenstoffarmen oder stabilisierten Sorten oder bei Material, das nach der Halbwarmumformung lösungsgeglüht und abgeschreckt wird, kann diese Grenze höher liegen.

## 8.3 Kaltumformung

Austenitische nichtrostende Stähle weisen bei Raumtemperatur eine sehr hohe Duktilität auf, die sich in ausgezeichneten Umformeigenschaften äußert, sei es bei einfachen Abkant- oder komplexen Tief- und Streckzieh-

Vorgängen. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Sorten gehen auf Unterschiede in Festigkeit und Kaltverfestigungseigenschaften zurück. Hochfeste nichtrostende Stähle wie die austenitischen nichtrostenden Hochleistungssorten sowie Stähle der 200er-Serie erfordern größere Umformkräfte oder unterliegen Dickenbeschränkungen. Sorten mit ausgeprägter Kaltverfestigung wie AISI 301 (EN 1.4310) und 201 (1.4372) sind besonders für Streckvorgänge geeignet.

Wird ein Metall kaltumgeformt, strebt es, sobald das Werkzeug entfernt wird, dazu, teilweise wieder in seine alte Form zurückzukehren (**Abbildung 22**).

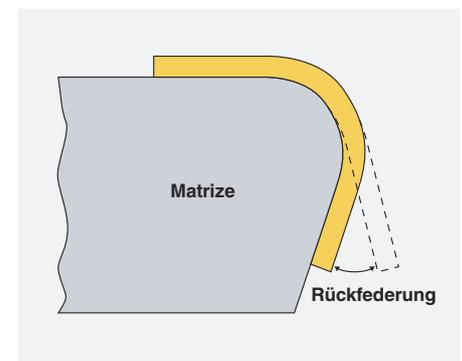


Abbildung 22: Das Biegen oder sonstiges Umformen von Metall mittels eines Werkzeugs kann zu Rückfederung führen. Diesem Umstand muss bei der Planung von Umformvorgängen Rechnung getragen werden, um die gewünschten endgültigen Abmessungen zu erreichen (16).



Intermodale Tankcontainer werden zumeist aus nichtrostendem Stahl AISI 316 (EN 1.4401) hergestellt. Durch Kaltumformung werden sie in ihre zylindrische Form gebracht. © IMO A

Dieses Verhalten wird als Rückfederung bezeichnet. Ihr muss die Kaltumformung Rechnung tragen, damit die gewünschte Endform erzielt wird (zu Details der Rückfederung beim Abkanten siehe Abschnitt 8.3.1). Die Rückfederung verstärkt sich mit zunehmender Festigkeit und Kaltverfestigungsrate des Stahls. Standardsorten mit geringer Austenitstabilität wie AISI 301 (EN 1.4310) sowie stickstofflegierte Stähle wie die meisten austenitischen Hochleistungssorten haben eine höhere Dehngrenze und höhere Kaltverfestigungsraten, was sich in stärkerer Rückfederung äußert. Am stärksten ist sie bei Stählen der 200er-Serie ausgeprägt, die sowohl eine niedrige Austenitstabilität als auch höhere Stickstoffgehalte aufweisen. Schwankungen im Stickstoffgehalt innerhalb der Legierungsbandbreite können zu erheblichen Unterschieden in Umformbarkeit und zu erwartender Rückfederung führen, selbst bei Standardsorten mit maximal 0,10 % N.

### 8.3.1 Biegen

Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich in geglühtem Zustand mit engen Radien biegen. Für austenitische Standardsorten ist, unabhängig von der Walzrichtung, eine freie Rückbiegung des Materials auf sich selbst, also um 180° mit einem Radius entsprechend der halben Materialstärke, ein gängiges Akzeptanzkriterium. Dabei werden die Enden einer Probe zusammengedrückt, ohne dass auf den gebogenen Bereich selbst Druck einwirkt. Wie aus **Tabelle 9** ersichtlich, müssen von diesem Kriterium im Falle von höherfestem oder nachgewaltem Material Abstriche gemacht werden.

Während des Biegevorgangs kann die Rückfederung durch Überbiegen ausgeglichen werden, so dass nach dem Entfernen des Werkzeugs der gewünschte Winkel erzielt wird. Die Stärke der Rückfederung hängt von geometrischen Faktoren sowie den Eigenschaften des nichtrostenden Stahls ab. Die geometrischen Faktoren umfassen die Wanddicke des Teils und den Biegeradius. Die Rückfederung wird mit steigendem Verhältnis von Biegeradius zu Querschnittsdicke sowie mit steigender Dehngrenze und Kaltverfestigungsrate des Stahls stärker.

Tabelle 9: Typische Mindestbiegeradien für freie 180-Grad-Biegungen

Art des Stahls und Kaltverfestigungszustand	Biegeradius
Weichgeglühte austenitische Standardsorten	0,5 D*
Nichtrostende austenitische Hochleistungssorten	1,0 D*
Kaltverfestigte austenitische nichtrostende Stähle**	
+C850	0,5–1,0 D*
+C1000	1,0–1,5 D*
+C1150	1,5–3,0 D*

\* D = Materialdicke

\*\* Die Definitionen der Zugfestigkeitsstufen gem. EN sind nicht deckungsgleich mit den im englischsprachigen Bereich üblichen Bezeichnungen „1/4 hard“, „1/2 hard“ und „full hard“

**Abbildung 23** zeigt den Zusammenhang zwischen dem Radius des Unterwerkzeugs, der Werkstoffdicke und dem tatsächlichen Winkel beim Fertigteil für geglühten nichtrostenden Stahl der 300er-Serie. So haben Teile mit einem Verhältnis von Werkzeugradius zu Materialdicke von 10 im Durchschnitt ein Verhältnis von Werkzeugwinkel zu Werkstückwinkel von 1,12. In diesem Beispiel muss ein Teil, das einen späteren Biegeradius von 90° haben

soll, um 100,8° gebogen werden; die Rückfederung beträgt also 10,8°.

Bei Sorten mit anderen Festigkeitseigenschaften ist die Rückfederung üblicherweise proportional zu (17)

$$(0,2 YS + UTS)/2,$$

wobei YS (yield strength) die Dehngrenze und UTS (ultimate tensile strength) die Zugfestigkeit bezeichnet.

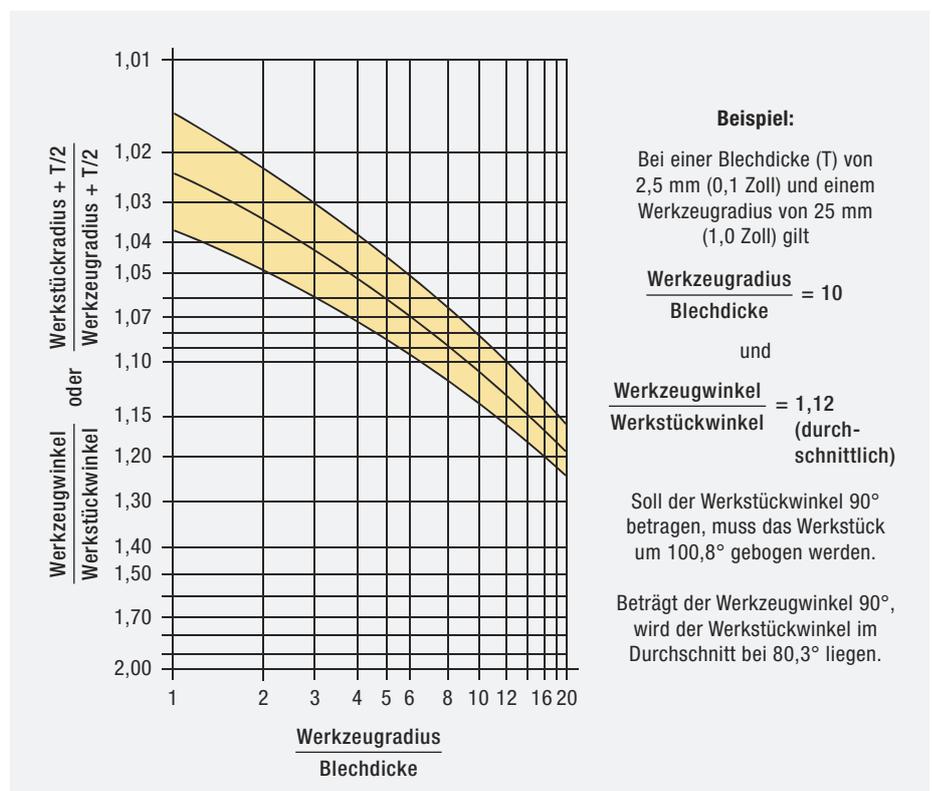


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Öffnungswinkel des Unterwerkzeugs/Materialdicke, Bauteilradius und Bauteilwinkel beim Biegen eines geglühten nichtrostenden Stahls der 300er-Serie (16)

Dieses Verhältnis kann dazu genutzt werden, die Rückfederungseigenschaften von nichtrostenden Stählen mit unterschiedlichen Festigkeiten zu vergleichen. Geht man davon aus, dass der nichtrostende nickelaustenitische Stahl aus Abbildung 23 eine Dehngrenze von 275 MPa (40 ksi) und eine Zugfestigkeit von 655 MPa (95 ksi) hat und setzt man die für die 300er-Serie angenommene Rückfederung von 10,8° an, lässt sich die Rückfederung für einen Stahl mit höherer Festigkeit abschätzen. So wird z. B. die Rückfederung eines austenitischen Hochleistungsstahls mit einer Dehngrenze von 345 MPa (50 ksi) und einer Zugfestigkeit von 790 MPa (115 ksi) wie folgt berechnet:

$$\frac{A}{B} = \frac{10,8^\circ}{x}$$

wobei

$$A = [0,2(275) + 655]/2 = 355$$

$$B = [0,2(345) + 790]/2 = 429,5$$

$$\frac{355}{429,5} = \frac{10,8^\circ}{x}$$

$$x = 13,1^\circ$$

Ausgehend von diesem Näherungswert muss im Falle eines nichtrostenden

Tabelle 10: Mindest-Biegeradien beim Abkanten (16)

Art des Stahls und Verfestigungszustand	Biegeradius
Weichgeglühte austenitische Standardsorten	0,5–1,5 D*
Kaltverfestigte austenitische nichtrostende Stähle**	
+C850	1–2 D*
+C1000	2,5–4 D*
+C1150	4–6 D*

\* D = Werkstoffdicke

\*\* Die Definitionen der Zugfestigkeitsstufen gem. EN sind nicht deckungsgleich mit den im englischsprachigen Bereich üblichen Bezeichnungen „1/4 hard“, „1/2 hard“ und „full hard“

Hochleistungsstahls gemäß Abbildung 23 der Werkstoff um ca. 103,1° gebogen werden, wenn ein endgültiger Biege- winkel von 90° erzielt werden soll.

### 8.3.1.1 Abkanten

Eine Abkantbank ist eine Werkzeug- maschine, mit der Bleche in eine be- stimmte Form gebracht werden, indem das Blech zwischen einem Stempel und einem Gesenk eingespannt wird. Deren Geometrie ist so bemessen, dass nach Entfall der Biegekraft der ge- wünschte Abkantwinkel erreicht wird. Abgesehen von der höheren Festigkeit und der ausgeprägteren Rückfederung unterscheidet sich das Abkanten von

nichtrostendem und unlegiertem Stahl nicht. **Tabelle 10** zeigt die Mindest- Biegeradien gängiger weichgeglühter und kaltverfestigter nichtrostender Stähle.

### 8.3.1.2 Rundwalzen

Das Rundwalzen ist ein gebräuchliches Verfahren zur Herstellung von Behältern, Tanks und anderen runden Hohlformen. Dabei wird Blech oder Band oft in einer Dreirollenwalze gebogen. Bei ihr ist die obere Walze feststehend, während die untere vertikal verstellbar ist, um eine Anpassung an die Materialdicke zu ermöglichen. Die Position der dritten Rolle bestimmt den Durchmesser des Biegeteils.

### 8.3.2 Rollformen

Das Rollformen ist ein äußerst wirt- schaftliches Verfahren zur Herstellung von offenen (z. B. L- oder U-)Profilen. Es dient auch zur Versteifung von Flächenbauteilen durch Einbringungen durchgehender rillenförmiger Erhebun- gen oder Vertiefungen, die in Architektur und Transportwesen die erforderliche Mindestdicke herabsetzen. Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich leicht rollformen; allerdings führt die große Bandbreite von Sorten und Legierun- gszusammensetzungen und damit an Festigkeiten und Kaltverfestigungsraten zu unterschiedlichen Toleranzen bei den rollgeformten Profilen. Die Stahlhersteller können die Varianz verringern, indem sie die Schwankungsbreite des Nickel-, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalts inner- halb der jeweiligen Sorte begrenzen.



Abkanten von Blech aus nichtrostendem Stahl © IMOA



Drei-Walzen-Rundbiegemaschine © IMO A



Profil aus nichtrostendem Stahl beim Auslauf aus dem Rollformer  
© Warut Sintapanon/Dreamstime.com

### 8.3.3 (Streck-)Ziehen

Kaltumformungen, bei denen das Material zur Erzielung der gewünschten Form in ein Tiefziehwerkzeug hineingezogen wird, bewegen sich zwischen zwei Extremen:

Beim **reinen Tiefziehen** werden die Ränder nicht gehalten und das Metall

kann in die Matrize eingezogen werden. Tiefziehgeeignete Werkstoffe müssen eine ausreichende Duktilität aufweisen, um bei allenfalls leichter Fixierung der Ränder in eine Form zu fließen und sich dabei nicht allzu sehr kaltverfestigen. Spezielle Tiefziehsorten wie AISI 305 (EN 1.4303) sind sehr duktil und haben eine sehr geringe Kaltverfestigung.

**Reines Streckziehen:** Die Ränder des Blechs werden eingespannt, so dass der Ziehvorgang ausschließlich durch Streckung des Blechs in die Matrize hinein erfolgt. Hierbei verringert sich die Wanddicke entsprechend. Dazu geeignete Werkstoffsorten sollten eine hohe Kaltverfestigungsrate aufweisen, wie z. B. der Stahl AISI 301 (EN 1.4310), der eine vergleichsweise große Tiefe ermöglicht, ohne zu reißen.

Bei bestimmten Sorten ist die Legierungszusammensetzung darauf ausgelegt, die Kaltverfestigung durch Bildung von Umformungsmartensit zu begünstigen, was der Streckneigung zugutekommt. So hat die Sorte AISI 301 (EN 1.4310) aufgrund ihres erhöhten Kohlenstoff- und verringerten Nickelanteils eine sehr hohe Kaltverfestigungsrate. Die dickenreduzierten gestreckten Bereiche werden dadurch verfestigt.

Zugspannungen verlagern sich dadurch in angrenzende weichere Bereiche, so dass die Formänderung fortschreiten kann, ohne dass es zum Bruch kommt. Das umseitige Foto zeigt Wärmetauscherplatten, die durch eine ausgeprägte Streckumformung hergestellt wurden. Die Länge entlang des Profils des Bauteils ist weitaus größer als die des Ausgangsbleches. Das ausgezeichnete Kaltverfestigungsverhalten der austenitischen Sorten ermöglicht es dem Stahl, Kanäle auszubilden, ohne zu reißen.



Austenitischer nichtrostender Stahl lässt sich durch (Streck-)Ziehen zur Herstellung komplex geformter Küchenspülen einsetzen. © Outokumpu



Komplexes Muster einer durch Kaltumformung hergestellten Wärmetauscherplatte © Graham Sussex



Das Drückwalzen eines Tankkopfes aus austenitischem nichtrostendem Stahl wird durch die große Duktilität des Werkstoffs erleichtert. © IMO A

In der Praxis stellen die meisten Umformvorgänge eine Mischung aus Ziehen und Strecken dar. Die Eigenschaften des Zuschnitts müssen daher den Anteilen von Ziehen und Strecken am Umformprozess entsprechen, die das jeweilige Teil erfordert. Da es zahlreiche nichtrostende Stähle mit entsprechend vielfältigen mechanischen Eigenschaften gibt, ist es häufig möglich, die Werkstoffauswahl im Hinblick auf den Einzelfall zu optimieren. Allerdings hat die komplexe Technik der Blechumformung auch zu einer Reihe von speziellen Legierungszusammensetzungen innerhalb der Standard-Analysebandbreiten geführt. Mit ihnen kann auch den besonderen Anforderungen eines bestimmten Umformprozesses entsprochen werden.

### 8.3.4 Drücken

Das Drücken ist eine Art der Kaltumformung, bei der ein schnell rotierendes Blech oder Rohr unter einer Drückrolle mit gerundeter Nase oder einer Walze hindurchgeführt wird, durch deren Druck ein rotations-symmetrisches Teil entsteht. Das Drücken erfordert hohe Duktilität

und geringe Kaltverfestigungsraten. Die Eignung einiger austenitischer Standard-sorten ist wegen deren ausgeprägter Kaltverfestigung bei diesem Verfahren begrenzt. Modifizierte Legierungszusammensetzungen können Abhilfe schaffen. Die Sorten AISI 305 (EN 1.4303), 309 (1.4828), 310 (1.4841) und 904L (1.4539) haben einen hohen Nickelgehalt (in einigen Fällen auch Kupferzusätze), so dass die effektive Kaltverfestigungsrate herabgesetzt wird und Legierungen entstehen, die sich leichter tiefziehen und drücken lassen. Trotz ihrer hohen Duktilität müssen diese Stähle möglicherweise zwischengeglüht werden, damit Rissbildung bei den hohen Verformungsgraden dieses Prozesses vermieden und die gewünschte Endform erreicht werden kann.

### 8.3.5 Kaltstauchen

Schrauben und andere Befestigungsmittel aus nichtrostendem Stahl lassen sich leicht durch Kaltstauchen (axiales Pressen in ein Gesenk) herstellen. Eine gewisse Kaltverfestigung ist wünschenswert, um die Festigkeit des

Schraubenkopfes zu erhöhen; gleichwohl erleichtern große Duktilität und geringe Kaltverfestigungsraten die Fertigung und reduzieren den Werkzeugverschleiß. Varianten der Sorten AISI 304 (EN 1.4301, 1.4307, 1.4541) mit erhöhten Gehalten an Nickel (AISI 305/EN 1.4303) oder Kupfer (UNS S30433/EN1.4567, zuweilen auch als „302HQ“ bezeichnet) weisen ausgezeichnete Fließeigenschaften auf, die das Risiko von Rissen im Randbereich vermindern. **Abbildung 24** verdeutlicht das Prinzip des Kaltstauchens.

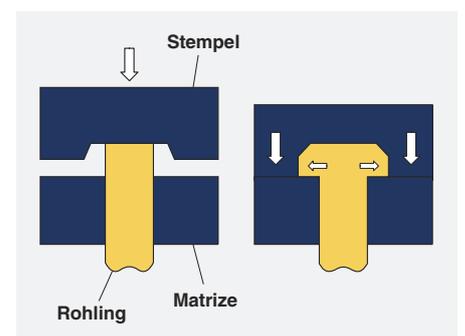


Abbildung 24: Das Kaltstauchen erfordert einen freien Materialfluss innerhalb des Gesenks.

# 9 Schneiden

Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich leicht sägen, scheren und stanzen oder mit Wasserstrahl-, Plasma oder Laserstrahltechniken schneiden. Mit diesen Verfahren wird bei Grobblechen und anderen großformatigen Teilen ein Grad an Präzision erreicht, der zuweilen bereits die Anforderungen an das Fertigteil erfüllt. Dieselben Methoden, die für austenitische Standardsorten zur Anwendung kommen, eignen sich auch für Hochleistungsstähle. Schneidbrenner sollten für nichtrostende Stähle nicht eingesetzt werden.

## 9.1 Sägen

Das Schneiden von nichtrostendem Stahl erfordert Band- oder Metallsägen mit scharfen, hochwertigen Schnellarbeitsstahl-Sägeblättern, positiven Vorschub und genaue Ausrichtung. Auf den Schneidepunkt sollte ein starker Kühl- bzw. Schmiermittelstrahl gerichtet werden. Dafür eignen sich besonders synthetische Emulsionen.

Positiver Vorschub und minimales Ausknicken des Sägeblattes sind bei austenitischen nichtrostenden Stählen wegen deren starken Kaltverfestigungsneigung wichtig. Die Säge muss so

leistungsstark sein, dass sie die Sägezähne bis unter die zuvor verfestigte Schnittfläche eintreibt. Wenn das Sägeblatt „schmiert“, anstatt zu schneiden, verfestigt sich die Oberfläche und setzt dem Schneiden immer mehr Widerstand entgegen, was zu starkem Verschleiß und Verlust an Schneidfähigkeit führt.

### 9.1.1 Bügelsägen

Der Einsatz von motorischen Bügelsägen erfordert eine ausreichende Kühlung durch Flutung des Schnittbereichs mit Kühlflüssigkeit. Zu jedem Zeitpunkt sollte mehr als ein Sägezahn mit dem Werkstück in Kontakt sein, was den Einsatz fein gezahnter Blätter für dünneres Material oder kleine Durchmesser bedeutet (**Tabelle 11**). Wenn Materialdicke oder Durchmesser zunehmen, sollte auch die Zahnteilung größer werden, um die Spanabfuhr zu begünstigen und Spanansammlungen zu vermeiden (18).

Höherfeste Sorten – seien es stickstofflegierte oder molybdän- und stickstofflegierte – erfordern wegen ihrer Kombination von hoher Festigkeit und ausgeprägter Kaltverfestigung besonders leistungsstarke Maschinen. Wenn die

Tabelle 11: Für Bügelsägen empfohlene Zahnteilung (18)

Werkstückdicke/ -durchmesser	Anzahl der Zähne pro 25 mm
< 6 mm	10
6–10 mm	10–8
10–25 mm	4–6

Maschine keinen durchgängig positiven Vorschub ermöglichen kann, sind u. U. andere Trenntechniken zu wählen.

### 9.1.2 Bandsägen

Das Bandsägen mit niedriger Geschwindigkeit ähnelt dem Bügelsägen. Die Empfehlungen für Zahnteilung und Hub in Abschnitt 9.1.1 gelten entsprechend. Das Bandsägen mit hoher Geschwindigkeit erzeugt Reibungshitze unmittelbar vor dem Sägeblatt. Hierdurch wird der Werkstoff weicher und das Sägen leichter. Die vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit von austenitischem nichtrostendem Stahl begünstigt den Verbleib der Wärme im Bereich vor dem Sägeblatt, so dass diese Methode für austenitische Sorten ideal ist. Durch die Wärmeeinwirkung kann allerdings auch die Korrosionsbeständigkeit im Bereich der Schneidkanten beeinträchtigt werden.

## 9.2 Schneiden mittels Trennscheibe

Der Einsatz schnelllaufender Trennscheiben ist eine gängige Methode, dünneres Material zu schneiden und kalt- oder dünneres warmgewalztes Blech geradlinig zu trennen. Bei nichtrostenden Stählen werden hierfür üblicherweise Aluminiumoxid-Scheiben verwendet. Geschnitten wird entweder trocken oder nass mit einer löslichen Ölemulsion. Beim Einsatz von Trennscheiben gilt es, eine Überhitzung der Schneidkanten zu vermeiden.



Typische für das Sägen von nichtrostendem Stahl eingesetzte Bandsäge

### 9.3 Scheren

Das Scheren ist eine schnelle, präzise und sehr effektive Methode, Metalle und Legierungen geradlinig zu schneiden. Die große Duktilität und starke Kaltverfestigung austenitischer nichtrostender Stähle erfordern leistungsstärkere Maschinen als solche, wie sie für weniger feste unlegierte Stähle eingesetzt werden. Eine Schere, die z. B. bei unlegiertem Stahl für eine Blechdicke von bis zu 6,35 mm (0,25 Zoll) bestimmt ist, kann nichtrostenden Stahl AISI 304 (EN 1.4301) nur bis zu einer Dicke von 4,75 mm (0,187 Zoll) verarbeiten (19). Moderne Hochleistungsscheren ermöglichen bei austenitischen Standardarten saubere und präzise Schnitte bei Grobblechen bis zu einer Dicke von 25 mm (1 Zoll). Bei nichtrostenden Hochleistungsstählen vermindert sich die maximale Dicke proportional zur höheren Festigkeit im Vergleich zur Sorte AISI 304 (EN 1.4301).

#### 9.3.1. Anforderungen an die Maschinen

Um austenitischen nichtrostenden Stahl abzuschneiden, bedarf es verwindungssteifer Maschinen, scharfer Schnittkanten und sorgfältiger Abstimmung der Parameter. Die Scheren sollten aus hochwertigem vergütetem Werkzeugstahl mit dem richtigen Verhältnis von Festigkeit und Zähigkeit bestehen. Sie sollten frei von Verschmutzungen sein

und regelmäßig auf anhaftenden Metallabrieb kontrolliert werden. Der empfohlene Spaltabstand ist bei austenitischen nichtrostenden Stählen kleiner als bei unlegiertem Stahl. Bei geradlinigen Schnitten entspricht der Spalt rund 5 % der Blechdicke. Um die bei austenitischen nichtrostenden Stählen erforderliche größere Scherkraft auszugleichen, müssen auch die Haltekräfte des Niederhalters größer sein. Eine Schmierung ist normalerweise bei geradlinigen Schnitten nicht erforderlich, während Folien für den Oberflächenschutz benutzt werden können.

Der Schnittwinkel (**Abbildung 25**) beeinflusst die aufzuwendende Kraft. Kleinere Winkel erfordern höhere Kräfte, ergeben aber auch einen geringeren Verzug. Der kleinste Winkel liegt bei  $\frac{1}{2}^\circ$ . Größere Winkel (z. B.  $3,5^\circ$ ) reduzieren die erforderliche Kraft, führen aber in der Tendenz zu stärkerem Verzug. Auch die Haltekräfte des Niederhalters müssen entsprechend höher sein. (16)

#### 9.3.2 Abgescherte Kanten

Abgescherte Kanten lassen sich in Zonen einteilen: eine eingezogene Zone im obersten Bereich der Schnittstelle, eine Glattschnittzone, eine Bruchzone und einen Grat an der Unterkante der Schnittfläche (Abbildung 25). Die Tiefe der glatten Zone und der Bruchzone unterscheiden sich je nach Legierung,

Blechdicke, Schnittabstand, Schmierung und Beschichtung des Werkzeugs. Die ideale Tiefe der Glattschnittzone variiert je nach Werkstoff und Art des Schnitts.

Für den Verarbeiter ist es wichtig zu verstehen, wie Breite des Schneidspalts, Schnittgeschwindigkeit und Tiefe der Glattschnittzone vom verarbeiteten Werkstoff beeinflusst werden und wie das Werkzeug daran angepasst werden muss. Die Einstellungen sind für niedrigkohlenstoffhaltige Stähle, nichtrostende Stähle, Aluminium und Messing jeweils andere, auch zwischen den Familien nichtrostender Stähle – und auch innerhalb derselben Familie – bestehen Unterschiede. So kann bei derselben Breite des Schneidspalts die Tiefe der Glattschnitts im Falle von niedrigkohlenstoffhaltigem Stahl 50 % des Querschnitts betragen, bei nichtrostendem Stahl 30 % und bei Aluminium 60 %. Werden auch bei nichtrostendem Stahl 50 % angestrebt, muss der Schneidspalt entsprechend verkleinert werden.

Eine geringere Spaltgröße kann eine nahezu oder vollständig geradlinige Schnittfläche mit glatterer Oberfläche ergeben, dabei die Standzeit des Werkzeugs aber deutlich verringern. Ein zu großer Spalt verursacht Kaltverfestigung, beansprucht die Maschine übermäßig und kann unregelmäßige Grate mit Mikrorissen verursachen.

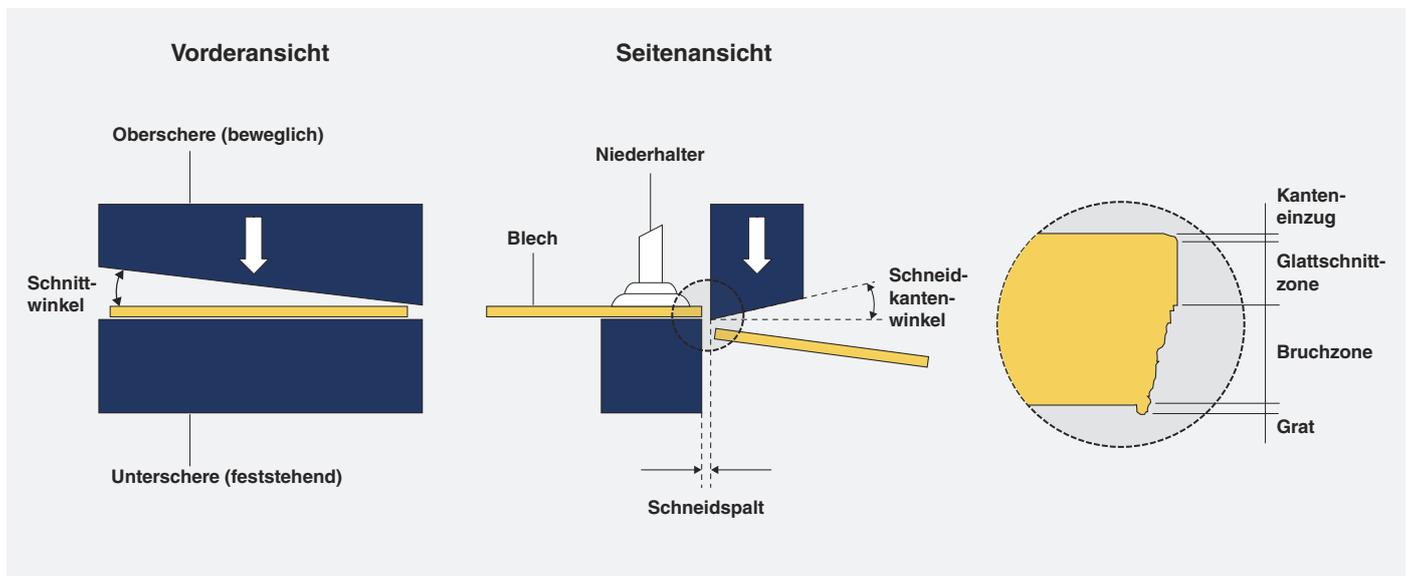


Abbildung 25: Abscher-Parameter (16) und Details des Querschnitts der Scherfläche mit unterscheidbaren Zonen der Schnittkante



Scheren eines Bleches aus nichtrostendem Stahl © IMO A

Abgescherte Kanten sind in starkem Maße kaltverfestigt. Grate können ausgerissene Bereiche und Mikrorisse enthalten. Aus diesem Grund besteht beim anschließenden Umformen die Gefahr der Rissbildung. Diesem Problem kann durch Schleifen, Feilen, mechanisches oder elektrochemisches Polieren entgegengewirkt werden. Grate und verfestigte Oberflächenbereiche werden dadurch entfernt.

Wenn das Werkzeug stumpf oder verunreinigt ist, können an der Grenze zwischen Glattschnitt- und Bruchzone Bereiche mit „verschmiertem“, sich schuppig überlagernden Metall entstehen, die anfällig für Spaltkorrosion sind. Saubere, glatte Grenzflächen bieten die höchste Korrosionsbeständigkeit. Jede Aufrauung ist korrosionsanfälliger, weil sie Feuchtigkeit länger hält und korrosive Ablagerungen begünstigt. Werden besondere Anforderungen an Ästhetik, Korrosionsbeständigkeit oder Reinigungsfreundlichkeit gestellt, ist das Elektropolieren ein bewährtes Verfahren, Grate und diskontinuierliche Bereiche an der Schnittkante zu entfernen.

### 9.3.3 Stanzen und Lochen

Das Stanzen und Lochen stellen ebenfalls Formen des Scherens dar, bei denen anstelle von geraden Messern ein Stempel und eine Matrize verwendet werden. Bei der Herstellung von Stanz-

teilen wird das gewünschte Teil ausgeschnitten; der Verschnitt ist Abfall. Beim Lochen wird ein Werkstück perforiert und die ausgeschnittenen Teile werden verworfen. In beiden Fällen kann es sinnvoll sein, geeignete Schmiermittel oder speziell dafür geeignete Folien einzusetzen. Wenn die ausgeschnittenen Formstücke plan sein müssen, wird ein Stempel benutzt und die Schneidkante ist Teil der Matrize. Beim Lochen, bei dem das ausgeschnittene Teil den Abfall darstellt, sollte sich die Schneidkante auf dem Stempel befinden und die Matrize flach sein.

Im Falle von Löchern und gerundeten Mustern sollte der Spalt beim Stanzen ca. 10 % der Gesamtdicke betragen – 5 % auf jeder Seite. Die Toleranzen sind abhängig von den eingesetzten Maschinen, den Genauigkeitsanforderungen und anderen Variablen.

Die Ablagerung von Metallabtrag auf der Schnittfläche lässt sich durch scharfe Schneidkanten und eng bemessene Schneidspalte reduzieren oder vermeiden. Der mögliche Öffnungsanteil hängt vom Lochmuster (sechseckige, runde oder rechteckige Löcher, Schlitz usw.) ab. Löcher können geradlinig angeordnet oder versetzt sein. Im Falle von nichtrostendem Stahl sollte der Lochdurchmesser die Blechdicke um mindestens eine Dickenstufe überschreiten, um Werkzeugversagen zu vermeiden. Löcher und gerundete Bereiche weisen eine vergleichsweise große Bruchoberfläche auf.

Weitere Vorkehrungen können dazu beitragen, Verzug beim Stanzen oder Formschneiden zu minimieren. Die Eigenschaften einer bestimmten austenitischen Legierung und deren Kaltverfestigungsneigung sollten auf die Auswahl des Musters und des Verfahrens abgestimmt sein. Der Mindestabstand zwischen den Löchern sollte mindestens dem halben Lochdurchmesser entsprechen. Werden dünnere Bleche aus geglühtem Werkstoff eingesetzt,



Lochung von nichtrostendem Stahlblech

muss der erforderliche Lochabstand evtl. größer sein. Verzug lässt sich häufig dadurch vermeiden, dass die Anlagenkonfiguration oder die Werkzeugform angepasst wird oder Blech zur Anwendung kommt, das werksseitig zu einer leicht erhöhten Festigkeit gewalzt ist.

Bei Rundlöchern und gerundeten Geometrien ist es häufig nützlich, ein Schmiermittel oder speziell dafür vorgesehene Folien zu verwenden, die den erforderlichen Druck vermindern und die Werkzeuglebensdauer vergrößern können. Wenn Schmiermittel eingesetzt werden, ist auch eine Reinigungslinie erforderlich, um sie vor dem Versand vollständig zu entfernen.

### 9.3.3.1 Lochen

Das Lochen stellt das gebräuchlichste und kosteneffizienteste Verfahren dar, runde, ovale und ähnliche gleichförmige Ausschnitte darzustellen. Verzug kann dabei auf stumpfe Werkzeuge, falsche Spaltbreite, Durchbiegung des Stempels, mangelnde Schmierung oder eine unzureichende Schneidtechnik zurückgehen. Ein stumpfes Werkzeug erfordert höhere Kräfte, die wiederum zu mehr Spannung und Blechverzug führen. Ein für den jeweiligen Werkstoff und die Blechdicke zu großer Spalt zwischen Ober- und Unterwerkzeug führt zu einer Streckung des Werkstoffs und daraus resultierenden Planheitsproblemen. Durchbiegung des Stempels ist besonders bei kleinen Lochdurchmessern (mit einem Verhältnis von Lochdurchmesser zu Blechdicke von 2:1 oder weniger) problematisch und kann zu Verzug führen.



Wasserstrahlschneiden von Grobblech aus nichtrostendem Stahl © Lubos Chlubny/Shutterstock.com

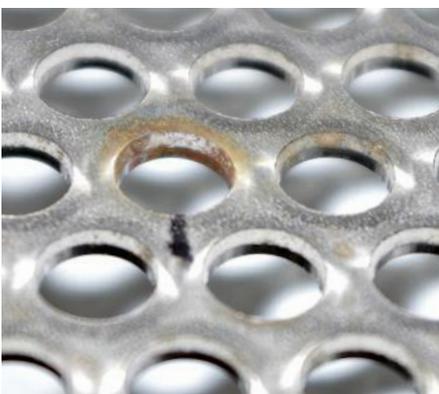
Mehrfachwerkzeuge, voll geführte Werkzeuge oder speziell gefertigte Prägewerkzeuge können dem Verzug entgegenwirken, erhöhen aber auch die Herstellungskosten. Wenn alle anderen Ursachen ausgeschlossen sind, liegt die Lösung möglicherweise in größerem Lochdurchmesser und -abstand. Doch auch wenn alle diese Punkte beachtet werden, kann es erforderlich sein, das Blech nach dem Stanzen zu richten.

Wenn konstruktiv größere Lochdurchmesser, besondere Lochgeometrien, ungewöhnliche Blechdicken oder andere Faktoren zu berücksichtigen sind,

welche die Planheit gefährden, sollte gebohrt statt gestanzt werden. Das Bohrverfahren hängt wiederum von der Blechdicke und anderen Faktoren ab. Für komplexe Lochungen von dünneren Blechen ist das Wasserstrahlschneiden häufig ein gutes Verfahren.

## 9.4 Wasserstrahlschneiden

Beim Wasserstrahlschneiden bildet eine Düse einen Hochdruck-Wasserstrahl, der feine schmirgelnde Partikel enthält, die sowohl metallische als auch nichtmetallische Werkstoffe wirksam durchtrennen. Das Verfahren erfordert leistungsstarke Pumpen sowie große Mengen an Wasser und Elektrizität. Damit können große Querschnitte (bei nichtrostendem Stahl von mehr als 100 mm) geschnitten werden, ohne dass eine Wärmeeinflusszone entsteht oder das Gefüge des Werkstoffs beeinträchtigt wird. Wengleich wasserstrahlgeschnittene Kanten zumeist von guter Qualität sind, kann die Abschrägung der Schnittfläche bei größeren Blechdicken ungünstig sein. Für dünnere Bleche ist das Verfahren in der Regel nicht kostengünstig, es kann aber für Stapel von dünneren Blechen angewandt werden.



Lochung durch Stanzen mit erkennbaren Glattschnitt- und Bruchflächen: Stumpfe Werkzeuge führten zu rauen Bruchflächen und schuppigen Überlagerungen, die solche Lochungen korrosionsanfällig machen. © Catherine Houska



Zuschnitt eines wolframinertgasgeschweißten und hydrogeformten Behälterkopfes aus nichtrostendem Stahl für die Brauchwasserbereitung © DCI, Inc, St. Cloud, MN USA

## 9.5 Plasmaschneiden

Das Plasmaschneiden ist bei allen Sorten austenitischen nichtrostenden Stahls in einer Dicke von 25 mm (1 Zoll) und mehr möglich. Die Fortentwicklung der Plasmaschneidköpfe hat Genauigkeit und Kantenqualität drastisch verbessert und macht diese Technik ideal zum Schneiden von Konturen ebenso wie von geraden Linien. Oft sind plasmasgeschchnittene Kanten bereits endfertig für den Einsatz oder eignen sich ohne weitere Vorbereitung als Schweißnahtkanten. Da das Plasmaschneiden bei hohen Temperaturen erfolgt und ein schmaler Bereich des Metalls aufschmilzt, können unbehandelte Kanten eine verminderte Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Für die Herstellung von speziellen Ausschnitten oder Probeteilen stehen transportable Plasmaschneider zur Verfügung. Plasmaschneiden unter Wasser vermindert die Rauchbelastung.

Die Wahl des Plasmagases richtet sich nach dem Werkstoff und dessen Dicke. Sauerstoffhaltige Gase sind zu vermeiden, da Sauerstoff zur Bildung einer Chromoxidschicht führt, die dem Grundwerkstoff Chrom entzieht und dessen Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigt. Eine leichte Verfärbung der Schnittfläche deutet auf einen solchen Oxidationsprozess hin. Bei starker Verfärbung müssen die Kanten anschließend gebeizt oder geschliffen werden, damit die volle Korrosionsbeständigkeit wieder-

hergestellt wird. Stickstoff als Hilfsgas sollte eine nachweisliche Reinheit von 99,95 % und einen maximalen Sauerstoffgehalt von 200 ppm haben. Weitere gebräuchliche Plasmagase für das Schneiden von nichtrostendem Stahl sind Mischungen aus N<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> oder Ar und H<sub>2</sub>.

Variablen wie die Gasflussrate, der Lichtbogenstrom oder die Bauart der Düse sowie die Schneidgeschwindigkeit können Breite, Form und Qualität der Schnitte beeinflussen. Die Hersteller erteilen Auskunft darüber, für welche



Schnelles Schneiden von nichtrostendem Stahlblech mittels Laser

Sorten und Dicken von nichtrostendem Stahl die jeweiligen Schneidgeräte geeignet sind.

## 9.6 Laserschneiden

Beim Laserschneiden schmilzt ein Laserstrahl den Werkstoff auf, während ein Stickstoffstrom das geschmolzene Metall aus dem entstehenden Spalt ausbläst. Der Stickstoff verhindert Oxidation und entsprechenden Verlust an Korrosionsbeständigkeit. Der Druck des Stickstoffgases beim Laserschneiden ist bei nichtrostendem Stahl höher als bei unlegiertem. Mit der Dicke des Werkstoffs muss auch der Druck zunehmen, um das geschmolzene Metall wirksam abzuführen. Im Vergleich zum Plasmaschneiden erlaubt das Laserschneiden weitaus höhere Schnittgeschwindigkeiten, schmalere Schnitte und sauberere Kanten, die üblicherweise ohne weitere Behandlung endfertig sind. Der Nachteil des Laserschneidens gegenüber dem Plasmaschneiden ist die Dickenbegrenzung. Sie liegt im Falle von nichtrostendem Stahl gegenwärtig bei rund 12 mm. Austenitische Hochleistungs- und Standardsorten werden oft mit Laser auf ihre endgültigen Abmessungen geschnitten, so dass eine zusätzliche spanabhebende Bearbeitung entfällt. Hinsichtlich der Schneideigenschaften bestehen zwischen Hochleistungs- und Standardsorten kaum Unterschiede.

# 10 Spanende Bearbeitung

Die Spanbarkeit ist innerhalb der austenitischen Werkstofffamilie stark unterschiedlich, oft sogar innerhalb einer Sorte. Hohe Festigkeit, Duktilität und Kaltverfestigungsneigung erfordern leistungsstarke Maschinen. Diese Eigenschaften führen zu starker reibender Beanspruchung an der Grenzfläche Werkzeug/Span. Die durch Umformung und Abtrag entstehende Wärme wird aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit der nichtrostenden Stähle nicht abgeführt. Dadurch sind austenitische nichtrostende Stähle schwerer zu zerspanen als unlegierte. Bei austenitischen nichtrostenden Hochleistungssorten ist das Problem noch ausgeprägter. Dennoch sind alle diese Stähle gut spanbar, wenn die grundlegenden Prinzipien der spanenden Bearbeitung nichtrostender Stähle beachtet werden: leistungsstarke Maschinen, starre Anordnung und ausreichende Schnitttiefe, die bis unter die kaltverfestigte Schicht reicht.

Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich hinsichtlich ihrer Spanbarkeit in vier allgemeine Kategorien einteilen:

- Standardsorten einschließlich der Stähle AISI 304/304L (EN 1.4301/1.4307) und AISI 316/316L (EN 1.4401/1.4404) als Blech oder Band;
- Standardsorten mit verbesserter Spanbarkeit, zumeist Langprodukte mit Schwefelzusatz;
- Automatenstähle (zumeist als Langprodukte) wie die Sorten AISI 303 (EN 1.4305) oder ein modifizierter Stahl AISI 304 (EN 1.4301), der sekundärmetallurgisch so behandelt ist, dass Zusammensetzung, Größe, Form und Verteilung der Sulfid- und Oxideinschlüsse im Sinne bestmöglicher Spanbarkeit gesteuert werden;
- höherlegierte und höherfeste Sorten einschließlich nichtrostender austenitischer Hochleistungssorten.

Standardsorten in Form von Blech oder Band sind auf optimale Korrosionsbeständigkeit, Oberflächenqualität und Verarbeitungseigenschaften ausgelegt,

nicht auf Spanbarkeit. Standardsorten mit verbesserter Spanbarkeit erfüllen weiterhin alle Anforderungen der Norm, verbinden jedoch eine modifizierte Legierungszusammensetzung mit (oft herstellereigenspezifischen) Verfahrensbesonderheiten, die der Spanbarkeit zugutekommen. Letztere umfassen enge Toleranzen bei Legierungszusammensetzung und Gefüge, insbesondere hinsichtlich der Größe, Form und Verteilung nichtmetallischer Einschlüsse wie Sulfide und Oxide.

Automatenstähle sind für die spanende Bearbeitung optimiert. Die Sorten mit der besten Spanbarkeit, darunter AISI 303 (EN 1.4305), haben relativ hohe Mindestgehalte an Schwefel mit dem Ergebnis verbesserter Spanbarkeit. Die Sorte AISI 303 (EN 1.4305) enthält 0,3–0,4 % S – beim Stahl AISI 304 (EN 1.4301) sind es üblicherweise weniger als 0,005 %. Der Schwefel führt zu Sulfideinschlüssen, welche die erforderlichen Schneidkräfte vermindern und den Spanbruch begünstigen. Allerdings kann der erhöhte Schwefelgehalt auch nachteilige Auswirkungen haben: Die entstehenden Sulfideinschlüsse können Korrosionsbeständigkeit, Zähigkeit und Duktilität beeinträchtigen und den Stahl anfälliger für Heißrissbildung im Bereich der Schweißnähte machen. So ist die Sorte AISI 303 (EN 1.4305) wesentlich weniger korrosionsbeständig und gilt als nicht schweißbar.

Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle sind aus mehreren Gründen deutlich schwieriger spanend zu bearbeiten als Standardsorten. Vor allem enthalten sie im Interesse der Warmumformbarkeit und der Korrosionsbeständigkeit wesentlich weniger Schwefel (0,001 % oder weniger). Schließlich ist auch deren Stickstoffgehalt für die Spanbarkeit nachteilig, weil er Festigkeit, Kaltverfestigungsneigung und Zähigkeit deutlich erhöht.

## 10.1 Allgemeine Hinweise

Die nachstehenden Hinweise für die spanende Bearbeitung gelten für alle nichtrostenden Stähle:

- Zu verwenden sind leistungsstarke, robust konstruierte Maschinen mit extrem starken, steifen Werkzeugen und Einspannvorrichtungen, die Schnitttiefen bis unterhalb der im vorangegangenen Arbeitsgang kaltverfestigten Oberfläche ermöglichen. Diese Anforderungen sind besonders für höherlegierte Sorten von zentraler Bedeutung. Wegen der besonderen Belastung, die von der starken Kaltverfestigung bei austenitischen nichtrostenden Stählen ausgeht, sollte der Spitzenradius im Interesse der Werkzeuglebensdauer nicht größer als unbedingt nötig gewählt werden.
- Die Schnittflächen sollten so scharf sein, wie es die Werkzeuglebensdauer zulässt. Besonders aggressive Geometrien sind für Sorten mit verbesserter Spanbarkeit oder Automatenstähle einsetzbar, scharfe Schneidkanten bringen aber möglicherweise für das Schneiden höherlegierter Sorten nicht genug Kraft auf.
- Die Schnitttiefe sollte groß genug sein, um bis unter die aus dem vorangegangenen Arbeitsgang resultierende kaltverfestigte Schicht zu reichen (**Abbildung 26**), zumeist mindestens 0,075 mm (0,003 Zoll).
- Die Schnittgeschwindigkeit sollte, um Kaltverfestigung zu vermeiden, deutlich unterhalb jenes Werts gehalten werden, den das Werkzeug in Bezug auf Rundlauf und Schwingungen zulassen würde.
- Die Werkzeuge sollten in regelmäßigen Abständen geschärft oder ausgetauscht werden, bevor sie stumpf werden. Stumpfe Kanten führen zu stärkerer Kaltverfestigung.
- Der Bereich des Schnitts sollte reichliche mit Kühl-/Schmiermittel gespült werden. Besonders günstig sind Emulsionen mit Extremdruck-(EP-) Additiven.
- Beschichtete Hartmetall-Einsätze, insbesondere solche mit positiver Spanbruchgeometrie, erbringen

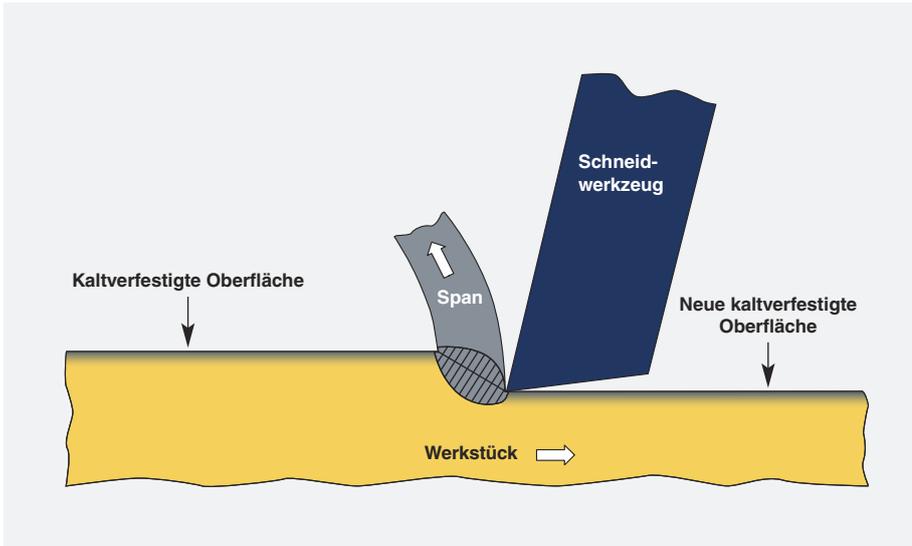


Abbildung 26: Ein Schnitt mit positivem Spanwinkel entfernt Material bis unter die zuvor kaltverfestigte Schicht (basierend auf (20)).

sowohl bei austenitischen Standard-sorten als auch bei den schwieriger zu verarbeitenden hochlegierten Sorten gute Resultate.

- Werkzeuge aus Schnellarbeitsstahl sollten von höchster Qualität sein.

## 10.2 Spanbarkeitsindex unterschiedlicher Sorten nichtrostenden Stahls

Die Spanbarkeit nichtrostender Stähle variiert stark je nach Sorte und Verarbeitungsbedingungen. Kein einzelner Index kann sämtliche Sorten und Faktoren erfassen; dennoch können Indizes zum Vergleich verschiedener Sorten nützlich sein und z. B. dazu herangezogen werden, beim Arbeiten mit einer neuen Sorte die Ausgangswerte zu bestimmen. **Abbildung 27** vergleicht verschiedene nichtrostende Stähle mithilfe eines Spanbarkeitsindexes.

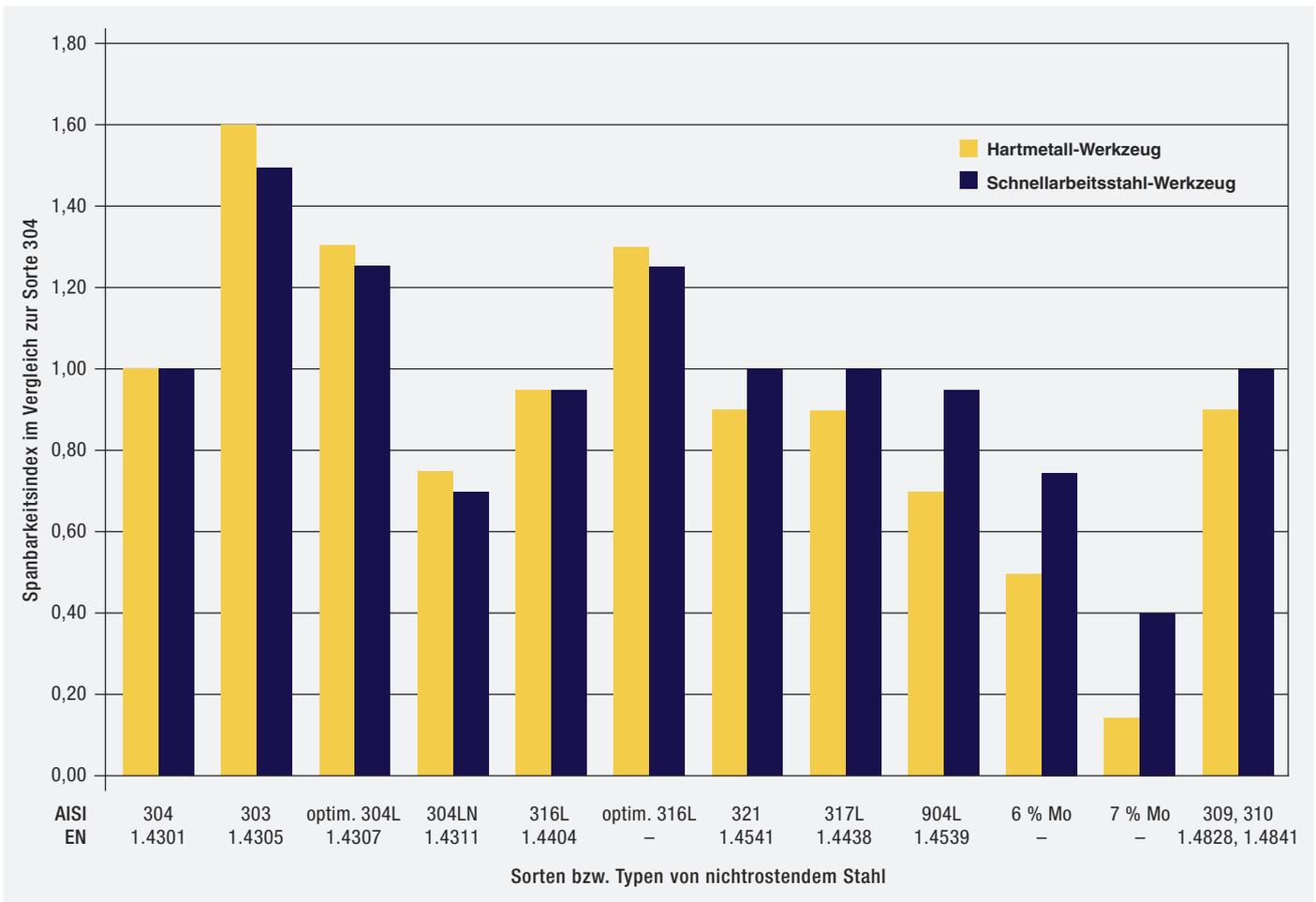


Abbildung 27: Spanbarkeitsindex verschiedener austenitischer nichtrostender Stähle im Vergleich zur Sorte AISI 304 (EN 1.4301): Die relative Spanbarkeit ist bei Hartmetall- und Schnellarbeitsstahl-Werkzeugen ähnlich (21).



Drehen von nichtrostendem Stahl mittels eines Hartmetall-Werkzeugs mit eingebautem Spanbrecher © Seco Tools

### 10.3 Drehen

Das Drehen nichtrostender Stähle setzt hohe Steifigkeit und geringstmögliche Schwingungen voraus. Häufig sind Spanbrecher erforderlich. Richtwerte für das Drehen nichtrostender Stähle sind aus **Tabelle 12** ersichtlich.

### 10.4 Planfräsen mit Hartmetall

Die folgenden Hinweise verhelfen beim Fräsen mit Hartmetall zu optimalen Ergebnissen:

- Beim Schruppen sollten beschichtete Hartmetallwerkzeuge oder zähe unbeschichtete Werkzeuge benutzt werden und die Schnitttiefe sollte mehr als 0,5 mm (0,020 Zoll) betragen. Bei feineren Oberflächen sind härtere, unbeschichtete Werkzeuge, höhere Geschwindigkeiten und geringere Schnitttiefen erforderlich.

- Beim Gegenlaufräsen sind ein Vorschub von 0,10–0,25 mm (0,004–0,010 Zoll) pro Zahn, ein stark positiver axialer Spanwinkel und ein leicht negativer radialer Spanwinkel zu wählen, wobei die Schnittbreite  $\frac{1}{2}$  bis  $\frac{3}{4}$  des Werkzeugdurchmessers betragen sollte.
- Bei unterbrochenen Schnitten ist die wichtigste Anforderung, den Span aus dem Werkzeug zu entfernen anstelle ihn mitzunehmen und erneut zu durchschneiden. Dazu sollte die Geschwindigkeit so hoch bemessen sein, dass an der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Span die richtige Temperatur herrscht, um den Span nicht an den Kanten oder Flächen des Werkzeuges anhaften zu lassen. Um das zu erreichen, wird beim Schruppen am besten kein Kühlmittel benutzt. Beim Schlichten hilft das Kühlmittel, den Span aus dem

Tabelle 12: Richtwerte für das Drehen austenitischer nichtrostender Stähle

Richtwerte	Hartmetall		Schnellarbeitsstahl-Werkzeuge
	Schruppen	Schlichten	
<b>Standardsorten</b>			
Schnittgeschwindigkeit, m/min (Fuß/min)	120–150 (395–490)	150–210 (490–690)	20–25 (65–82)
Vorschub, mm (Zoll/Umdrehung)	0,3–0,6 (0,012–0,024)	0,05–0,30 (0,002–0,012)	0,05–0,20 (0,002–0,008)
Schnitttiefe, mm (Zoll)	2–5 (0,080–0,20)	0,5–2,0 (0,020–0,080)	0,5–2,0 (0,020–0,080)
Sorte gem. ISO	P20–P35	P10–P15	
<b>Optimierte Sorten</b>			
Schnittgeschwindigkeit, m/min (Fuß/min)	170–180 (560–590)	230–250 (750–820)	25–35 (82–115)
Vorschub, mm (Zoll/Umdrehung)	0,3–0,5 (0,012–0,020)	0,1–0,3 (0,004–0,012)	0,3–0,5 (0,012–0,020)
Schnitttiefe, mm (Zoll)	2–5 (0,080–0,20)	< 2 (< 0,080)	2–5 (0,080–0,20)
Sorte gem. ISO	P20	P10	
<b>Austenitische nichtrostende Hochleistungssorten</b>			
Schnittgeschwindigkeit, m/min (Fuß/min)	60–80 (195–262)	80–100 (262–307)	4–6 (12–19)
Vorschub, mm (Zoll/Umdrehung)	0,3–0,6 (0,012–0,024)	0,05–0,30 (0,002–0,012)	0,05–0,20 (0,002–0,008)
Schnitttiefe, mm (Zoll)	2–5 (0,080–0,20)	0,5–2,0 (0,020–0,080)	0,5–2,0 (0,020–0,080)
Sorte gem. ISO	P30–P50	P25–P35	

Werkzeug zu lösen, allerdings sind eine weitaus höhere Geschwindigkeit und eine geringere Schnitttiefe erforderlich, damit der Span nicht am Werkzeug haften bleibt.

- Richtwerte für die Parameter des Fräsens sind **Tabelle 13** zu entnehmen.

### 10.5 Spiralbohren mit Hochleistungs-Schnellschnittstahl-(HSS-) Bohrern

Bei Verwendung von Werkzeugen aus HSS-Stahl ist es sehr wichtig, eine Überhitzung der Werkzeugspitze zu vermeiden. Die geringe Wärmeleitfähigkeit austenitischer nichtrostender Stähle begünstigt die Überhitzung, die zu Erweichung des Bohrers, Verlust an Schärfe, schneller weiterer Erhitzung und letztlich Werkzeugversagen führt.



Stirnfräsen mit einem Hartmetall-Werkzeug © Seco Tools



Planfräsen von austenitischem nichtrostendem Stahl mittels eines eingespannten Hartmetallwerkzeugs © Seco Tools

Tabelle 13: Richtwerte für das Fräsen austenitischer nichtrostender Stähle

Richtwerte	Hartmetall		Schnellarbeitsstahl-Werkzeuge
	Schuppen	Schichten	
<b>Standardsorten</b>			
Schnittgeschwindigkeit, m/min (Fuß/min)	160–190 (525–625)	190–220 (625–720)	15–20 (50–65)
Vorschub, mm (Zoll/Umdrehung)	0,2–0,4 (0,008–0,016)	0,1–0,2 (0,004–0,008)	0,10 (0,004)
Schnitttiefe, mm (Zoll)	2–5 (0,080–0,20)	1–2 (0,040–0,080)	0,1 × Werkzeugdurchmesser
<b>Optimierte Sorten</b>			
Schnittgeschwindigkeit, m/min (Fuß/min)	180–210 (600–700)	305–350 (1000–1150)	25–30 (80–100)
Vorschub, mm (Zoll/Umdrehung)	0,2–0,4 (0,008–0,016)	0,1–0,2 (0,004–0,008)	0,10 (0,004)
Schnitttiefe, mm (Zoll)	2–5 (0,080–0,20)	1–2 (0,040–0,080)	0,1 × Werkzeugdurchmesser
<b>Austenitische nichtrostende Hochleistungssorten</b>			
Schnittgeschwindigkeit, m/min (Fuß/min)	40–60 (130–195)	60–80 (195–262)	6–8 (20–25)
Vorschub, mm (Zoll/Umdrehung)	0,2–0,4 (0,008–0,016)	0,1–0,2 (0,004–0,008)	0,10 (0,004)
Schnitttiefe, mm (Zoll)	2–5 (0,080–0,20)	1–2 (0,040–0,080)	0,1 × Werkzeugdurchmesser

Es ist also entscheidend, der Bohrspitze Kühlfüssigkeit zuzuführen. Eine innere Kühlschmierstoffzufuhr durch den Bohrer und das periodische Anheben des Bohrers mit dem Ziel, das Kühlmittel in die Vertiefung fließen zu lassen, sind wirksame Methoden, dies zu erreichen.

Beim Bohren von nichtrostendem Stahl sind hohe Vorschübe erforderlich. Allerdings belasten diese den Bohrer axial stark und können bis an die Grenzen seiner Knickbelastbarkeit gehen. Um Vibrationen und Knickung zu verhindern, ist daher die rechtwinkelige Ausrichtung des Bohrers zum Werkstück wichtig. Aus Stabilitätsgründen sollte die Länge der Bohrer nicht größer sein als nötig. **Tabellen**

**14a** und **14b** enthalten Empfehlungen für Geschwindigkeit und Vorschub bei Standard- und optimierten austenitischen Sorten sowie Hochleistungsstählen.

Hinweise für das Spiralbohren von nichtrostendem Stahl:

- Für den Spitzenwinkel empfiehlt sich im Interesse eines optimalen Spanbruchs ein Wert von 130°. Ein spitzerer Winkel, z. B. 109°, ergibt eine glattere Seitenfläche, aber einen längeren Spahn.
- Bohrer mit größerem Durchmesser sollten selbstzentrierende Spitzengeometrie und – bei größeren Durchmessern – Ausspitzung aufweisen.

- Sowohl Kühlung als auch Schmierung sind erforderlich. Zu benutzen ist ein 10 %iges Emulsionskühlmittel, das reichlich an die Bohrspitze gebracht werden muss. Für gute Bohrungen sollten der Bohrer immer wieder angehoben und das Bohrloch mit Kühlmittel gespült werden, sobald die Bohrtiefe mehr als zweimal so groß ist wie der Durchmesser des Bohrers. Eine innere Kühlschmierstoffzufuhr macht das Anheben des Bohrers hinsichtlich des Kühlens überflüssig, nicht aber hinsichtlich der Spanabfuhr.
- Die Geschwindigkeit kann bei TiN-beschichteten Bohrern um 10 % und bei innerer Kühlschmiermittelzufuhr um 10–20 % erhöht werden.

Tabelle 14a: Empfohlene Parameter für das Bohren von austenitischen nichtrostenden Stählen mit Spiralbohrern aus Schnellarbeitsstahl (metrische Einheiten)

Spiralbohrer-Durchmesser (mm)	Schnittgeschwindigkeit (m/min)/Vorschub (mm/Umdrehung)		
	Standardsorten	Optimierte Sorten	Austenitische nichtrostende Hochleistungssorten
1–3	6–10/0,05	10–12/0,10	5–8/0,04
5	10–12/0,10	12–14/0,20	8–10/0,08
10	10–12/0,20	12–15/0,30	8–10/0,15
15	10–12/0,25	12–15/0,40	8–10/0,20
20	10–12/0,30	12–15/0,45	8–10/0,25
30	10–12/0,35	12–15/0,55	8–10/0,30
40	10–12/0,40	12–15/0,60	8–10/0,35

Tabelle 14b: Empfohlene Parameter für das Bohren von austenitischen nichtrostenden Stählen mit Spiralbohrern aus Schnellarbeitsstahl (englische Einheiten)

Spiralbohrer-Durchmesser (in)	Schnittgeschwindigkeit (ft/min)/Vorschub (in/Umdrehung)		
	Standardsorten	Optimierte Sorten	Austenitische nichtrostende Hochleistungssorten
0,040–0,120	20–33/0,002	33–40/0,004	16–26/0,0015
0,20	33–40/0,004	40–46/0,008	26–33/0,003
0,40	33–40/0,008	40–49/0,012	26–33/0,006
0,60	33–40/0,010	40–49/0,016	26–33/0,008
0,80	33–40/0,012	40–49/0,018	26–33/0,010
1,20	33–40/0,014	40–49/0,022	26–33/0,012
1,60	33–40/0,016	40–49/0,024	26–33/0,014

# 11 Wärmebehandlung – Lösungs- und Spannungsarmglühen

Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich nicht durch Wärmebehandlung härten. Letztere wird aber eingesetzt, um verarbeitungsbedingte Kaltverfestigung rückgängig zu machen, unerwünschte Sekundärphasen zu lösen und Restspannungen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Bei kaltverfestigtem nichtrostendem Stahl kann die Wärmebehandlung auch dazu dienen, ein rekristallisiertes Gefüge mit geringerer Korngröße zu erzeugen. Das Lösungsglühen macht den Werkstoff nach der Kaltverarbeitung wieder weich und löst Sekundärphasen auf, die sich bei der Warmumformung oder beim Schweißen gebildet haben. Der Begriff „Lösungsgeglüht“ bedeutet zumeist, dass der Werkstoff in optimalem metallurgischem Zustand vorliegt – mit vollständig gelösten Sekundärphasen und gänzlich homogenisiertem Mikrogefüge. Dieser Zustand ergibt die höchste Korrosionsbeständigkeit und beste Umformbarkeit. Da es bei hohen Temperaturen vorgenommen wird, führt das Glühen an Luft zu einem Oberflächenoxid, Zunder, das anschließend durch Entzundern und Beizen entfernt werden muss, damit die optimale Korrosionsbeständigkeit wiederhergestellt wird.

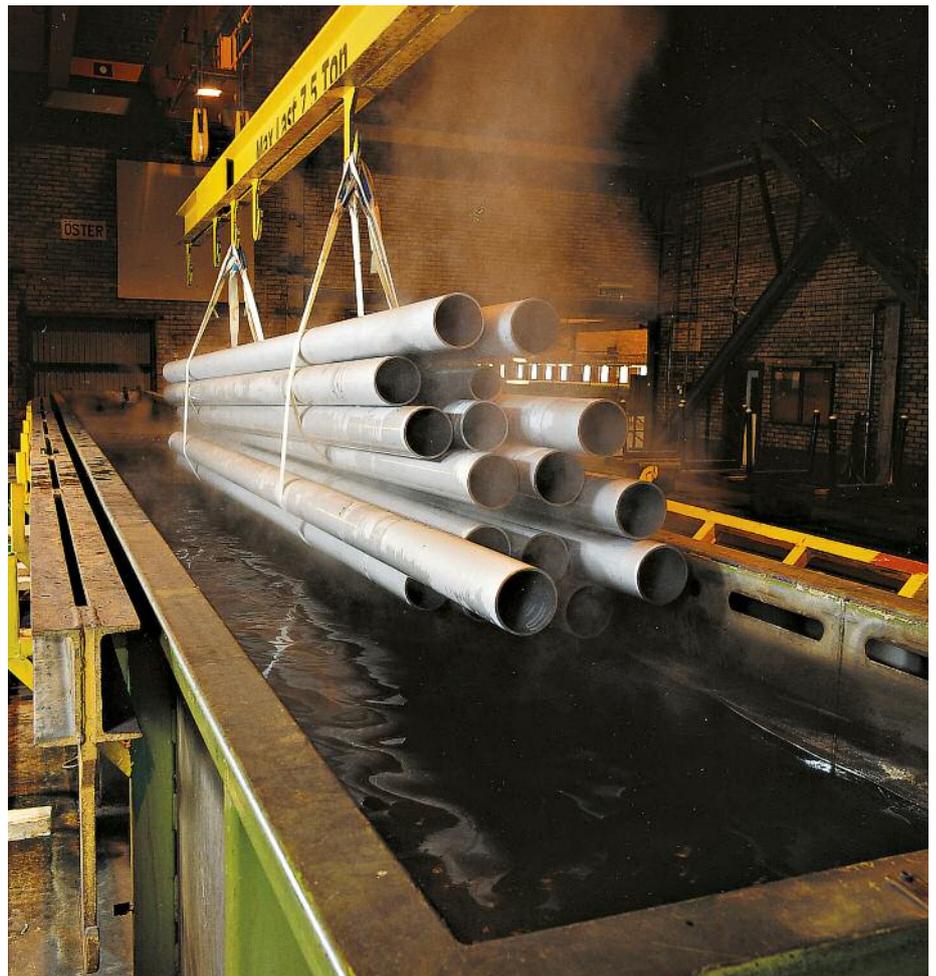
Das Spannungsarmglühen vermindert Restspannungen, die während des Umformens oder Schweißens entstehen können, und verringert das Risiko von Verzug oder Spannungsrissskorrosion. Das Spannungsarmglühen findet zumeist bei deutlich niedrigeren Temperaturen statt als das vollständige Lösungsglühen und die Zunderbildung ist entsprechend geringer. Auch das vollständige Lösungsglühen vermindert Restspannungen und kann eine Alternative zum reinen Spannungsarmglühen bei niedrigeren Temperaturen darstellen. Zu empfehlen ist es insbesondere bei Legierungen, die bei den niedrigeren Temperaturen des Spannungsarmglühens anfällig für unerwünschte Ausscheidungen werden.

## 11.1 Lösungsglühen

### 11.1.1 Vorbereitung

Vor dem Glühen müssen Fett, Öl, Schmierstoffe, Markierungen und andere Verunreinigungen von der Oberfläche entfernt werden. Ansonsten können solche Verschmutzungen so weit einbrennen, dass sie allenfalls noch durch Schleifen zu entfernen sind. Kohlenstoffhaltige Verunreinigungen können in die Oberfläche diffundieren, sie aufkohlen und sensi-

bilisieren und damit im späteren Betrieb anfällig für interkristalline Korrosion machen. Die Reinigung vor der Wärmebehandlung ist daher für den Erhalt der Produktqualität essenziell. Die Reinigung kann mit chemischen Mitteln entweder im Tauchbad oder durch Sprühbehandlung erfolgen. Als Reinigungsmittel zur Entfettung von nichtrostendem Stahl können heiße alkalische Lösungen oder chemische Lösungsmittel dienen. Abschnitt 15 führt weitere für nichtrostenden Stahl geeignete Reinigungsmethoden auf.



Das Entfetten der Oberfläche ist ein entscheidender Reinigungsvorgang, der jeglicher Wärmebehandlung vorgeschaltet werden muss. © Sandvik

Tabelle 15: Wärmebehandlungstemperaturen für verschiedene austenitische nichtrostende Stähle auf Basis der Anforderungen von ASTM A480

AISI	UNS	EN	Glüh Temperatur*	
			°C	°F
201, 304, 304L, 304H, 316, 316L, 347	S20101, S30400, S30403, S30409, S31600, S31603, S34700	1.4372, 1.4301, 1.4307, 1.4948, 1.4401, 1.4404, 1.4550	1040	1900
Alloy 20	N08020	2.4660	925 – 1010	1700 – 1850
904L	N08904	1.4539	1095	2000
6 % Mo	N08367	1.4529	1105	2025
6 % Mo	S31254	1.4547	1150	2100
6 % Mo	S31266	1.4659	1150	2100
6 % Mo	N08926	1.4529	1100	2010

\* Mindesttemperaturen, soweit nicht anders angegeben. Die Werte in der europäischen Norm EN 10088 können hiervon abweichen.

Oberflächenverunreinigungen durch Metalle mit niedriger Schmelztemperatur wie Blei, Kupfer und Zink sind zu vermeiden. Sie können während des Glühens die Korngrenzen durchdringen und zu sog. Flüssigmetallversprödung sowie Rissbildung an den Korngrenzen führen. Diese Verschmutzungen müssen daher vor jeglicher Hochtemperaturverarbeitung wie Glühen oder Schweißen entfernt werden.

### 11.1.2 Temperatur

Die Mindest-Glüh Temperatur entspricht der niedrigsten Temperatur, bei der das Mikrogefüge homogenisiert wird und Carbide sowie intermetallische Ausscheidungen sich lösen. Das Glühen muss oberhalb dieser Temperatur erfolgen, um eine vollständige Lösung von Ausscheidungen sicherzustellen und die Korrosionsbeständigkeit wiederherzustellen. Die Obergrenze der Glüh Temperatur wird durch die Anforderung bestimmt, Verzug zu vermeiden, eine übermäßige Bildung von Zunder zu verhindern, der möglicherweise schwer zu entfernen ist, und kein unerwünscht starkes Kornwachstum zu erlauben.

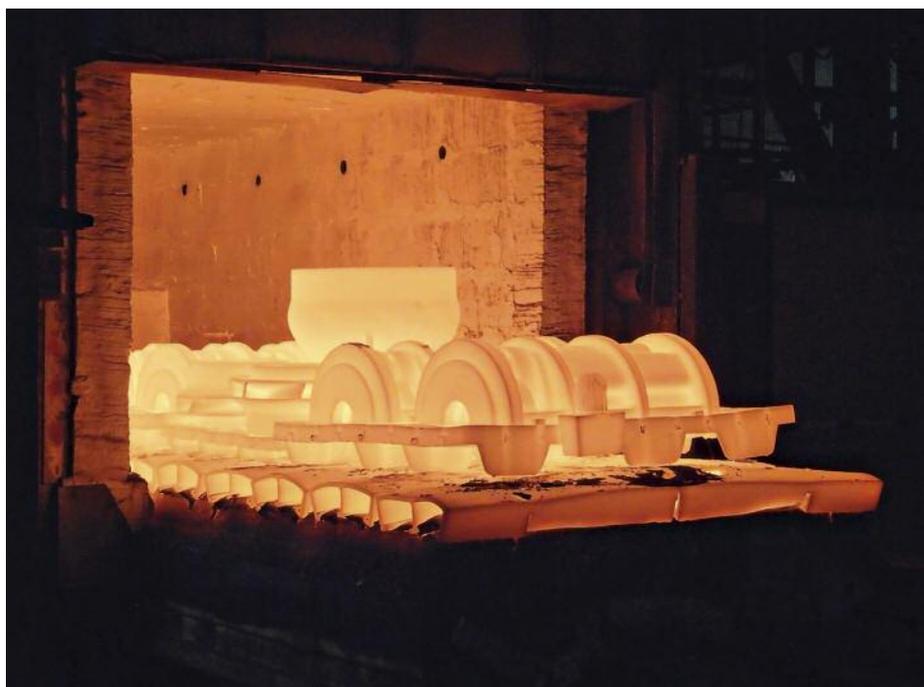
**Tabelle 15** verzeichnet die Mindest-Glüh Temperaturen einiger austenitischer nichtrostender Stähle. Nichtrostende

### 11.1.3 Behandlungsdauer

Eine Haltezeit von zwei bis drei Minuten auf der Lösungsglüh Temperatur reicht aus, kleinere Mengen von Carbiden und Sekundärphasen aufzulösen oder kaltverfestigten Werkstoff spannungsarm zu glühen. Allgemein werden zwei bis drei Minuten pro Millimeter Dicke (sechs Minuten pro 0,1 Zoll) angesetzt, die der Werkstoff der Behandlung ausgesetzt sein muss, damit die zum Lösungsglühen erforderliche Temperatur über den gesamten Querschnitt des Bauteils erreicht wird. Liegen umfangreichere Ausscheidungen vor, insbesondere Chi- und Sigma-Phasen, muss die Zeit ggf. verlängert werden.

Ist die Behandlung zu lang oder findet sie bei zu hohen Temperaturen statt, kann übermäßig viel Zunder entstehen, der in der Folge schwierig und kostenaufwändig zu entfernen ist. Eine lange Behandlungsdauer kann auch inakzeptablen Verzug während der Wärmebehandlung auslösen. Hoch molybdän-legierte Hochleistungsarten verzundern in Luft-Ofenatmosphäre besonders schnell. Molybdäntrioxid verdampft normalerweise und tritt gasförmig aus der Oberfläche aus. Wird die Verdampfung behindert,

Hochleistungsstähle erfordern zur Homogenisierung ihres Mikrogefüges höhere Temperaturen, entsprechend ist auch ihre Lösungsglüh Temperatur höher als bei austenitischen Standardsorten.



Wärmebehandlung von Teilen aus nichtrostendem Stahl im Chargenofen © Fondinox

kann sich flüssiges Molybdäntrioxid auf der Oberfläche ansammeln und den Oxidationsprozess beschleunigen. Dieser Vorgang wird als „katastrophale Oxidation“ bezeichnet. Allerdings lassen sich Vorkehrungen treffen, die Oxidation von hoch molybdänlegierten Stählen zu minimieren:

- Bedingungen vermeiden, unter denen die Verdampfung behindert wird (zu eng gepackte Beschickung, zu enge Öfen),
- stark verzundertes Material nicht noch einmal glühen,
- langen Verbleib bei Temperaturen oberhalb der Mindest-Glüh Temperatur vermeiden,
- die niedrigstmögliche Glüh Temperatur wählen und
- Schutzatmosphäre einsetzen.

#### 11.1.4 Glüh atmosphere

Luft und oxidierende Verbrennungsgase sind die wirtschaftlichsten Medien, in denen sich nichtrostende Stähle mit befriedigendem Ergebnis glühen lassen. Allerdings ergibt das Glühen in Luft eine Zunderschicht, die anschließend entfernt werden muss, damit die Korrosionsbeständigkeit wiederhergestellt wird. Schutzatmosphäre in Form von Argon, Helium, Wasserstoff, gecracktem Ammoniak, Wasserstoff-Stickstoff-Mischungen, aber auch Vakuum minimieren die Zunderbildung, sind allerdings kosten aufwändiger. Beim Blankglühen wird üblicherweise entweder Wasserstoff oder gecracktes Ammoniak eingesetzt, dessen Taupunkt bei  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ ) liegt. Sachgerecht ausgeführt, hinterlässt das Glühen unter Schutzatmosphäre keinen sichtbaren Zunder, eine anschließende Entzunderung erübrigt sich somit.

#### 11.1.5 Abkühlen

Austenitische nichtrostende Stähle können nach dem Glühen eine schnelle Abkühlung erfordern, mit der die Bildung von Chromcarbiden oder anderen intermetallischen Phasen (siehe Kapitel 3) vermieden wird. Ob Abschrecken erforderlich ist und ggf. in welchem Medium, hängt von Werkstoffsorte und -dicke ab.



Abschreckung von Schmiedeteilen nach dem Verlassen des Glühofens © Officine Ambrogio Melesi

In den meisten Fällen können dünnwandige Teile aus den Sorten AISI 304L (EN 1.4307) und 316L (1.4404) in Luft gekühlt werden, ohne unerwünschte Phasen auszuscheiden. Nehmen Dicke, Kohlenstoffgehalt und Legierungsmittelgehalt zu, wird auch eine schnelle Abkühlung immer wichtiger. Nichtrostende austenitische Hochleistungsstähle erfordern in allen Abmessungen eine schnelle Abkühlung. Die gebräuchlichsten Methoden sind die schnelle Kühlung im Luftstrom oder mit Wasser durch Sprühen oder Eintauchen. Beim Glühen im Vakuum wird durch schnelles Abkühlen mit Inertgas Zunderbildung vermieden.

Wird der Werkstoff nach dem Glühen noch weiteren Wärmeeinflüssen ausgesetzt, etwa beim Schweißen, sollte so schnell wie möglich abgekühlt werden, z. B. in Wasser. Hierdurch wird der Werkstoff weniger anfällig für die nachteiligen Wirkungen weiterer Temperaturzyklen. Möglicher Verzug und die Einbringung von Spannungen sollten bei der Wahl der Abkühlungsmethode mit bedacht werden.

#### 11.1.6 Nachbehandlung

Da die Zunderschicht einen erhöhten Chromgehalt aufweist, ist die darunter liegende Schicht chromverarmt und in ihrer Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigt. Um die Korrosionsbeständigkeit wiederherzustellen, müssen sowohl der Zunder als auch die chromverarmte Schicht entfernt werden.

Die gebräuchlichste Nachbehandlungsmethode besteht darin, den Zunder durch Strahlen zu entfernen und anschließend die chromverarmte Schicht durch Säurebeizen abzutragen. Zumeist wird im Tauchbad gebeizt, aber auch eine Sprühbehandlung oder der Auftrag von Gelen oder Pasten ist möglich.

Beizmittel sind äußerst gefährlich. Alle Sicherheitsbestimmungen (Belüftung, Handschuhe, Brillen, Schutzkleidung) müssen daher eingehalten werden. Nach dem Beizen muss das Werkstück neutralisiert und mit viel (chloridarmem) Wasser abgespült werden. Verbrauchte Bäder müssen separat gesammelt und in Übereinstimmung mit den geltenden Gefahrstoffverordnungen entsorgt werden.

Abschnitt 15.2 enthält eingehende Informationen über die Reinigungsmethoden. Es wird empfohlen, dieses Kapitel vor Beginn der Reinigungsbehandlung sorgfältig zu lesen.

## 11.2 Spannungsarmglühen

Die Temperaturen für das Spannungsarmglühen sind niedriger als die für das Lösungsglühen und reichen nicht aus, Ausscheidungen zu lösen. Die Behandlung löst Spannungen teilweise, aber nicht vollständig und hat auf die Härte des Werkstoffs i. d. R. nur minimalen Einfluss. Wegen der niedrigen Temperatur ist das Spannungsarmglühen ein langsamer Prozess, der im Stunden- und nicht im Minutenbereich abläuft, wie das

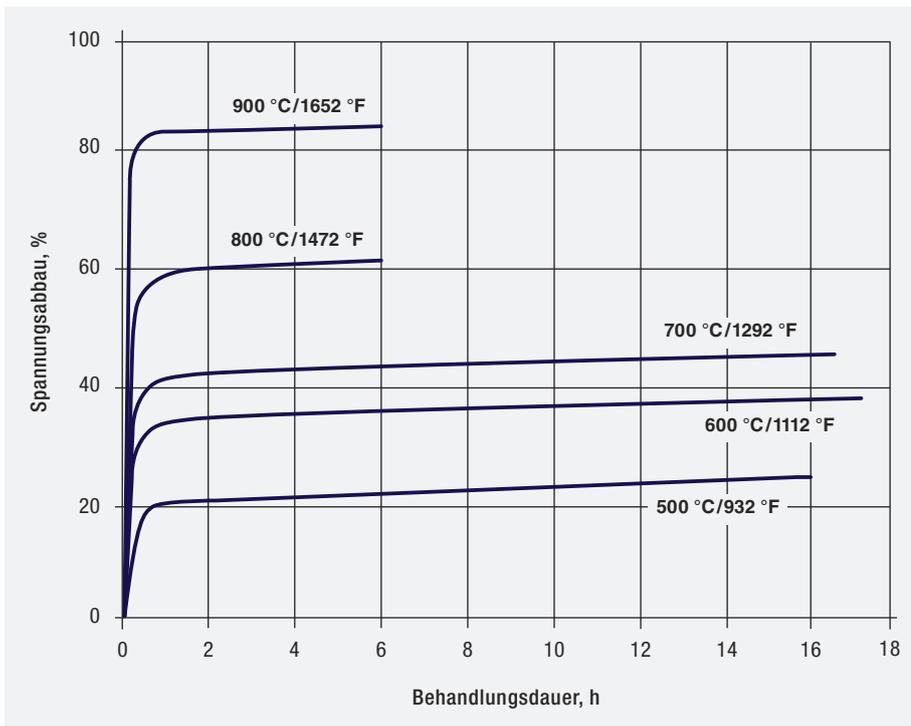


Abbildung 28: Restspannungsabbau beim Werkstoff AISI 347 (EN 1.4550) in Abhängigkeit der Temperatur und Zeit. Die Restspannung vor der Glühbehandlung betrug 230 MPa (33 ksi) (22).

Lösungsglügen. Die Temperaturen des Spannungsarmglühens fallen häufig in den unteren Bereich jener Temperaturspanne, in der sich Sekundärphasen bilden. In diesem Fall müssen die Glühzeiten sorgfältig gewählt werden, damit Ausscheidungen, welche die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen, vermieden werden. Diese Einschränkung begrenzt häufig den Umfang des möglichen Spannungsabbaus. Der potentielle Nutzen des Spannungsarmglühens muss gegen das Risiko der Sensibilisierung abgewogen werden und es ist zu entscheiden, ob ein Spannungsarmglühen bei niedriger Temperatur, bei mittlerer Temperatur oder ein vollständiges Lösungsglühen vorgenommen wird.

In vielen Fällen liegen Mischkonstruktionen aus unlegiertem und nichtrostendem Stahl vor, bei denen der unlegierte Stahl ein Spannungsarmglühen erfordert. In diesem Fall sind für die Wahl von Zeit und Temperatur die Normen und Vorschriften maßgebend, die für den unlegierten Stahl gelten. Der Konstrukteur hat dann zu prüfen, ob der für den un-

legierten Stahl erforderliche Temperaturverlauf den nichtrostenden Stahl ungünstig beeinflusst. Falls ja, muss evtl. ein alternativer nichtrostender Stahl gewählt werden.

Ein Spannungsarmglühen bei niedrigen Temperaturen bewegt sich zumeist im „sicheren“ Temperaturbereich bis rund 540 °C (1000 °F). Allerdings zeigt **Abbildung 28**, dass hierbei weniger als 40 % der ursprünglichen Spannung abgebaut werden. Ein wesentlicher Vorteil des Niedrigtemperatur-Verfahrens liegt darin, dass keine Gefahr der Sensibilisierung besteht. Die Abbildung zeigt außerdem, dass eine Behandlung bei mittlerer Temperatur zwischen 540 °C und 900 °C (zwischen 1000 °F und 1650 °F) mehr Spannung abbaut. Allerdings liegen diese Temperaturen auch in dem Bereich, in dem sich Carbide und intermetallische Phasen bilden. Deshalb muss die Haltezeit eng begrenzt bleiben. Glücklicherweise findet ein Großteil des Spannungsabbaus während der ersten halben Stunde statt, nachdem dieses mittlere Temperaturniveau erreicht wurde.

Bei Glühbehandlungen im mittleren Temperaturbereich sind alle thermischen Zyklen zu berücksichtigen, denen das Werkstück ausgesetzt wurde. Das Spannungsarmglühen umfasst Erwärmung, Haltezeit und Abkühlung. Die Wärmeeinflusszone bestehender Mehrlagenschweißungen hat sich dann möglicherweise schon vor der Glühbehandlung längere Zeit im kritischen Temperaturbereich befunden. Der zusätzliche Wärmeeinfluss durch das Spannungsarmglühen kann dann in der Schweißnaht zu unerwarteter Bildung von Ausscheidungen und Sekundärphasen führen und Korrosionsbeständigkeit wie mechanische Eigenschaften in der Wärmeeinflusszone verschlechtern. Die meisten austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstähle mit hohem Gehalt an Chrom und Molybdän bilden intermetallische Phasen innerhalb kurzer Zeit. Für sie kommt also nur eine Niedrigtemperatur-Behandlung in Betracht.

Auch die Frage der Abkühlungsmethode erfordert bei diesen Sorten eine sorgfältige Betrachtung. Eine hohe Abkühlgeschwindigkeit etwa beim Abschrecken in Wasser kann aufgrund von ungleichmäßiger Kontraktion neue Spannungen in ein Bauteil einbringen. Große und komplexe Baueinheiten aus Teilen unterschiedlicher Dicke abzukühlen, kann also äußerst schwierig sein. Findet die Behandlung im sensibilisierungsgefährdeten Temperaturbereich statt, ist die schnelle Gebläsekühlung in Luft bis an die Untergrenze dieses Bereiches mit anschließender langsamer Kühlung in stehender Luft eine praktikable Lösung. Beim Niedrigtemperatur-Glühen ist eine Abkühlung in stehender Luft zumeist ausreichend.

Die Oberflächenbehandlung vor dem Spannungsarmglühen entspricht der für das Lösungsglühen und umfasst eine gründliche Reinigung von Verschmutzungen. Das Spannungsarmglühen bei niedriger Temperatur verursacht, anders als das Lösungsglühen, keine ausgeprägte Verzunderung, kann aber durchaus zu Oxidation führen. Erscheint die Oberfläche nach dem Spannungsarmglühen goldfarben oder blau, sollte sie im Interesse der Korrosionsbeständigkeit gebeizt werden.

# 12 Schweißen, Hart- und Weichlöten

Schweißen, Hart- und Weichlöten sind weitverbreitete Fügeverfahren für nichtrostende Stähle. Das Fügeverfahren muss sowohl die Korrosionsbeständigkeit als auch die mechanischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs aufrechterhalten. Unterschiede in den Eigenschaften von Naht und Grundwerkstoff können durch sachgerechte Nahtvorbereitung, Fügeverfahren und Nachbehandlung minimiert werden. Das vorliegende Kapitel vermittelt allgemeine Hinweise zum Schweißen oder anderweitigen Verbinden nichtrostender Stähle. Obwohl für austenitische nichtrostende Hochleistungsarten dieselben Techniken zur Anwendung kommen wie für Standardarten, sind zusätzliche Vorkehrungen zu treffen.



Geschweißte Lagertanks einer Molkerei © iStock.com/Bim

## 12.1 Schweißen

### 12.1.1 Einfluss der physikalischen Eigenschaften auf das Schweißen

Das Schweißverhalten wird durch Wärmeausdehnung, elektrischen Widerstand und Wärmeleitfähigkeit beeinflusst. **Tabelle 16** fasst einige dieser Parameter für unlegierten Stahl und eine austenitische nichtrostende Standardsorte zusammen. Zu beachten ist, dass die Unterschiede der physikalischen Eigenschaften zwischen beiden Stahlarten erheblich sind.

Der größere Wärmeausdehnungskoeffizient austenitischer nichtrostender

Stähle verstärkt deren Tendenz zu Verzug. Daher sollten Heftschweißungen bei austenitischen Sorten enger gesetzt werden, um Verzug zu vermeiden.

Der höhere elektrische Widerstand austenitischer nichtrostender Stähle im Vergleich zu unlegierten Stählen verringert die Stromstärke, die nötig ist, um eine vergleichbare Wärme zu erzeugen. Gemeinsam mit einem niedrigeren Schmelzpunkt bedeutet das, dass der Schweißstrom bei austenitischen nichtrostenden Stählen schwächer sein kann als bei unlegierten.

Die geringe Wärmeleitfähigkeit austenitischer nichtrostender Stähle führt dazu, dass sich die Wärme im Bereich der Schweißnaht konzentriert. Im Vergleich zu unlegiertem Stahl ergeben sich hieraus ein steilerer Temperaturgradient und eine stärkere Neigung zu Schrumfspannungen und Verzug. Die langsame Wärmeabfuhr bewirkt, dass die Schmelz- und Wärmeeinflusszone länger auf höheren Temperaturen gehalten werden. Dadurch verbleiben sie auch länger im kritischen Temperaturbereich, in dem sich Carbide und intermetallische Phasen bilden.

Tabelle 16: Physikalische Eigenschaften eines austenitischen nichtrostenden Stahls und von unlegiertem Stahl

Physikalische Eigenschaft	Unlegierter Stahl	Austenitischer nichtrostender Stahl 19 Cr – 9 Ni	Anmerkung
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	11.7 6.5	17.6 9.8	20–628 °C (20–500 °C for stainless): [ $\times 10^{-6}/K$ ] 68–1162 °F (68–932 °F for stainless): [ $\times 10^{-6}/^{\circ}F$ ]
Relative Wärmeleitfähigkeit	100 100	28 66	%, im Vergleich zu unlegiertem Stahl bei 100 °C (212 °F) %, im Vergleich zu unlegiertem Stahl bei 650 °C (1200 °F)
Elektrischer Widerstand	0.125 1.25	0.72 1.26	Bei 20 °C (68 °F) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ Bei 885 °C (1625 °F) $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Schmelzpunkt (ca.)	1540 2800	1425 2600	°C °F

## 12.1.2 Nahtkanten und Ausrichtung

In aufgeschmolzenem Zustand ist nichtrostender Stahl nicht so fließfähig wie unlegierter. Die Naht wird also bei gleichen Schweißparametern weniger tief durchgeschweißt. Zum Ausgleich haben Nähte bei nichtrostendem Stahl eine breitere Schweißfase, geringere Steghöhe und größeren Stegabstand als bei unlegiertem Stahl. Wird diesen Faktoren Rechnung getragen, lassen sich Durchbrennen verhindern und gut durchgeschweißte Nähte erzielen. Viele unterschiedliche Ausführungsarten ergeben akzeptable Schweißverbindungen. Eine gute Zusammenstellung von Detailzeichnungen für verschiedene Schweißnähte findet sich in der Publikation Nr. 11007 des Nickel Institute (5).

### 12.1.2.1 Kantenvorbereitung

Für das sachgerechte Schweißen austenitischer nichtrostender Stähle ist die sorgfältige Kantenvorbereitung von großer Bedeutung. Glatte, saubere und gratfreie Kanten erleichtern die Ausrichtung, tragen zur Stabilität des Lichtbogens bei und ergeben gleichmäßig durchgeschweißte Nähte. Kurz: Gute Nahtvorbereitung führt leichter zu besseren Nähten. Gefräste Kanten sind ideal, aber auch Schleifen ist akzeptabel, solange es Grate entfernt und einen gleichförmigen Schweißspalt erzeugt.

### 12.1.2.2 Sauberkeit der Kanten

Oxide: Beim Plasma- oder Laser-schneiden entsteht auf nichtrostendem Stahl ein Oxid mit hohem Schmelzpunkt. Werden solche Oxide vor dem Schweißen nicht von der Kante entfernt, können sie das aufgeschmolzene Metall verunreinigen, interne Spannungspitzen erzeugen und Ausgangspunkte für Korrosion bilden. Alle Oxide müssen vor dem Schweißen durch Fräsen oder feines Schleifen bis auf den blanken Stahl beseitigt werden. Bloßes Bürsten, auch mit einer Bürste aus nichtrostendem Stahl, entfernt festhaftende Oxide nicht sicher. Für das vorbereitende Schleifen werden nichtmetallische Schleifmittel empfohlen.

Organische Verunreinigungen: Sie können Schweißrisse oder Porosität verursachen, wenn sie nicht vor dem Schweißen entfernt werden. Der in ihnen enthaltene Kohlenstoff kann in den nichtrostenden

Stahl übergehen und durch Chromcarbidgebildung zur Sensibilisierung führen. Organische Verschmutzungen wie Öl, Schmierstoffe oder Markierungen müssen daher mit geeigneten Lösungsmitteln entfernt werden.

Metallische Verunreinigungen: Kupfer, Blei und Zink, die beim Schweißen aufgeschmolzen werden, können die Korngrenzen durchdringen und nichtrostenden Stahl verspröden. Die Kontamination mit diesen Metallen geschieht zumeist durch Kontakt mit Werkzeugen oder wärmeabführenden Kupferschienen sowie bei Lagerung und Transport. Fremdmetallspuren sind vor dem Schweißen zu entfernen, da sie zu Flüssigmetallversprödung führen. Schleifen und Beizen entfernen metallische Kontamination am wirksamsten.

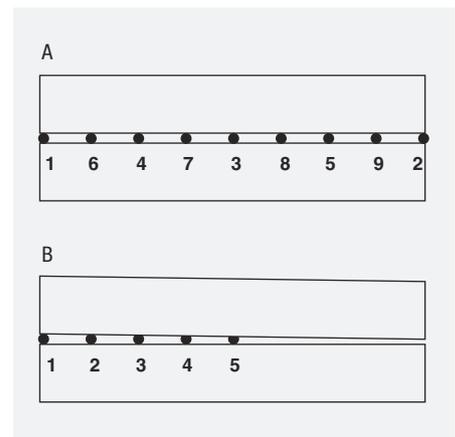
### 12.1.2.3 Ausrichtung, Heftscheidungen und Festspannen

Sorgfältige Ausrichtung vor dem Schweißen ist bei austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen von ausschlaggebender Bedeutung, denn sie sind voll-austenitisch und erfordern daher zur Vermeidung von Warmrissen eine geringe Wärmeeinbringung. Der Schweißer sollte also nicht pendeln müssen, um einen großen oder unregelmäßigen Schweißspalt zu überbrücken. Sorgfältige Ausrichtung ergibt für die gesamte Länge der Schweißnaht gleichmäßige Spaltbreite und Kantenverlauf. Zu erreichen ist das mit sorgfältiger Kantenvorbereitung sowie Festklemmen oder Heftscheidungen.

**Tabelle 17** zeigt die ungefähren Abstände bei Heftscheidungen von austenitischem

**Tabelle 17: Empfohlener Schweißpunkt-Abstand bei Heftscheidungen in Abhängigkeit von der Dicke (23)**

Blechedicke		Schweißpunkt-Abstand	
mm	Zoll	mm	Zoll
1–1,5	0,04–0,06	30–60	1,2–2,4
2–3	0,08–0,12	70–120	2,8–4,7
4–6	0,16–0,24	120–160	4,7–6,3
> 6	> 0,24	150–200	5,9–7,9



**Abbildung 29: Sachgerechte Heftreihenfolge vermeidet, dass sich der Schweißspalt während des Schweißens schließt: A = richtig, B = falsch (5).**

nichtrostendem Stahl, **Abbildung 29** illustriert, in welcher Reihenfolge die Heftungen bei einer geradlinigen Naht gesetzt werden müssen, wenn eine gleichbleibende Spaltbreite erreicht werden soll. Heftscheidungen von Rohren, die später in der endgültigen Schweißnaht aufgehen, sollten nicht durchgeschweißt werden und müssen frei von Oxidation sein. Es ist wichtig, dass Heftscheidungen bei dickwandigen Komponenten nicht zu Schweißfehlern in der endgültigen Naht führen. Hervorstehende oder abrupt ansetzende oder abbrechende Heftungen sollten beigeschliffen werden. Der Lichtbogen sollte nicht auf der Heftscheidungs zünden oder erlöschen. Die Heftpunkte sollten unter Schutzgas und mit einem Zusatzwerkstoff geschweißt werden, der zum Grundwerkstoff passt.

Tabelle 18: Empfohlene Schweißzusatzwerkstoffe für einige gebräuchliche nichtrostende Stähle

Grundwerkstoff			nach AWS (American Welding Society)		nach europäischer Normung
			Umhüllte Schweißelektrode	Blanke Schweißelektroden und Stäbe	
AISI	UNS	EN	A5.4 (nichtrostender Stahl) A5.11 (Nickellegierungen)	A5.9 (nichtrostender Stahl) A5.14 (Nickellegierungen)	DIN EN ISO 3581-A DIN EN ISO 14343-A DIN EN ISO 18274
201	S20100	1.4372	E 308/E 308L <sup>1</sup>	ER 308/ER 308L <sup>1</sup>	
201L	S20103		E 308L	ER 308L	
304	S30400	1.4301	E 308/E 308L	ER 308/ER 308L	19 9 L
304L	S30403	1.4307	E 308L	ER 308L	19 9 L
316L	S31603	1.4404	E 316L	ER 316L	19 12 3 L
317L	S31703	1.4438	E 317L	ER 317L	18 15 3 L
317LM	S31725		Siehe Schweißzusatzwerkstoffe für nichtrostende Stähle mit 6 % Mo	Siehe Schweißzusatzwerkstoffe für nichtrostende Stähle mit 6 % Mo	
317LMN	S31726	1.4439	Siehe Schweißzusatzwerkstoffe für nichtrostende Stähle mit 6 % Mo	Siehe Schweißzusatzwerkstoffe für nichtrostende Stähle mit 6 % Mo	18 16 5 N L
904L	N08904	1.4539	E 385 oder Schweißzusatzwerkstoffe für nichtrostende Stähle mit 6 % Mo	ER 385 oder Schweißzusatzwerkstoffe für nichtrostende Stähle mit 6 % Mo	NiCr22Mo9Nb 20 25 5 Cu N L
Alloy 20	N08020	2.4660	E 320 or E 320L	ER 320 or ER 320L	NiCr22Mo9Nb
	N08028	1.4563	E 383	E 383	27 31 4 Cu L
<b>Nichtrostende Stähle mit 6 % Mo</b>					
	S31254 <sup>2</sup>	1.4547	E NiCrMo-3, E NiCrMo-4, E NiCrMo-10, E NiCrMo-12, E NiCrMo-13, E NiCrMo-14.	ER NiCrMo-3, ER NiCrMo-4, ER NiCrMo-10, ER NiCrMo-13, ER NiCrMo-14.	NiCr22Mo9Nb
	N08367 <sup>2</sup>	1.4529			NiCr22Mo9Nb
	N08926 <sup>2</sup>	1.4529			NiCr22Mo9Nb
CN3MN <sup>2</sup>	J94651				

1 Für die schweißtechnische Verarbeitung werden stets die niedrig-kohlenstoffhaltigen (L-)Sorten verwendet. Ausnahme sind Einzelfälle, in denen die geringfügig höhere Festigkeit der Normalsorten wichtiger ist als ein Höchstmaß an Korrosionsbeständigkeit.

2 Alle diese Schweißzusatzwerkstoffe, die mindestens 9 % Mo enthalten, sind geeignet.

### 12.1.3 Schweißzusatzwerkstoffe

**Tabelle 18** führt einige für austenitische nichtrostende Stähle gängige Schweißzusatzwerkstoffe auf. Sie dient der Orientierung; darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere, häufig herstellerspezifische Sorten. Insbesondere bei Stählen mit mehr als 6 % Mo ist es wichtig, das Datenblatt des Herstellers zu beachten und sicherzustellen, dass der Zusatzwerkstoff in Bezug sowohl auf die Korrosionsbe-

ständigkeit als auch auf die mechanischen Eigenschaften geeignet ist.

### 12.1.4 Schutzgas

Nichtrostender Stahl sollte während des Schweißens vor Luftzutritt geschützt sein, so dass Oxidation in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone vermieden wird. Oxidation während des Schweißvorgangs kann die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen und

Oxideinschlüsse im Schweißgut verursachen, welche die mechanischen Eigenschaften beeinträchtigen. Je nach Schweißverfahren wird der Schutz durch ein Flussmittel (Lichtbogen-Handschweißen, Unterpulverschweißen), ein Inertgas (Wolfram-Inertgasschweißen, Schutzgasschweißen) oder eine Kombination aus beiden (Fülldrahtschweißen) bewerkstelligt (siehe Abschnitt 12.1.5). Schutzgas begünstigt auch die Stabilisierung des Lichtbogens und kann

das Durchschweißen sowie die Gestalt der Raupe beeinflussen. **Tabelle 19** verzeichnet Schutzgase für unterschiedliche Schweißverfahren. Methoden wie das Wolfram-Inertgasschweißen und das Schutzgasschweißen, die Schutzgas erfordern, sind u. U. für Schweißungen vor Ort ungeeignet, weil Luftzug das Gas verwehen und die Schweißzone Sauerstoff aussetzen kann.

Auch die Rückseite der Schweißung sollte geschützt werden, um die Korrosionsbeständigkeit in der fertigen Schweißnaht zu erhalten. Argon, Stickstoff und eine Formiergas Mischung aus 90 % N<sub>2</sub> und 10 % H<sub>2</sub> dienen als Rückseitenschutz.

Stickstoff kann sich im Schweißbad lösen und den N<sub>2</sub>-Gehalt der Naht steigern. Damit steigen auch die Festigkeit der Schweißnaht und ihre Beständigkeit gegen Loch- und Spaltkorrosion.

Beim Blechschweißen wird häufig eine Kupferunterlage verwendet, die Wärme ableitet, das Durchbrennen verhindert und dabei hilft, das Formiergas im Nahtbereich zu halten. Der nichtrostende Stahl sollte nicht an dem Kupfer reiben, da hierdurch Kupfer auf die Oberfläche des nichtrostenden Stahls übertragen werden kann und, wenn es schmilzt, flüssigmetallinduzierte Rissbildung möglich ist.

## 12.1.5 Schweißverfahren

### 12.1.5.1 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)

Das Wolfram-Inertgasschweißen wird vor allem für Bleche und dünnwandige Rohre sowie den Wurzeldurchgang von Großrohren eingesetzt. Das Verfahren ist vergleichsweise langsam, ergibt aber eine saubere, hochwertige Schweißnaht ohne Schlacke und Schweißspritzer. Es kann in allen Positionen ausgeführt werden.

Beim WIG-Schweißen brennt ein Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück. Die Technik kann autogen (d. h.

Tabelle 19: Schutzgase für verschiedene Schweißverfahren (24)

Verfahren	Schutzgas	Vor- und Nachteile
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	99,95 % Ar	Gutes Durchschweißen, niedrige Gasflussrate, geringes Risiko von übermäßigem Einbrand, ergibt hochwertige Schweißnähte, teuer
	Ar + 1–3 % N <sub>2</sub>	Begrenzt den Verlust an N in legierten Sorten, verbessert die Korrosionsbeständigkeit, kann Wolframelektroden schädigen
	Ar + 1–5 % H <sub>2</sub> + 10–30 % He	Besseres Durchschweißen und höhere Schweißgeschwindigkeit
	Ar + 2 % N <sub>2</sub> + 10–30 % He	Besseres Aussehen der Oberfläche bei stickstofflegierten Sorten
	Ar + 2–5 % H <sub>2</sub>	Besseres Durchschweißen und höhere Schweißgeschwindigkeit
Metallaktivgasschweißen (MAG)	Ar + 2–2,5 % CO <sub>2</sub>	Im Vergleich zu reinem Argon stabilerer Lichtbogen und bessere Benetzung
	Ar + 1–2 % O <sub>2</sub>	Im Vergleich zu reinem Argon stabilerer Lichtbogen und bessere Benetzung
	Ar + 30–40 % He + 1–3 % CO <sub>2</sub>	Bessere Fließeigenschaften, besseres Aussehen
Metallinertgasschweißen (MIG)	99,95 % Ar	Für vollaustenitische nichtrostende Stähle
Fülldrahtschweißen (FCAW)	Ar + 15–25 % CO <sub>2</sub>	Beste Ergebnisse in Bezug auf Aussehen, Stabilität des Lichtbogens und mechanische Eigenschaften. In allen Schweißpositionen akzeptabel
	100 % CO <sub>2</sub>	Besseres Durchschweißen, bessere Bindung; in flachen und horizontalen Positionen akzeptabel, in Zwangspositionen nur begrenzt nutzbar

Tabelle 20: Typische Schweißparameter für das Wolfram-Inertgasschweißen (23)

Durchmesser der Wolframelektrode		Stromstärke	Spannung	Typische Querschnitte	
mm	Zoll			mm	Zoll
1,6	0,063	50–120	10–12	<1,0	<0,040
2,4	0,094	100–230	16–18	1,0–3,0	0,040–0,120
3,2	0,13	170–300	17–19	>2,0	>0,080

ohne Schweißzusatzwerkstoff), mit einem manuell zugeführten stabförmigen oder von einer Spule abgewickelten blanken Schweißdraht ausgeführt werden. Ein inertes Schutzgas, das durch die Düse eingeleitet wird, deckt das aufgeschmolzene Metall und die Elektrode ab. Das WIG-Schweißen ohne Zusatzwerkstoff eignet sich zum Schweißen von Standardsorten in geringen Dicken oder für Wurzelfurchgänge bei anderen Schweißarten. Bei austenitischen nicht-rostenden Hochleistungsstählen sollte das Autogenschweißen nur angewandt werden, wenn sie nach dem Schweißen lösungsgeglüht werden. Damit wird verhindert, dass durch eine mögliche Mikrosegrierung von Molybdän die Korrosionsbeständigkeit leidet.

Für das Wolfram-Inertgasschweißen wird am besten eine stabilisierte Stromversorgung mit Hochfrequenz-Zündung eingesetzt. Geschweißt wird mit Gleichstrom mit direkter Polarität und negativ gepolter Elektrode, weil eine umgekehrte Polarität die Elektrode durch thermische Überlastung in Mitleidenschaft ziehen würde.

Zu den gebräuchlichen Elektroden gehören Wolframelektroden mit 2 % Thoriumoxid (EWTh-2) oder 2 % Cer (EWCe-2) gemäß AWS A5.12 und EN ISO 6848. Die Steuerung des Lichtbogens wird verbessert, wenn die Elektrode konisch mit einem Scheitelpunkt-Winkel von 20° bei dünnerem und 65° bei dickerem Material angeschliffen und mit einer kleinen, gerundeten Spitze versehen wird. Die „richtige“ Elektrode und deren Spitze richten sich nach den Präferenzen des Schweißers. Bei automatisiertem Wolfram-Inertgasschweißen können Versuche unter realen Produktionsbedingungen dabei helfen, die

ideale Geometrie für das gewünschte vollständige Durchschweißen zu finden.

Eine Gaslinse oder eine Düsenkappe verbessert die Schutzgasabdeckung, verhindert Verwirbelungen und minimiert Luftbeimengungen zum Schutzgas. Der Gasstrom sollte einige Sekunden vor Zündung des Lichtbogens einsetzen und auch nach dessen Abbrechen noch einige Sekunden andauern, um Sauerstoffkontamination zu vermeiden. **Tabelle 20** fasst die wesentlichen Schweißparameter des Wolfram-Inertgasschweißens zusammen.

### 12.1.5.2 Metall-Schutzgasschweißen (MSG)

Das Metall-Schutzgasschweißen trägt schnell große Mengen von Zusatzwerkstoff auf. Das Schweißverfahren ist schneller und kostengünstiger als das

Wolfram-Inertgasschweißen oder das Lichtbogen-Handschiessen.

Beim Metall-Schutzgasschweißen fungiert der blanke Schweißdraht als Elektrode. Er wird automatisch von einer Spule abgerollt und durch die Schweißdüse geführt. Das Verfahren ist zumeist halbautomatisch, wobei der Schweißer den Brenner von Hand führt. Es kann bei einfachen Schweißgeometrien aber auch automatisiert werden. Das Schutzgas durchströmt den Brenner und schützt das Schweißbad.

Das Metall-Schutzgasschweißen erfordert spezielle Schweißgeräte u. a. mit Konstantspannung sowie variablem Stromanstieg und einstellbarer Drosselwirkung oder der Möglichkeit des Impulslichtbogenschweißens.



Manuelles Wolfram-Inertgas- (WIG-)Schweißen © iStock.com/Lekyum

Metall-Schutzgasschweißen sollte mit Gleichstrom mit umgekehrter Polarität und positiv gepolter Elektrode ausgeführt werden. Dabei gibt es drei Arten des Werkstoffübergangs:

- Kurzlichtbogen-Übergang: Dieser Modus erfordert separate Regler für Stromanstieg und sekundäre Drosselwirkung. Angewandt wird er bei Materialdicken bis zu ca. 3 mm (1/8 Zoll) und bei Wurzellagen. Der Metallübergang von der abschmelzenden Elektrode erfolgt durch wiederholte Kurzschlüsse mit der Folge vergleichsweise niedriger Abscheidungsraten. Bei dieser Schweißart ist die Wärmebringung am geringsten. Sie eignet sich daher für dünne Querschnitte, bei denen das Risiko von Verzug besteht. Sie kann auch bei Schweißungen in Zwangspositionen eingesetzt werden.
- Impulslichtbogen: Dieser Modus erfordert eine besondere Stromquelle, die Spannung und Stromstärke pulst. Diese Kombination zeichnet sich gegenüber dem Kurzschluss-Übergang durch einen höheren Werkstoffübergang aus, wobei die Wärmebringung begrenzt bleibt. Auch er eignet sich für Schweißungen in Zwangspositionen.
- Sprühlichtbogen: Dieser Modus ergibt eine hohe Übergangsrate und einen stabilen Lichtbogen; die Wärmebringung ist allerdings hoch. Das Metall geht in Form eines feinen Sprühnebels über. Dieser Modus eignet sich nur für das Schweißen in horizontaler Position (Positionen PA und PB) und wird für Werkstoffdicken von 3 mm (0,12 Zoll) und mehr angewandt. Er ist wirtschaftlich, wenn Füll- und Decklagen als lange, geradlinige Schweißnähte von mittlerer bis großer Dicke auszuführen sind.

**Tabelle 21** führt typische Schweißparameter für die unterschiedlichen Arten des Werkstoffübergangs unter reinem Argon-Schutzgas auf. Die Parameter unterscheiden sich je nach Gasmischung. Daher gelten die Herstellerangaben für die jeweilige Gasmischung.

### 12.15.3 Fülldrahtschweißen

Beim Fülldrahtschweißen lassen sich noch höhere Übergangsraten als beim Schutzgasschweißen erzielen. Es eignet sich für unterschiedlichste Werkstoff-

**Tabelle 21: Typische Schweißparameter für das Metall-Schutzgasschweißen nach Schweißdrahtdurchmesser und Schweißverfahren (23)**

Verfahren	Draht-Durchmesser		Stromstärke	Spannung
	mm	Zoll	A	V
Schutzgasschweißen Kurzlichtbogen	0,8	0,031	90–120	19–22
	1,0	0,039	110–140	19–22
Schutzgasschweißen Sprühlichtbogen	0,8	0,031	150–170	24–27
	1,0	0,039	170–200	25–28
	1,2	0,047	200–270	26–29
	1,6	0,063	250–330	27–30
Schutzgasschweißen Impulslichtbogen	1,2	0,047	75–350	24–30

**Tabelle 22: Typische Schweißparameter für das Fülldrahtschweißen (25)**

Verfahren	Draht-Durchmesser		Stromstärke	Spannung
	mm	Zoll	A	V
Fülldrahtschweißen horizontal	0,9	0,035	80–160	22–28
	1,2	0,047	150–280	24–32
	1,6	0,063	200–320	26–34
Fülldrahtschweißen Steigposition	0,9	0,035	80–130	22–26
	1,2	0,047	140–170	23–28
Fülldrahtschweißen Überkopfposition	0,9	0,035	80–150	22–27
	1,2	0,047	150–200	24–29

dicken und kann auch für Schweißungen in Zwangspositionen genutzt werden.

Der gefüllte Draht wird dabei mit denselben Geräten wie beim Metall-Schutzgasschweißen (MSG) automatisch durch die Schweißdüse zugeführt. Die Füllung ergibt eine Schlacke, die das Schweißbad vor dem Kontakt mit der Umgebungsluft schützt. Die Schlacke ergänzt das Schutzgas, das durch die Schweißdüse zuströmt und die Wärmeinflusszone abschirmt. Im Falle von selbstschützenden Fülldrahtelektroden bildet die Füllung zusätzlich das Schweißgas. Allerdings kommt diese Technik für hochwertige Schweißnähte mit besonderen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit

nicht zur Anwendung. Wie das Schutzgasschweißen ist dieses Verfahren halb- oder vollautomatisch. Die Schweißzusatzwerkstoffe für das Fülldrahtschweißen sind in AWS A5.22 bzw. DIN EN ISO 12153 erfasst, allerdings sind nur sehr wenige von ihnen auch für austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle geeignet. Die beiden meistverwendeten Schutzgase für das Fülldrahtschweißen von nichtrostendem Stahl sind Argon mit 15–25 % Kohlendioxid, das für optimale Schweißbarkeit sorgt, oder 100 % Kohlendioxid, das einen optimalen Einbrand ergibt. Die Gasmenge liegt üblicherweise bei 20–25 L/min (0,7–0,9 cfm). Typische Schweißparameter für das Fülldrahtschweißen sind in **Tabelle 22** aufgeführt.

#### 12.1.5.4 Lichtbogen-Handschweißen (Elektrodenschweißen)

Beim Lichtbogen-Handschweißen werden umhüllte Stäbe mit fester Länge eingesetzt, die als abschmelzende Schweißelektroden fungieren. Die mineralische Umhüllung schützt die Schweißung vor Luft, die sich bildende Schlacke absorbiert Verunreinigungen. Dieses Verfahren kommt häufig für Reparaturschweißungen von im Betrieb befindlichen Anlagen zur Anwendung, ebenso für Schweißungen in schwer zu reinigendem Umfeld. Es bietet sich für Baustellenschweißungen an, weil es kein Schutz- oder Formiergas erfordert. Die Umhüllung ist für Verunreinigungen durch Luftzug weniger anfällig, weswegen das Lichtbogen-Handschweißen für Arbeiten im Freien gut geeignet ist. Das Verfahren erfordert Konstantstrom und wird normalerweise mit Gleichstrom mit umgekehrter Polarität und positiv gepolter Elektrode ausgeführt.

Das Lichtbogen-Handschweißen ist ein vielseitiges Verfahren. Es eignet sich für komplexe Geometrien und schwierige Schweißpositionen an problematischen Standorten. Es ist allerdings unwirtschaftlich für lange geradlinige Schweißnähte, die für automatisierte und produktivere Verfahren in Frage kommen.

Die Zusammensetzung der Umhüllung, die gasbildende Komponenten enthält, beeinflusst Stabilität des Lichtbogens, Form der Schweißbraupe und Sauberkeit der Schweißnaht, ferner die Eignung für Schweißungen in Zwangspositionen. Elektroden gibt es mit Schlackebildnern unterschiedlicher Zusammensetzungen für die verschiedenen Schweißpositionen, darunter auch Zwangspositionen, Fallnähte usw.

Die Umhüllung kann auch Legierungselemente in die Schweißnaht einbringen. Der blanke Draht in der Stabmitte kann dabei aus einem nichtrostenden Standardstahl bestehen. Aus diesem Grunde darf auch eine Elektrode für das Lichtbogen-Handschweißen nicht aus ihrer Umhüllung herausgeschält und der verbleibende Draht als Elektrode für das Schutzgasschweißen benutzt werden: Möglicherweise fehlen dem Kerndraht wesentliche Legierungselemente, die in der Umhüllung enthalten waren. Schlacke muss vollständig entfernt werden, bevor die nächste Schweißlage ausgeführt oder das Bauteil eingesetzt wird.



Lichtbogen-Handschweißen bei nichtrostendem Stahl © ESAB Welding & Cutting

Schweißstäbe werden in luftdichten Behältern verkauft, die, einmal geöffnet, in trockener Umgebung und bei geringer Luftfeuchtigkeit aufzubewahren sind. Wurden die Stäbe einmal feucht gelagert, sollten sie vor Gebrauch in einem Elektrodofen bei 250–280 °C (480–535 °F) getrocknet werden, um Feuchtigkeit auszutreiben, die ansonsten zu Porenbildung in der Schweißnaht führen kann. Die Schweißparameter sind von Fabrikat und Legierung abhängig. **Tabelle 23** gibt allgemeine Hinweise, maßgeblich sind jedoch die Angaben zu Spannung und Stromstärke auf der Verpackung. Für die meisten austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstähle sind die Stromstärken niedriger anzusetzen als in der Tabelle gezeigt.

#### 12.1.5.5 Unterpulverschweißen

Beim Unterpulverschweißen besteht die Schweißelektrode aus einem blanken Draht, der zumeist die gleiche Zusammensetzung hat wie beim Schutzgasschweißen. Der Schlackebildner wird auf die zu verschweißende Stelle aufgebracht. Das Pulver schmilzt und deckt die Schweißstelle ab, sobald der Lichtbogen zündet. Es bildet über dem aufgeschmolzenen

Metall eine schützende Schlackeschicht; unbenutztes Pulver wird i. d. R. wiederverwendet. Der Lichtbogen ist durch die Deckschicht nicht sichtbar, das Verfahren muss daher automatisiert sein.

Die Abscheidungsrate sind beim Unterpulverschweißen deutlich höher als bei anderen Schweißverfahren. Die Methode eignet sich deshalb gut etwa für dickwandige Behälter und Rohre. Sie wird zumeist für Stumpf- oder Kehlnähte eingesetzt. Die Schweißungen sind bereits im Ausgangszustand von guter Qualität und erfordern nur geringfügige Nachbearbeitung.

Für das Schweißpulver gilt DIN EN ISO 14174. Es gibt eine Vielzahl herstellereinspezifischer Zusammensetzungen. Es kann metallurgisch neutral, in seiner Wirkung auf das Schweißbad aber auch sauer oder basisch sein. Die sachgerechte Kombination von Draht und Pulver ist im Einzelfall beim Hersteller zu erfragen. Pulver für austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle sind zumeist stark basisch, während Standardsorten eher neutrale bis leicht basische Zusammensetzungen erfordern.

Tabelle 23: Typische Parameter für das Lichtbogen-Handschiessen in unterschiedlichen Positionen mit basischen und rutilumhüllten Elektroden (23)

Elektrode			Stromstärke			
Art	Durchmesser		Spannung	Horizontalposition	Steigposition	Überkopposition
	mm	Zoll	V	A	A	A
Rutilumhüllt	1,6	0,063	22–24	30–40	30–35	30–40
	2,0	0,078	22–24	35–55	35–40	40–50
	2,5	0,098	22–24	50–75	50–60	60–70
	3,25	0,128	22–24	70–110	70–80	95–105
	4,0	0,157	22–24	100–150	100–120	120–135
	5,0	0,197	22–24	140–190		
Basisch	2,0	0,078	24–27	35–55	35–40	35–45
	2,5	0,098	24–27	50–75	50–60	55–65
	3,25	0,128	24–27	70–100	70–80	90–100
	4	0,157	24–27	100–140	100–115	125–135
	5	0,197	24–27	140–190		

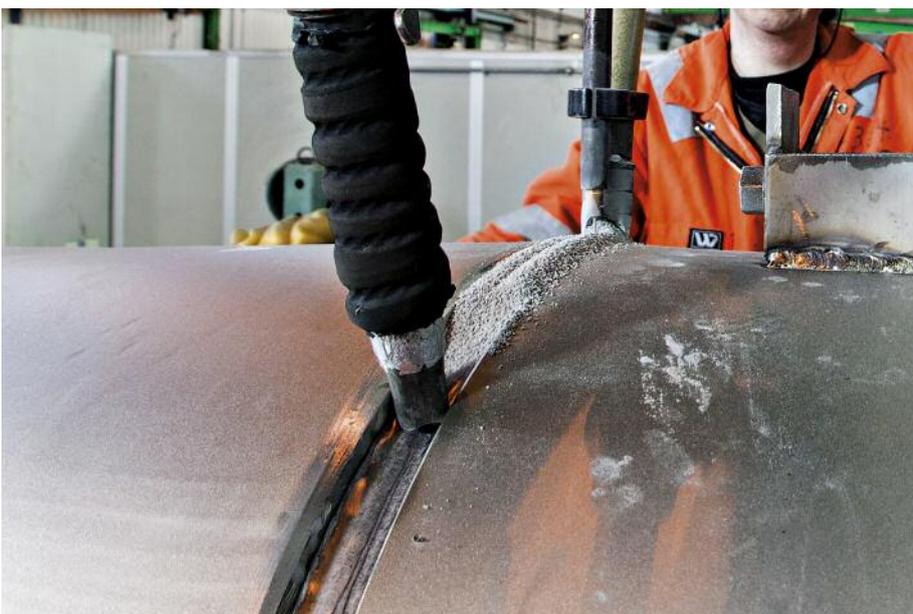
Auch wenn hohe Abscheidungsraten attraktiv sein mögen, so können die großen Schweißbrauen sowie die niedrigen Abkühlungs- und Verfestigungsraten des Unterpulverschweißens gleichwohl

Probleme verursachen. Im Falle von Stumpfnähten sind die Standardsorten AISI 304L und 316L (EN 1.4307 und 1.4404) – angesichts der hohen Wärme-einbringung werden niedrig-kohlenstoff-

haltige Sorten bevorzugt – am leichtesten zu schweißen. Werden austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle unterpulvergeschweißt, müssen Wärmeeinbringung und Zwischenlagentemperatur präzise gesteuert werden (siehe die Hinweise in Abschnitt 12.1.8.3). Wie in Tabelle 18 erwähnt, werden diese Legierungen normalerweise mit Ni-Cr-Mo-Zusatzwerkstoffen geschweißt. Das Unterpulverschweißen eignet sich besonders für das horizontale Auftrags-schweißen von nichtrostendem Stahl auf unlegierten Stahl. Hinweise, wie durch die sachgerechte Kombination von Werkstoff und Pulver die vorgegebenen Zusammensetzungen der Schweißnaht erzielt werden, stehen zur Verfügung (5, 23). **Tabelle 24** führt einige typische Verfahrensparameter auf.

### 12.1.6 Artverschiedene Schweißungen

Austenitische nichtrostende Stähle lassen sich leicht mit anderen austenitischen Sorten, mit nichtrostenden Duplexstählen sowie mit un- und niedriglegierten Stählen verschweißen. Bei



Unterpulverschweißen © ESAB Welding & Cutting

Tabelle 24: Typische Schweißparameter für das Unterpulverschweißen nichtrostender Standardsorten mit neutralem oder leicht basischem Pulver (23)

Drahtdurchmesser		Stromstärke A	Spannung V	Schweißgeschwindigkeit	
mm	Zoll			cm/min.	Zoll/min.
2,4	0,094	200–350	27–33	30–60	12–24
3,2	0,125	300–600	30–36	30–60	12–24
4,0	0,157	400–700	30–36	30–60	12–24

artverschiedenen Schweißungen sind sowohl die Eigenschaften der zu verbindenden Metallwerkstoffe als auch die des Zusatzwerkstoffs zu berücksichtigen, denn der Schweißvorgang ergibt eine neue Legierung aus den Grundwerkstoffen und dem Zusatzwerkstoff. Details über artverschiedene Schweißungen sind der Nickel-Institute-Veröffentlichung Nr. 14018 (26) sowie dem ISER-Merkblatt 823 zu entnehmen, nachstehend finden sich hierzu noch einige Hintergrundinformationen.

Beim Verschweißen von nichtrostendem und unlegiertem Stahl sollte es in der Mischzone nicht zu nennenswerter Martensitbildung kommen. Martensit verringert die Duktilität der Schweißnaht und macht sie anfällig für wasserstoffbedingte Schweißfehler. Im Bereich der Aufmischung sollte die Schweißnaht Austenit sowie mindestens 5 % Ferrit enthalten, um eine gute Heißrissbeständigkeit aufzuweisen. Die Zusammensetzung des Nahtbereiches lässt sich abschätzen, wenn man annimmt, dass er zu ca. 70 % aus dem Schweißzusatzwerkstoff besteht und zu 30 % aus den Grundwerkstoffen (d. h. je 15 % aus nichtrostendem und unlegiertem Stahl). Aus dem Schaeffler-Diagramm (Abbildung 5) werden dann die in der Naht zu erwartenden Phasen ersichtlich. Ein nichtrostender Schweißzusatzwerkstoff mit erhöhtem Ferritanteil wie E309L oder E309MoL (20 10 3 L oder 22 12 2) ist für die Verbindung einer austenitischen Standardsorte mit unlegiertem Stahl eine gute Wahl. Bei einem magereen Schweißzusatzwerkstoff des Typs 308 könnte sich durch die Aufmischung mit unlegiertem Stahl Martensit bilden, der die Schweißnaht verspröden ließe. Werden austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle mit unlegiertem

Stahl verschweißt, hängt die Wahl des Schweißzusatzwerkstoffs von der nichtrostenden Sorte ab. Besondere Hinweise hierzu finden sich in den Quellen 23 und 26.

Artverschiedene Schweißverbindungen müssen den mechanischen und korrosionsseitigen Anforderungen genügen, die durch die Betriebsbedingungen vorgegeben werden. Die Schweißnaht sollte mindestens ebenso fest sein wie der schwächere der Werkstoffpartner. Wenn die Betriebsbedingungen Temperaturzyklen umfassen, sollte die Wärmeausdehnung der Schweißnaht jener der Grundwerkstoffe ähneln, um ermüdungsbedingte Schäden zu vermeiden. Allerdings gilt bei Mischverbindungen von un- oder niedriglegiertem mit austenitischem nichtrostendem Stahl der Unterschied in der Wärmeausdehnung als unkritisch, solange die Betriebstemperatur bei 425 °C (800 °F) oder darunter liegt.

Werden zwei molybdänlegierte nichtrostende Stähle miteinander verschweißt, sollte ein Schweißzusatzwerkstoff verwendet werden, dessen Molybdängehalt mindestens dem des höher molybdänlegierten Werkstoffpartners entspricht. Das gilt auch für Verbindungen zwischen austenitischem und nichtrostendem Duplex-Stahl.

### 12.1.7 Qualitätsaspekte der Schweißung

Schweißungen von nichtrostendem Stahl (Naht und Wärmeeinflusszone) müssen der jeweiligen Beanspruchung entsprechend sowohl korrosionsbeständig als auch mechanisch belastbar sein. Normalerweise sollte eine Schweißnaht mindestens so korrosionsbeständig wie der Grundwerkstoff sein und vor-

zugsweise eine leicht höhere Festigkeit aufweisen. Schweißnahtqualität lässt sich unter zwei Aspekten betrachten: physische Schweißfehler (12.1.7.1–12.1.7.5) und metallurgische Probleme (12.1.7.6–12.1.7.9). Beide können Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit beeinträchtigen und müssen daher vermieden werden. Ungenügende Schweißungen müssen so repariert werden, dass sie die gestellten Anforderungen erfüllen. Die meisten physischen Schweißfehler sind aus dem Schweißen von unlegierten Stählen bekannt, während die metallurgischen Aspekte spezifisch für nichtrostende Stähle sind. Nachstehend einige Hinweise, wie qualitativ hochwertige Schweißungen zu erzielen sind.

#### 12.2.7.1 Unvollständiges Durchschweißen

Unvollständiges Durchschweißen findet sich am häufigsten bei Stoßschweißungen von Rohren oder anderen Stoßschweißungen, die nicht beidseitig ausgeführt werden. Sie führt zu einem Spalt, der zum Ausgangspunkt von Korrosion werden kann. Außerdem können sich dort Schmutz und Verunreinigungen festsetzen und anreichern. Der Spalt setzt Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Verbindung herab und erschwert dessen Reinigung und Desinfektion stark. Eine hochwertige Stumpfnahht muss daher durchgeschweißt werden. Anderenfalls kann ihre (Ermüdungs-) Festigkeit deutlich beeinträchtigt sein. Um diese Probleme zu vermeiden, ist es wichtig, eine geeignete Schweißnahtgeometrie zu wählen und erforderlichenfalls eine rückseitige Fuge zu hobeln und die Naht gegenzuschweißen.

#### 12.1.7.2 Porosität

Oberflächliche Porosität bildet einen Angriffspunkt für Schmutz und Verunreinigungen und kann Korrosion auslösen. Sie behindert die (keimarme) Reinigung, weil sie die Ablagerung von Schmutz und Bakterien begünstigt. Porosität in der Schweißnaht hat ihre Ursache häufig in Feuchtigkeit, die von Schweißpulver, Schutzgas oder Werkstückoberflächen ausgeht. Durch Sorgfalt bei Trocknung der Elektroden, Wahl des Schutzgases und vorbereitender Reinigung lässt sie sich minimieren. Es ist wichtig, als Grundlage für die Durchstrahlungs- und Sichtprüfung Akzeptanzkriterien für Porosität in Schweißnähten zu formulieren.

### 12.1.7.3 Zündstellen und Schweiß-spritzer

Zündstellen und Schweißspritzer bilden Spalte und können daher zu Spaltkorrosion führen. Um diese Defekte zu minimieren, sollte der Lichtbogen in der Schweißnaht gezündet werden und nicht daneben. Falls sie doch entstehen, sollten sie entfernt werden, z. B. durch leichtes Schleifen.



Schweißspritzer und ungleichmäßige Schweißraupen sind zu vermeiden. © Outokumpu

### 12.1.7.4 Mikro- und Erstarrungsrisse

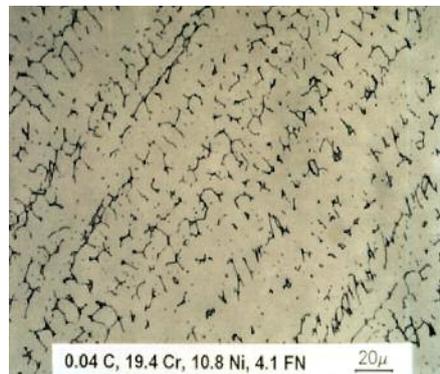
Mikrorisse sind winzige, kurze Risse, die in Schweißnähten von austenitischem nichtrostendem Stahl entstehen können. Dass sie sich ausbreiten und die Schweißnaht mechanisch schwächen, geschieht nur selten; allerdings können sie unter bestimmten Bedingungen zum Ausgangspunkt von Lokalkorrosion werden. Die Bildung von Heißrissen – Erstarrungs- oder Wiederaufschmelzungsrissen – ist dagegen ein ernstzunehmender Defekt, den es zu vermeiden gilt.

Die Zusammensetzung der gängigsten Zusatzwerkstoffe, 308(L) und 316(L), ist so ausgelegt, dass üblicherweise ein Ferritgehalt von 5–10 % erreicht wird, der die Neigung zur Bildung von Mikro- und Erstarrungsrissen stark vermindert. Ferrit fängt Schrupfspannungen auf und besitzt eine höhere Löslichkeit für Schwefel, Phosphor und bestimmte andere Verunreinigungen, die den Austenit verspröden lassen. Mikro- und Erstarrungsrisse treten in Schweißnähten von Standardsorten mit dem empfohlenen Ferritgehalt normalerweise nicht auf, können jedoch nicht ausgeschlossen werden, wenn bei diesen Sorten die Wärmeeinbringung sehr hoch ist, bei starker Eigenspannung oder konkaven Nähten. Die American Welding Society (AWS A5.4) definiert eine Ferritzahl, mit welcher der Ferritgehalt einer

Schweißnaht beziffert wird. Sie entspricht annähernd dem Volumenanteil von Ferrit in der Schweißnaht austenitischer Werkstoffe. Die nachstehenden Abbildungen zeigen zwei Schweißzusatzwerkstoffe mit jeweils unterschiedlichen Ferritgehalten.

Zusatzwerkstoffe zur Schweißung austenitischer nichtrostender Hochleistungsorten ergeben keine ferrithaltigen Nähte, wodurch diese Stähle anfällig für Mikro- und Erstarrungsrisse sind. Diese Zusatzwerkstoffe haben extrem niedrige Phosphor- und Schwefelgehalte, die diese Probleme minimieren. Allerdings müssen auch die Wärmeeinbringung und andere Schweißparameter genau gesteuert werden, wenn bei Hochleistungsorten gute Resultate erzielt werden sollen. Eine allgemein anerkannte Grenze für die Wärmeeinbringung liegt bei 1,5 kJ/mm (38 kJ/Zoll).

Praktiken, die das Schweißbad vergrößern (z. B. übermäßiges Pendeln) sollten beim Schweißen nichtrostender Stähle vermieden werden. Eine größere Schmelzzone führt auch zu größeren Erstarrungsspannungen. Zudem kann sie zu Kornvergrößerung in Schmelz- und Wärmeeinflusszone führen. Größeres Korn hat weniger Grenzflächen als feineres. Dadurch kommt es an den Korngrenzen zu entsprechend höheren Konzentrationen von Verunreinigungen, die wiederum die Korrosionsbeständigkeit herabsetzen können. Übermäßige Schrupfspannungen und erhöhte Konzentrationen von Spurenelementen an den Korngrenzen können die Bildung von Erstarrungsrissen begünstigen.



Austenitische nichtrostende Schweißzusatzwerkstoffe mit unterschiedlichen Ferritanteilen © Lincoln Electric

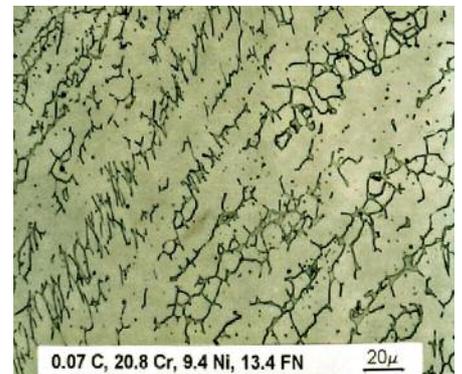
### 12.1.7.5 Sonstige Defekte

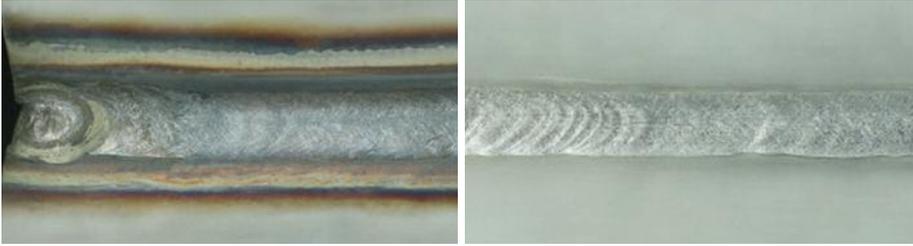
Sonstige Schweißfehler wie Bindefehler und Schlackeneinschlüsse zwischen den Lagen sind bei austenitischem nichtrostendem Stahl ebenso inakzeptabel wie bei unlegiertem. Oberflächlich an einer Schweißnaht anhaftende Schlacke kann unter korrosiven Bedingungen Ausgangspunkt von Korrosion werden. Auch eine raue Oberflächenbeschaffenheit vermindert die Korrosionsbeständigkeit. Hinterscheidungen können die Ermüdungseigenschaften der Schweißnaht deutlich verschlechtern. Zu große Schweißnahtüberhöhung – sei es vorder- oder rückseitig – kann ebenfalls deren Eigenschaften beeinträchtigen.

### 12.1.7.6 Oberflächenoxide

Anlauffarben auf der Innenseite geschweißter Rohre stellen in vielen Anwendungen ein Problem dar. Es bestehen mehrere Möglichkeiten, sie zu entfernen oder zu minimieren. Eine liegt in der Spülung mit einem wirksamen Inertgas. Bei der Herstellung stumpfer Nähte durch Wolfram-Inertgas-Orbitalschweißen sind Passgenauigkeit und Inertgasspülung erforderlich, wenn die Naht im Wesentlichen frei von Anlauffarben sein soll. Beim manuellen Wolfram-Inertgasschweißen von Wurzel-lagen kommt es häufig zur Bildung gewisser Anlauffarben. Je nach deren Stärke und den späteren Betriebsbedingungen müssen sie evtl. durch Beizen oder Schleifen entfernt werden.

Anlauffarben setzen die Loch- und Spaltkorrosionsbeständigkeit deutlich herab, insbesondere bei austenitischen nichtrostenden Standardsorten. Ein





Anlauffarben im Bereich einer hochwertigen schutzgasgeschweißten Naht und der Wärmeeinflusszone: Eine Schweißnaht-Nachbehandlung durch Beizen stellt die Korrosionsbeständigkeit der Schweißnaht wieder her. © Outokumpu

weiteres potentiell Problem ist mikrobiell beeinflusste Korrosion. Bereiche mit Anlauffarben sind anfälliger für mikrobiell beeinflusste Korrosion, wie sich im Falle von unbehandeltem Wasser insbesondere bei niedriger Fließgeschwindigkeit oder Stagnation zeigt. Wenn Systeme nach Drucktests nicht entleert und getrocknet werden, kann selbst gewöhnliches Leitungswasser mikrobiell beeinflusste Korrosion auslösen.

Bei der Formulierung von Akzeptanzkriterien für Anlauffarben in Fällen, in denen sie nicht entfernt werden können, bestehen zwei Schwierigkeiten. Die erste liegt darin, Umfang und Stärke der auf einer Schweißung vorhandenen Anlauffarben zu quantifizieren. In einigen Branchen bestehen Tafeln mit Referenzfotos zum Vergleich der vorliegenden mit den abgebildeten Anlauffarben. Eine solche Tafel liegt in AWS D18.1 und D 18.2 vor. Die zweite Schwierigkeit besteht darin festzustellen, welche Anlauffarben für die jeweilige Anwendung akzeptabel sind.

Der Verlust an Korrosionsbeständigkeit ist bei Standardsorten wie AISI 304L und 316L (EN 1.4307 und 1.4404) ausgeprägter als bei austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen. Wenn es besonders schwierig oder kostspielig ist, Anlauffarben zu entfernen, ist u. U. die Entscheidung für eine korrosionsbeständigere Sorte eine planerische Möglichkeit, deren Auswirkungen zu begrenzen.

#### 12.1.7.7 Sensibilisierung

Standardsorten mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt können bereits durch einen relativ kurzen Aufenthalt im Temperaturbereich zwischen 480 °C und 900 °C (900 °F und 1650 °F) sensibilisiert

werden (Abbildung 8). Hierdurch kann es zu Anfälligkeit gegen interkristalline Korrosion in wässrigen oder sauren Medien kommen (Abschnitt 6.3). Allerdings sind moderne Standardsorten faktisch häufig „L-Sorten“ mit üblicherweise weniger als 0,03 % Kohlenstoff. Sie sind daher bei normaler schweißtechnischer Verarbeitung beständig gegen Sensibilisierung, sofern nicht noch eine anschließende Wärmebehandlung vorgenommen wird. So dauert es z. B. selbst bei der höchsten Sensibilisierungstemperatur rund eine Stunde, einen nichtrostenden Stahl des Typs AISI 304 (EN 1.4301) mit 0,042 % Kohlenstoff zu sensibilisieren (Abbildung 8) – wesentlich länger, als der Werkstoff beim Schweißen entsprechenden Temperaturen ausgesetzt ist. Gleichwohl sollte insbesondere bei großen Querschnitten der Verbleib im kritischen Temperaturbereich begrenzt bleiben.

Der Einsatz niedrig-kohlenstoffhaltiger Sorten hilft, bei größeren Querschnitten und bei Bauteilen, die später noch wärmebehandelt werden, Sensibilisierung zu vermeiden. Der Stahl AISI 316L (EN 1.4404) toleriert hohe Temperaturen recht lange, so dass selbst dicke Querschnitte sicher abkühlen können (Abbildung 8). Mit „L-Sorten“ ist selbst das Spannungsarmglühen von Mischkonstruktionen aus nichtrostendem und unlegiertem Stahl möglich.

Allerdings weisen hochtemperaturbeständige Sorten häufig einen Mindestgehalt an Kohlenstoff von 0,04 % auf (AISI 304H/EN 1.4948), der ihnen eine bessere Warmfestigkeit verleiht. Glücklicherweise ist Korrosion durch Wasser in Anwendungen bei erhöhten Temperaturen normalerweise kein Problem. Solche Sorten erfordern im Allgemeinen einen

höher-kohlenstoffhaltigen Schweißzusatzwerkstoff, damit die Schweißnähte bei erhöhten Temperaturen eine ausreichende Festigkeit besitzen.

Die stabilisierten Sorten AISI 321 und 347 (EN 1.4541 und 1.4550) können Messerlinienkorrosion erleiden, wenn sie während des Schweißens Temperaturen im Bereich von 480 °C bis 900 °C (900 °F bis 1650 °C) ausgesetzt werden. Wenn Bedenken wegen möglicher Messerlinienkorrosion bestehen, sollte nach dem Schweißen eine Lösungsglühlung mit anschließender stabilisierender Wärmebehandlung erfolgen. Der Mechanismus der Messerlinienkorrosion wird in Abschnitt 6.3.2 behandelt.

Die meisten austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstähle haben einen noch niedrigeren Kohlenstoffgehalt als die sog. L-Sorten, weil sie ansonsten bei gleichem C-Gehalt noch schneller sensibilisiert würden. Allerdings ist die Bildung von Sekundärphasen im Falle der Hochleistungsarten deutlich kritischer als die Sensibilisierung.

#### 12.1.7.8 Intermetallische Phasen

Im Temperaturbereich von 500 °C bis 1050 °C (930 °F bis 1925 °F) können sich intermetallische Sigma- und Chi-Phasen bilden. Sie beeinträchtigen Korrosionsbeständigkeit und Zähigkeit nichtrostender Stähle deutlich. Ein 5 %iger Gehalt an Sigmaphase vermindert die Schlagzähigkeit um 50 %.

Höhere Chrom- und Molybdängehalte begünstigen die Bildung intermetallischer Phasen stark: Bei austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen können sich innerhalb von weniger als einer Minute im kritischen Temperaturbereich Sigma- und Chi-Phase bilden. Bei den Schweißparametern sollten daher die Wärmeeinbringung niedrig sein (unter 1,5 kJ/mm bzw. 38 kJ/Zoll) und die Zwischenlagentemperatur unter 100 °C (212 °F) liegen, damit der Aufenthalt im kritischen Temperaturbereich so kurz wie möglich gehalten wird. Die Zwischenlagentemperatur sollte am Ende der Lage auf der Schweißraupe mit einem elektronischen Präzisions-Thermoelement gemessen werden. Wärmeempfindliche Markierungsstifte sollten nicht benutzt werden, da diese die Schweißnaht kontaminieren können.

Standardsorten müssen in dem zu meidenden Temperaturbereich üblicherweise mehr als 100 Stunden oder mehr verbleiben, bevor sich intermetallische Bestandteile bilden. Wegen dieser langsamen Kinetik entstehen Sigma- und Chi-Phase bei der Verarbeitung von Standardstählen normalerweise nicht; allerdings können sie bei fortgesetztem Hochtemperatur-Einsatz problematisch werden.

### 12.1.7.9 Seigerung

Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle sind aufgrund ihres hohen Mo-Gehalts anfällig für die Mikro-seigerung von Molybdän in der Schweißung. Dieser Effekt tritt während der Erstarrung auf: Das zuerst erstarrende Metall enthält weniger Molybdän als das später erstarrende, so dass feine Abstufungen im Molybdängehalt entstehen. Bei einem nichtrostenden Stahl mit 6 % Molybdän können sich geringer Mo-haltige Bereiche mit deutlich verminderter Korrosionsbeständigkeit bilden.

Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle erfordern daher überlegierte Schweißzusatzwerkstoffe, welche die Mikro-seigerung kompensieren. Die als Schweißzusatzwerkstoff für 6%-Mo-Sorten empfohlene Nickelbasislegierung enthält 9 % Molybdän. Damit werden auch in den zuerst erstarrenden Bereichen mindestens 6 % Molybdän erreicht – die Korrosionsbeständigkeit bleibt in der Schweißnaht erhalten.

Wegen der Seigerungsproblematik sollten Bauteile aus austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen, die nicht anschließend gegläht werden können, nicht ohne Schweißzusatzwerkstoff geschweißt werden. Letzteres ist nur akzeptabel, wenn die Schweißkonstruktion anschließend lösungsgegläht wird, so dass sich die Schweißnaht homogenisiert, die Mikro-seigerung verringert und die Korrosionsbeständigkeit wiederherstellt.

## 12.2 Hart- und Weichlöten

Hart- und Weichlöten stellen Füge-techniken dar, bei denen Teile aus einem Grundwerkstoff mittels einer schmelzflüssigen Legierung verbunden werden, deren Schmelzpunkt deutlich unter dem des Grundwerkstoffs liegt. Damit

bleibt der Grundwerkstoff zu jeder Zeit im festen Aggregatzustand. Der Unterschied zwischen Weich- und Hartlöten liegt vor allem in der Löttemperatur. Die American Welding Society definiert Weichlöten als eine Verbindung bei weniger als 427 °C (800 °F). Auch wenn, technisch gesehen, das Hartlöten oberhalb dieser Temperatur beginnt, hat sich dieser Begriff zunächst für Silber eingebürgert, bei dem die Löttemperaturen zumeist im Bereich von 595 °C bis 705 °C (1100 °F bis 1300 °F) liegen.

Alle nichtrostenden Stähle lassen sich weich- und hartlöten. Die Anforderungen an gute Löt-nähte sind dabei für nahezu alle Sorten ähnlich: Die Oberflächen müssen sauber sein, ein nicht-korrosives Flussmittel sollte verwendet werden und es ist darauf zu achten, dass, sofern die entsprechende Temperaturzone erreicht wird, keine Sensibilisierung eintritt. Die Unterschiede zwischen den Sorten betreffen vor allem deren Korrosionsbeständigkeit. Korrosionsbeständigere Sorten erfordern aggressivere Flussmittel.

### 12.2.1 Hartlöten

Die meisten nichtrostenden Stähle werden mit Zusatzwerkstoffen gelötet, die den folgenden Kategorien zuzuordnen sind:

- Silberlegierungen (L-Ag-Gruppe),
- Nickellegierungen (L-Ni-Gruppe),
- Kupferlegierungen (L-Cu-Gruppe),
- Goldlegierungen (L-Au-Gruppe).

Welche Legierung zur Anwendung kommt, hängt von den Anforderungen an mechanische Eigenschaften, Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperaturbeständigkeit ab.

Silberlegierungen (Ag-Cu-Zn und Ag-Cu-Zn-Cd) sind am weitesten verbreitet und können für alle austenitischen Sorten verwendet werden. Gemäß der Verordnung Nr. 494/2011 sind Cd-haltige Hartlote in der EU verboten.

Die Hartlöt-Temperaturen der meisten Silberlote liegen im sensibilisierenden Bereich, so dass es zu Chromcarbid-ausscheidungen und Sensibilisierung kommen kann. Aus diesem Grund werden Sorten wie AISI 347 (EN 1.4550)

oder niedrig-kohlenstoffhaltige Stähle für das Hartlöten mit Silber bevorzugt. Da die meisten Silberlote Kupfer und/oder Zink enthalten, sollte eine länger anhaltende Überhitzung vermieden werden, da sie zu Flüssigmetallversprödung des nichtrostenden Stahls führen kann.

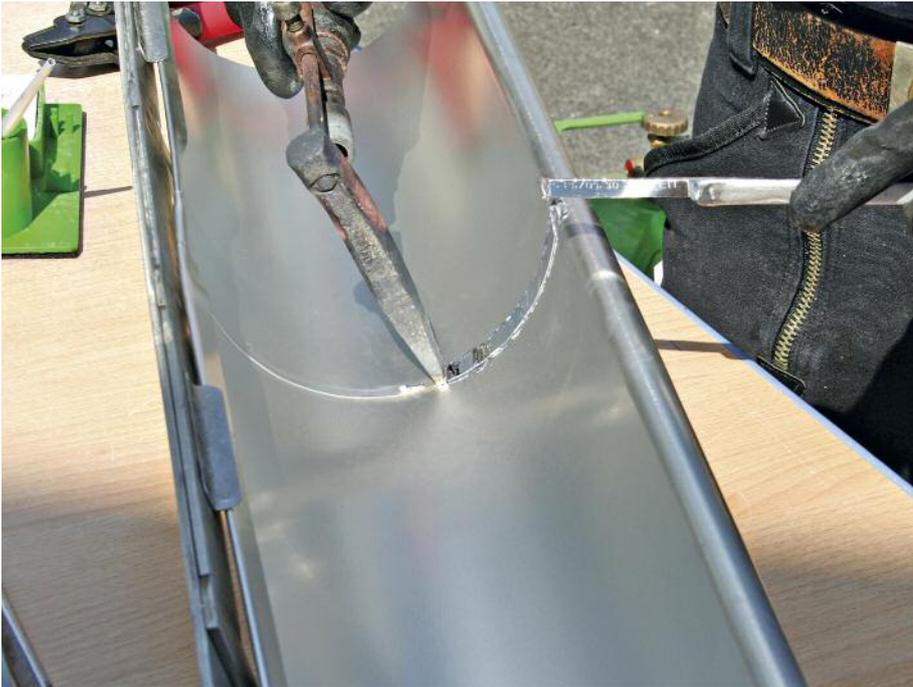
Nickellegierungen werden in der Regel dann gewählt, wenn es auf besondere Korrosionsbeständigkeit und hohe Festigkeit bei erhöhten Temperaturen ankommt. Dabei geht es überwiegend um Ni-Cr-B-Si-Legierungen. Die meisten Nickellegierungen erfordern hohe Hartlöt-Temperaturen (zwischen 927 °C und 1204 °C bzw. 1700 °F und 2200 °F). Auch wenn diese Temperaturspanne oberhalb des sensibilisierenden Bereiches liegt, muss insbesondere bei austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstählen der Einfluss der Hartlöttemperatur und des Kühlzyklus auf den Grundwerkstoff beachtet werden.

Kupferlote bestehen im Wesentlichen aus reinem Kupfer und erfordern hohe Löttemperaturen. Ihre Fließ-eigenschaften sind günstiger als die von Nickelloten und erlauben eine engere Löt-fuge. Leider haben Kupferlegierungen eine geringere Korrosionsbeständigkeit, was ihre Einsatzmöglichkeiten begrenzt.

Goldlote sind besonderen Anwendungen vorbehalten, bei denen die Korrosionsbeständigkeit und die Duktilität der Naht andere Lote ausschließen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Au-Cu- und Au-Pd-Ni-Legierungen. Deren hohe Kosten beschränken die Nutzung auf Nischenanwendungen, z. B. in der Luft- und Raumfahrtindustrie.

Baugruppen aus nichtrostendem Stahl werden üblicherweise in einem Ofen bei Inertgasatmosphäre oder Vakuum hartgelötet. Unter stark reduzierenden oder inerten Bedingungen ist ein Flussmittel nicht erforderlich. Das Hartlöten mit einer Löt-lampe erfordert dagegen immer ein Flussmittel. Induktions- und Widerstandslöten erfordern ein Flussmittel, wenn sie nicht unter Schutzgas oder im Vakuum ausgeführt werden.

Für nichtrostenden Stahl gibt es eine Vielzahl von Flussmittel-Zusammensetzungen. So eignen sich Flussmittel



Nichtrostender Stahl lässt sich leicht wechlöten, erfordert jedoch spezielle Flussmittel  
© BRANDT Edelstahl Dach GmbH

wie AWS 3A und 3B. Sie enthalten Borsäure, Borate, Fluoride, Fluorborate und ein Netzmittel. Das Flussmittel muss nach dem Hartlöten vollständig entfernt werden, um Korrosion durch Flussmittelrückstände zu vermeiden.

### 12.2.2 Wechlöten

Nichtrostende Stähle werden zumeist mit Zinn-Blei- oder Zinn-Silber-Loten gefügt, wobei in der Branche bleihaltige Produkte zunehmend gemieden werden. Das Wechlöten ist vor allem eine Fügetechnik; sie dient aber auch dazu, Spalte zu verschließen oder scharfe Ecken abzurunden. Die meisten nichtrostenden Stähle lassen sich gut wechlöten. Ausnahmen bilden titanstabilisierte Sorten wie AISI 321 (EN 1.4541) sowie oxidationsbeständige Stähle. Zu letzteren zählen aufgrund ihres hohen Chromgehalts auch die austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstähle, die folglich schwieriger wechlöten sind. Übliche Lötässer können die festhaftenden Oxide austenitischer nichtrostender Hochleistungsstähle, welche

die Benetzung der Werkstoffoberfläche durch das Lot behindern, nicht entfernen. Entsprechend stärkere Lötässer sind erforderlich, um diese Stähle erfolgreich wechlöten zu können.

Das Lötasser muss die Passivschicht des nichtrostenden Stahls entfernen, um die Benetzung des Grundwerkstoffs

durch das Lot sicherzustellen. Am häufigsten finden sich säurebasierte Lötässer; für nichtrostende Stähle gibt es besondere Zusammensetzungen. Bei den Standardsorten haben sich phosphorsäure- und salzsäurehaltige Produkte bewährt. Oxidationsbeständigere Sorten mit höheren Cr-, Mo-, Al- oder Ti-Gehalten erfordern Lötässer mit Fluorwasserstoffsäure. Wichtig ist, die Oberflächen nach dem Wechlöten gründlich zu reinigen und neutralisieren, um spätere Korrosionsprobleme durch hochkorrosive Lötässerrückstände zu vermeiden. Der Fluorwasserstoffgehalt dieser Lötässer erfordert besondere Vorkehrungen für sichere Handhabung und Gebrauch.

Auch die Oberflächenausführung spielt für die Benetzung eine Rolle. Gebeizte Oberflächen (1 oder 2D) sind besser lötbar als glattere wie 2B oder BA (blankgeglüht).

Die Lötnaht stellt eine metallische Mischverbindung dar, die anfällig für galvanische Korrosion sein kann. Da das Lot ein niedrigschmelzendes, „weiches“ Material ist, entspricht die Festigkeit der Verbindung der Festigkeit des Lots. Überlappende Nähte und Muffenverbindungen sind wegen ihrer größeren Kontaktfläche fester als einfache Stoßnähte. **Tabelle 25** fasst Vorteile und Grenzen des Lötens von nichtrostenden Stählen zusammen.

Tabelle 25: Vorteile und Grenzen von Lötverbindungen

Vorteile	Grenzen
Herstellung gasdichter Verbindungen bei niedrigen Temperaturen	Verminderte Korrosionsbeständigkeit im Bereich der Naht
Metallurgische Auswirkungen hoher Temperaturen werden vermieden	Schneller Festigkeitsverlust bei steigenden Temperaturen
Nur minimaler Verzug	Geringe Festigkeit im Vergleich zum nichtrostenden Grundwerkstoff und zu geschweißten Verbindungen
Niedrigere Kosten als bei anderen Verfahren	Evtl. Zugeständnisse beim Aussehen
Überdeckt Spalte und runde Ecken	Langsamer als das Schweißen

# 13 Mechanische Verbindungstechniken

Alle üblichen mechanischen Verbindungstechniken lassen sich auch für nichtrostenden Stahl einsetzen. Zumeist werden sie bei Raumtemperatur angewandt. Mit Ausnahme des Warmnietens sind also Oxidation oder unerwünschte Ausscheidungen kaum zu befürchten. Dennoch sollten einige Punkte beachtet werden. Einer liegt in den unvermeidlichen Spalten, die in chloridhaltigen Medien zu Spaltkorrosion führen können (siehe Abschnitt 13.2.1). Ein anderer ist mögliche galvanische Korrosion, wenn die Verbindung aus unterschiedlichen metallenen Werkstoffen besteht (siehe Abschnitt 13.2.2). Mechanische Verbindungen sind zumeist weniger fest als Schweißverbindungen und werden für hygienekritische Anwendungen, die reinigungsfreundlich sein müssen, nicht empfohlen.

## 13.1 Verbindungstechniken

### 13.1.1 Schrauben

Auch wenn ausscheidungshärtende und Duplex-Sorten in Festigkeit und Kaltverschweißungsverhalten für Schraubverbindungen günstiger sind, werden austenitische nichtrostende Stähle hierfür häufig eingesetzt. Schrauben und

Muttern sind in Standardsorten marktgängig, nicht jedoch in Hochleistungssorten. Befestigungsmittel aus austenitischem nichtrostendem Stahl neigen im geglühten Zustand zu Kaltverschweißung („Fressen“). Daher werden kaltverfestigte, hochfeste oder solche Sorten bevorzugt, die gegen Kaltverschweißung beständig sind. Einige austenitische Stähle der 200er-Serie, z. B. UNS S24000 und S21800, sind weit weniger anfällig für Kaltverschweißung und werden daher häufig für Befestigungsmittel verwendet. Konstruktiv bedeutsam sind bei Schraubverbindungen die Lage der Bohrungen sowie die Zug- und Schubfestigkeit. Die Festigkeit einer Schraubverbindung ist i. d. Regel niedriger als die einer Schweißverbindung. Referenz 27 umfasst einen Leitfaden für die Konstruktion von Schraubverbindungen.

### 13.1.2 Nieten

Niete aus nichtrostenden Standardstählen stehen in den meisten üblichen Kopf- und Schaftdurchmessern zur Verfügung. Niete sollten auf Scherung und nicht auf Zug belastet werden. Die im Kontakt miteinander befindlichen Oberflächen müssen sauber und frei von Graten sein. Die Nietlöcher müssen im



Klappmesser mit Niet aus austenitischem nichtrostendem Stahl, der ein festes und korrosionsbeständiges Gelenk bildet. © Victorinox

Interesse der Passgenauigkeit präzise ausgerichtet werden. Das Eintreiben eines Niets und die Bildung des Schließkopfes bewirken eine Kaltumformung des Nietwerkstoffs. Wegen ihrer im Vergleich zu unlegierten Stählen ausgeprägteren Kaltverfestigung erfordern austenitische nichtrostende Stähle leistungsstärkere Nietwerkzeuge.

Das Nieten kann kalt oder warm erfolgen. Das Kaltnieten vermeidet Zunderbildung und spart die Kosten der Aufheizung. Beim Warmnieten entsteht ein höherer Andruck, weil sich der Schaft beim Abkühlen zusammenzieht. Niete aus nichtrostendem Stahl werden vor der Verarbeitung auf 1065 °C bis 1150 °C (1950 °F bis 2100 °F) erhitzt. Der Nietvorgang sollte abgeschlossen sein, bevor die Temperatur auf unter 930 °C (1700 °F) fällt.

### 13.1.3 Clinchen

Das Clinchen stellt eine punktuelle Umformung dar, die dazu dient, eine druckknopfähnliche Verbindung zwischen zwei Werkstoffen herzustellen (**Abbildung 31**). Es ist eine Alternative zum Nieten oder Punktschweißen und kann bei allen dünnen, duktilen Werkstoffen



Verschraubte Flanschverbindung © Super8/Shutterstock.com

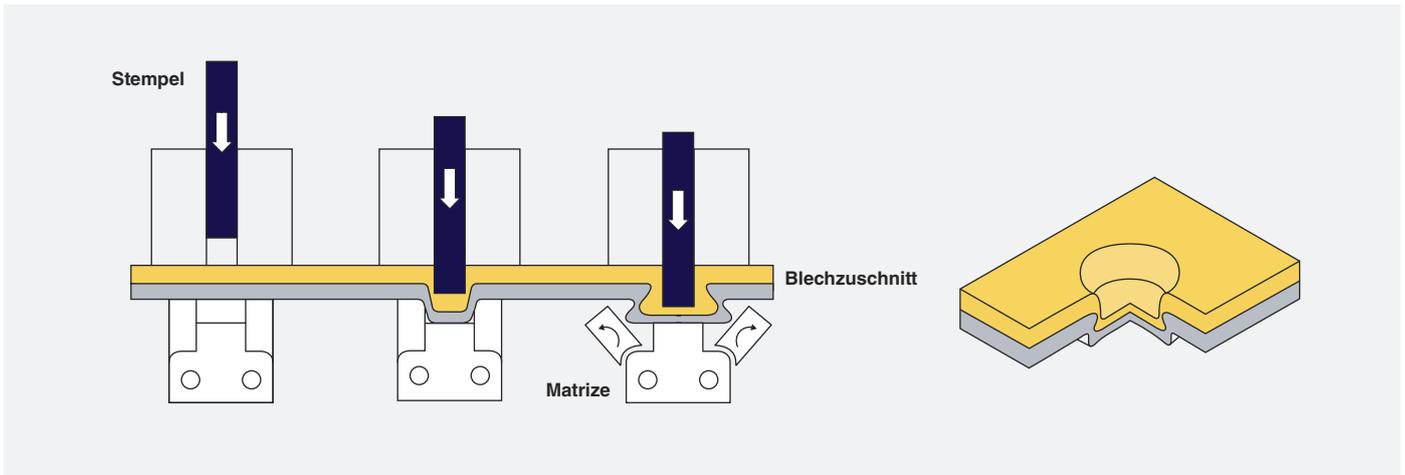


Abbildung 30: Clinchen (basierend auf (28))

angewandt werden. Clinchen und Kleben werden häufig miteinander kombiniert, so dass eine hermetisch versiegelte Verbindung entsteht, bei der keine Flüssigkeit in den Spalt eindringen kann.

### 13.1.4 Falzen

Beim Falzen werden die Kanten zweier Bleche in einem Winkel von 180° so umgelegt, dass eine dichte Verbindung entsteht (**Abbildung 31**). Diese Verbindungstechnik wird bei nichtrostendem Stahlblech von 1,6 mm (0,062 Zoll) oder weniger angewandt. Sie ist bei Bedachungen und Haushaltsgeräten weit verbreitet. In den Falz eingebrachte Dichtbänder verbessern die Dichtigkeit. Derartige Verbindungen weisen einen engen Spalt auf, der die Reinigung erschwert und das Risiko der Spaltkorrosion erhöht. Der Spalt kann, sofern die Einsatzbedingungen es zulassen, mit Lötmittel verschlossen werden, um Korrosion vorzubeugen.



Die Doppelfalze dieser Stehfalzbedachung ergeben auch unter den harschen Bedingungen im Hochgebirge – hohe Windgeschwindigkeiten, hohe Schneelasten und extreme Temperaturen – eine dauerhaft dichte Verbindung. © Roofinox

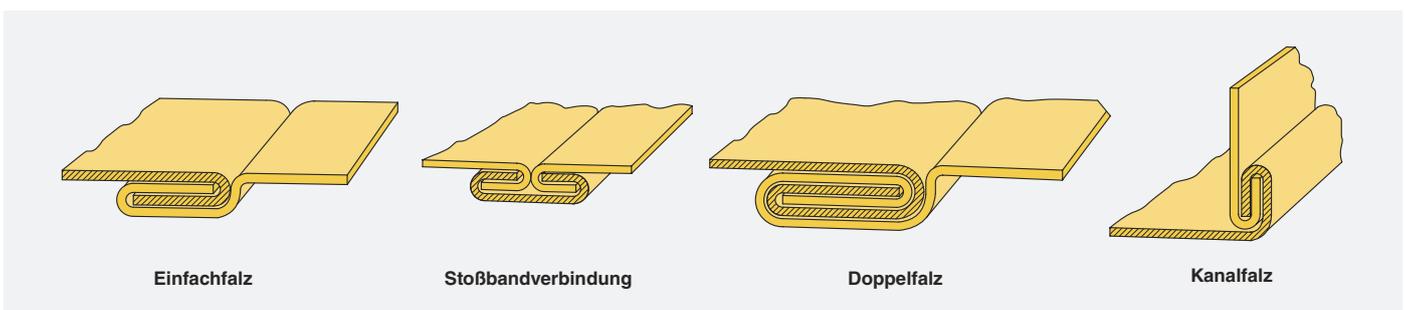


Abbildung 31: Typische Falzverbindungen (19)

### 13.1.5 Kleben

Beim Kleben werden Werkstoffe mittels eines Klebstoffs miteinander verbunden. Da geklebte Verbindungen Lasten von einem Teil auf das andere gleichmäßiger und über eine größere Fläche übertragen können als mechanische, sind sie konventionellen Verbindungen oft ebenbürtig oder überlegen. Kosten und Gewicht sind dabei geringer. Für eine erfolgreiche Klebung muss der Klebstoff die Substratoberflächen vollständig benetzen und eine starke Bindewirkung zwischen Substrat und Klebstoff herstellen können. Für nichtrostende Stähle eignen sich eine Reihe von unterschiedlichen Klebern, darunter solche auf Basis von Silikon, Epoxidharz, Acryl und Polyurethan. Welcher Kleber in Frage kommt, hängt von den Anforderungen an die Festigkeit und von den Einsatzbedingungen ab. Vorteile und Grenzen

des Klebens sind in **Tabelle 26** zusammengefasst.

Die Ausgestaltung der Naht ist beim Kleben von großer Bedeutung. Sie sollte eine möglichst große Klebefläche ergeben und Spannungskonzentrationen durch Momente und Kanteneffekte vermeiden (zu empfohlenen Nahtformen siehe Quelle 29). Die Substratoberflächen müssen so vorbehandelt werden, dass sie sauber sind und die Bindungsstärke maximiert wird. Dazu eignen sich mechanische, chemische oder physikalische Methoden, mit denen adsorbierte Oberflächenschichten entfernt und das Substrat aktiviert werden. Einige der marktüblichen Klebesysteme umfassen auch besondere Oberflächenbehandlungen mit Primern und anderen Haftmittlern. Für deren Anwendung sollten die Empfehlungen des Klebstoffherstellers beachtet werden.

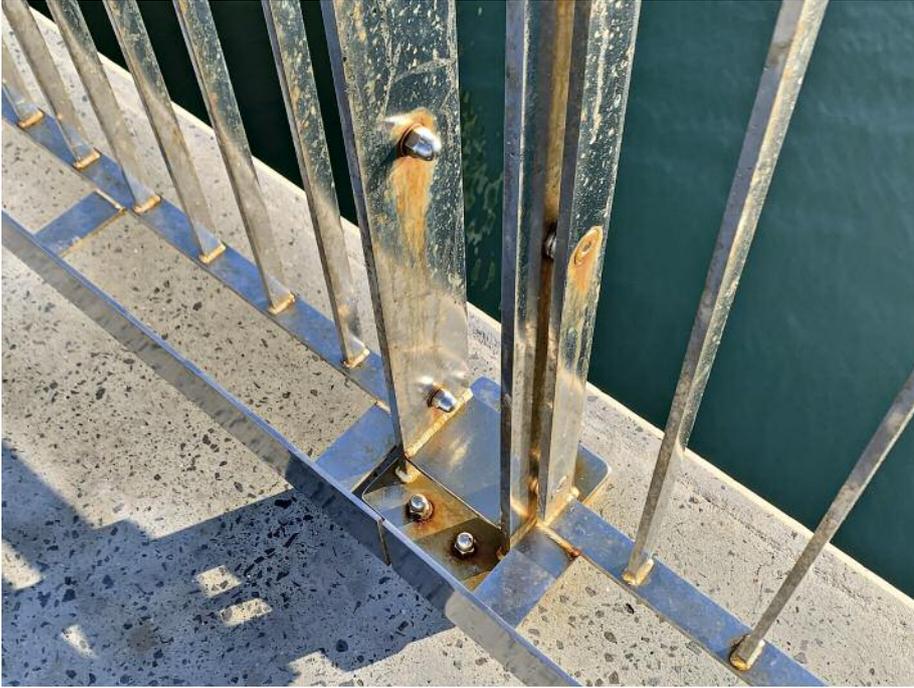
## 13.2 Korrosionsaspekte mechanischer Verbindungen

### 13.2.1 Spaltkorrosion

Die natürlichen Spalte in einer Falznaht, unter Dichtungen oder bei Schraubverbindungen sind anfällig für Spaltkorrosion (siehe Abschnitt 6.2.1). In feuchter Umgebung dringt Flüssigkeit selbst in die dichteste Naht ein und macht die meisten mechanischen Verbindungen anfällig für Spaltkorrosion. Deren Auftretswahrscheinlichkeit steigt mit der Enge des Spalts, bei bestimmten Dichtungsmaterialien und mit der Korrosivität des Mediums. Unter normalen atmosphärischen Bedingungen besteht i. d. R. für Schraubverbindungen beim Werkstoff AISI 304 (EN 1.4301) keine Gefahr. Dagegen kann die Schraubverbindung eines austenitischen nichtrostenden Hochleistungsstahls in

Tabelle 26: Vorteile und Grenzen geklebter Verbindungen

Vorteile	Grenzen
Nähte sind nahezu unsichtbar, gute Optik	Keine visuelle Beurteilung möglich
Gleichmäßige Verteilung von Lasten über eine größere Fläche	Oft langsame Aushärtung, besonders bei niedrigeren Temperaturen
Erlaubt die Verbindung von Werkstoffen unterschiedlicher Dicken und beliebiger Formen	Erfordert sorgfältige Vorbehandlung der zu verklebenden Flächen, häufig mit korrosiven Chemikalien
Geeignet für artgleiche und artverschiedene Werkstoffe	Erfordert u. U. verfahrensspezifische Haltevorrichtungen, Pressen, Öfen und Autoklave
Minimiert oder verhindert galvanische Korrosion bei metallischen Mischverbindungen	Nähte sollten nicht Temperaturen über ca. 180 °C/350 °F ausgesetzt werden
Gut beständig gegen Ermüdung und zyklische Belastungen	Erfordert strenge Prozesskontrolle; zumeist hohe Reinheitsanforderungen
Ergibt Nähte mit fließenden Übergängen	Lebensdauer abhängig von den Einsatzbedingungen
Schutz der Nahtstelle vor verschiedensten äußeren Einwirkungen	Erfordert relativ hohe Passgenauigkeit
Elektrische und thermische Isolation	Eigenschaften können sich mit der Zeit verändern
Kein Wärmeverzug	Mögliche schädliche Einwirkung von Chemikalien
Dämpft Stöße und Vibrationen	Klebstoff kann chemische Substanzen abgeben
Günstige spezifische Festigkeit	
Häufig schneller und kostengünstiger als mechanische Verbindungen	



Spaltkorrosion bei den Schraubverbindungen einer Geländerkonstruktion, die in der Spritzwasserzone von Meerwasser liegt. © Graham Sussex

- das Flächenverhältnis der verschiedenen Metalle so gestalten, dass das korrosionsempfindlichste (aktive) Metall eine viel größere Oberfläche aufweist.

Austenitische nichtrostende Hochleistungsstähle sind vergleichsweise edel (korrosionsbeständig). Daher können sie aktivere metallene Werkstoffe bei unsachgemäßer Verwendung korrodieren lassen: unlegierten Stahl, Aluminium, viele Kupferwerkstoffe und – je nach Medium – auch weniger beständige nichtrostende Stähle. Dagegen sind sie als Befestigungsmittel zur Verbindung weniger edler Werkstoffe sehr gut geeignet, z. B. bei Schrauben aus hochlegiertem nichtrostendem Stahl in Blech aus dem Werkstoff AISI 316 (EN 1.4401), weil in diesem Fall der weniger edle Werkstoffpartner eine wesentlich größere Oberfläche hat als das Befestigungsmittel. Die Planungsempfehlungen auf der Leseliste im Anhang geben Hinweise, wie sich durch optimale konstruktive Auslegung der Verbindung galvanische Korrosion vermeiden lässt.

warmem Meerwasser problematisch sein. Liegt die Korrosivität des Mediums im Grenzbereich der Korrosionsbeständigkeit des zu verbindenden Werkstoffs, ist Spaltkorrosion konstruktiv nur schwer zu vermeiden. In diesem Fall ist entweder auf mechanische Verbindungen ganz zu verzichten oder es müssen Werkstoffe eingesetzt werden, die in dem jeweiligen Medium ausreichend spaltkorrosionsbeständig sind.

- Isolierungen verwenden, um die verschiedenen Metalle voneinander zu trennen (**Abbildung 32**),
- bei unvermeidlichen Mischverbindungen solche Metalle verwenden, die in der galvanischen Reihe nahe beieinander liegen (siehe Abbildung 21 in Kapitel 6.4),

### 13.3.2 Galvanische Korrosion

Galvanische Korrosion kann immer dann auftreten, wenn zwei unterschiedliche metallene Werkstoffe in korrosiver Umgebung miteinander in elektrisch leitendem Kontakt stehen. In diesem Fall korrodiert die aktivere oder weniger beständige Legierung beschleunigt, während die edlere und korrosionsbeständigere geschützt wird (siehe Abschnitt 6.4). Galvanische Korrosion lässt sich bei mechanischen Verbindungen auf mehrerlei Weise verhindern:

- mechanische Verbindungen unterschiedlicher Metalle vermeiden, z. B. Befestigungsmittel aus Aluminium für nichtrostende Stahlbleche,

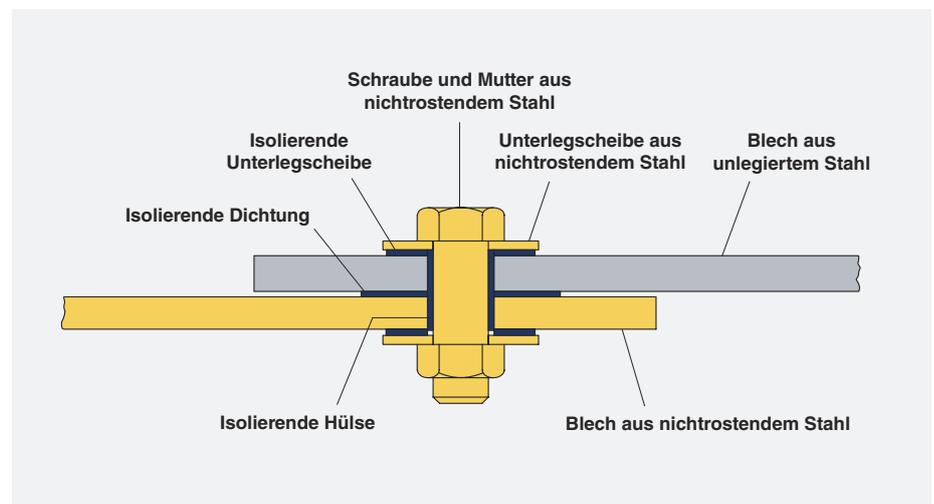


Abbildung 32: Isolierende Unterlegscheiben zur Verhinderung von galvanischer- und Spaltkorrosion bei einer Schraubverbindung in Wasser (basierend auf (27))

# 14 Oberflächenausführungen

Die breiteste Auswahl von Oberflächenausführungen gibt es bei den austenitischen Standardsorten AISI 304 und 316 (EN 1.4301 und 1.4401). Auf nicht-rostenden Stählen der austenitischen Familie lassen sich hochwertige Oberflächen leichter realisieren als bei anderen. Bei höher legierten Sorten ist die Oberflächenbearbeitung etwas kostenaufwändiger, denn sie setzen dem Beizen, Schleifen und Polieren mehr Widerstand entgegen. Allerdings ist sie leichter als bei ferritischen und Duplex-Sorten mit vergleichbarer Korrosionsbeständigkeit.

Die genaue Festlegung der Oberflächenausführungen ist ein wesentlicher Bestandteil der Planung, weil sie die Korrosionsbeständigkeit, die Verschmutzungsanfälligkeit, bei Außenanwendungen das Reflexionsvermögen bzw. die Aufheizung, die Reinigungsfreundlichkeit und das Aussehen beeinflusst. Es gibt eine Vielzahl von industriell hergestellten und speziellen dekorativen Oberflächen. Lieferform und Abmessungen entscheiden darüber, welche Oberflächenausführungen erzielbar und allgemein verfügbar sind. Stahlbauprofile wie T- und I-Träger werden beispielsweise mit Walzoberfläche oder gestrahlt angeboten. Hohlprofile sind dagegen mit geradlinigen Schlifflinien verfügbar. Wird bei dünnem Blech eine glatte Oberfläche gewünscht, stellen die werksseitigen Oberflächen blankgeglüht (BA oder 2R), 2B und 2D wirtschaftliche Optionen dar. Allerdings erfüllen sie die optischen Anforderungen nicht immer ohne weitere Bearbeitung. Einige spezielle Ausführungen, etwa gefärbte, spiegelpolierte, geprägte, mustergewalzte oder Sonderoberflächen, sind meist nur für dünne Bleche verfügbar. Auch auf Grobblech lässt sich eine fein geschliffene oder spiegelglänzende Oberfläche erzielen, sie ist aber normalerweise deutlich teurer, weil die Ausgangsoberfläche rauer ist. Jedes Blech muss einzeln geschliffen werden, während Bandstahl kontinuierlich geschliffen wird.

Für werksseitig geschliffene und strukturierte (geprägte, mustergewalzte) Oberflächen bestehen internationale

Normen. Werden solche Oberflächen bestellt, ist es wichtig, sich auf eine solche Norm zu beziehen. Allerdings sind die in internationalen Normen formulierten Anforderungen häufig weit gefasst und können unterschiedlich interpretiert werden. Wenn ein Projekt einen genauen Abgleich der Oberflächen erfordert, etwa besonders matt oder glänzend sein, einen bestimmten Rauheitswert haben oder andere messbare Eigenschaften aufweisen soll, sollten die Anforderungen der Norm im Auftrag weiter präzisiert werden. Es ist zu berücksichtigen, dass Ausgangsoberflächen, Verarbeitungsschritte sowie die Rauheit von gewalzten und geradlinig geschliffenen Oberflächen rund um den Globus unterschiedlich sein können. Ausführungsmuster und die Quantifizierung von Oberflächeneigenschaften helfen, Missverständnisse zu vermeiden. Bei einigen Sonderoberflächen für dekorative Anwendungen gibt es keine international anerkannten Normen; ihre Eigenschaften sollten nach Aussehen und messbaren Eigenschaften festgelegt werden, z. B. Obergrenze der Rauheit, Glanzgrad und Farbton.

Die Oberfläche eines Fertigprodukts widerspiegelt die gesamte Entstehungs-

geschichte vom Werk bis in den verarbeitenden Betrieb. Endverbraucher bestimmen die Oberfläche oft nach ihren Gestaltungskriterien, was eventuell bestimmte Oberflächenbearbeitungsprozesse unumgänglich machen kann.

## 14.1 Oberflächen und technische Leistungsmerkmale

Die mikroskopische Oberflächenmorphologie oder Struktur einer Ausführung kann starken Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit ausüben, insbesondere bei Oberflächen, die atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt sind. Die Struktur einer mechanisch geschliffenen Oberfläche wird durch die Art des Schleifmittels und die Schleiftechnik bestimmt. Um die bestmögliche Korrosionsbeständigkeit zu erreichen, müssen bei geschliffenen Oberflächen mikroskopische Metallüberlagerungen vermieden werden, die zu Ausgangspunkten für Spaltkorrosion werden können. Ein neues Schleifband bringt in die Oberfläche saubere, gleichmäßige Vertiefungen ein, so dass sie in der Vergrößerung einem frisch gepflügten Feld ähnelt. Ein stark abgenutztes Schleifband kann dagegen die Oberfläche aufreißen, mikroskopische Grate bilden und sie umlegen, so dass



Weintanks werden häufig mit einem „Pfauenauge-Schliff“ versehen. Er ist hygienisch, leicht zu reinigen, optisch ansprechend und lässt Beulen und Kratzer optisch zurücktreten. Die Oberflächenausführung ist ein wichtiger Aspekt des Planungsprozesses. © iStock.com/Josef Mohyla



Dieser Poller aus nichtrostendem Stahl AISI 316 (EN 1.4401) ist streusalzhaltigem Spritzwasser von vorbeifahrenden Autos ausgesetzt. Der untere Teil ist grob, der obere fein geschliffen, was den Unterschied in der Korrosionsbeständigkeit erklärt. © IMO A

Überlappungen, d. h. Spalte, entstehen. Auch einige Arten des Strahlens, z. B. mit Sand oder Siliciumcarbid (Karbörund), führen zu starken, engen, mit Ausstülpungen durchsetzten Vertiefungen. Aufgewalzte oder geprägte Muster werden dagegen zumeist auf besonders glatte Oberflächen aufgebracht, wobei einige bereits durch Regen oder Abwischen wirksam gereinigt werden, während sich auf anderen Schmutz ansammeln kann.

Auf raueren Oberflächen haften Schmutz und korrosive Substanzen stärker an und bleiben mit höherer Oberflächenspannung länger feucht. Damit Korrosion stattfinden kann, müssen Feuchtigkeit und korrosive Bestandteile vorliegen. Auf Oberflächen mit mikroskopischen Spalten kann Korrosion bei niedrigeren Temperaturen und niedrigerer Chloridexposition auftreten als auf glatten Oberflächen ohne solche Spalten. Benachbarte Bauteile aus demselben nichtrostenden Stahl, aber mit verschiedenen Oberflächen Ausführungen können sich allein aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit ganz unterschiedlich verhalten.

Nichtrostender Stahl wird mit steigendem Legierungsmittelgehalt korrosionsbeständiger. Bei korrosiverer Umgebung oder rauerer Oberfläche sollte eine korrosionsbeständigere Sorte ausgewählt werden. Viele Anwendungen in Architektur, Lebensmittelverarbeitung, Arzneimittelherstellung, Medizin, Gasspeicherung und -transport usw. erfordern leicht zu reinigende Oberflächen, die keine Fremdstoffe anziehen oder zurückhalten. Unzureichende Oberflächensauberkeit kann zu Produktverunreinigung führen und ein Gesundheits- oder Sicherheitsrisiko darstellen. Ebenso können schwerer zu reinigende

Oberflächen aggressivere Reinigungsmethoden erfordern und die Wartungskosten erhöhen. Für hygienekritische Anwendungen werden häufig spezielle Oberflächen gefordert. Auf austenitischen nichtrostenden Stählen sind sie leicht zu erzielen, weswegen sie ideale Konstruktionswerkstoffe für besonders anspruchsvolle Anwendungen sind.

## 14.2 Werksseitige Oberflächen

### 14.2.1 Grobblech

Grobblech ist ein gewalztes oder geschmiedetes Erzeugnis, das nach ASTM A480M eine Mindestdicke von 4,76 mm (3/16 Zoll) und eine Mindestbreite von 254 mm (10 Zoll) haben muss. Hergestellt wird es aus (gewalzten oder geschmiedeten) Rohblöcken oder -brammen, die gegläht und entzundert werden. Ihre Standardoberflächen sind in **Tabelle 27** beschrieben.

### 14.2.2 Bleche und Bänder

Feinbleche und Bänder sind dünner als Grobbleche. Sie durchlaufen verschiedene Verfahren: Warmwalzen mit oder ohne nachfolgendem Kaltwalzen, Glühen oder anderer Wärmebehandlung, Adjustage und Reinigung. Sie können in Coils oder als abgelängte Bleche geliefert werden.

Tabelle 27: Oberflächen nichtrostenden Grobblechs gemäß ASTM A480/A480M und EN 10088

ASTM-Ausführung und Oberfläche	Entsprechende Ausführung nach EN 10088 *	Beschreibung und Anmerkungen
Warm- oder kaltgewalzt und gegläht oder wärmebehandelt, nicht entzundert	1C/2C	Vorgesehen für Hochtemperaturanwendungen oder als Zwischenprodukt. Aufgrund des Zunders sind die Oberfläche rau, dunkel und ungleichmäßig und die Korrosionsbeständigkeit vermindert.
Warm- oder kaltgewalzt, gegläht oder wärmebehandelt, gestrahlt oder gebeizt	1D/2D (gebeizt) oder 1E/2E (gestrahlt)	Überwiegend für Anwendung mit starker Korrosions- und Hochtemperaturbeanspruchung, ähnlich der Blechoberfläche 1
Warm- oder kaltgewalzt, gegläht oder wärmebehandelt, Oberfläche gereinigt und geschliffen	1G/2G (geschliffen), 1J/2J (gebürstet oder mattpoliert) und 1K/2K (seidenmattpoliert)	Geschliffene Ausführung meist als Ausführung 4 (ASTM) bzw. 2K (EN)
Warm- oder kaltgewalzt, gegläht oder wärmebehandelt, entzundert und leicht nachgewalzt	2B (gebeizt)	Glattere Oberflächen ausführung für besondere Anwendungen
Warm- oder kaltgewalzt, gegläht oder wärmebehandelt, entzundert, kaltgewalzt, gegläht oder wärmebehandelt, entzundert und optional leicht nachgewalzt	–	Glatte Oberflächen ausführung mit weniger Oberflächenfehlern als bei der vorgenannten Ausführung

\* In EN 10088 steht 1 für warmgewalzte und 2 für kaltgewalzte Ausführungen

Tabelle 28: Klassifizierung der Standardoberflächen von Blechen und Bändern gemäß ASTM A480/A480M und EN 10088

ASTM-Ausführung Nr.	Entsprechende Ausführung gemäß EN 10088 <sup>1</sup>	Beschreibung	Entsprechende Verarbeitungsschritte
<b>Bleche (in Coilform oder abgelängt) in Dicken unter 4,75 mm (3/16 Zoll) und Breiten über 610 mm (24 Zoll)</b>			
1	1D/1E	Rau, stumpf, nicht spiegelnd, warmgewalzte Ausführung	Warmgeformt, wärmebehandelt und gebeizt (1D) oder mechanisch entzündert (1E)
2D	2D/2E	Glatt, matt, nicht spiegelnd, kaltgewalzte Ausführung	Kaltgewalzt, wärmebehandelt und gebeizt (2D) oder mechanisch entzündert (2E), kann zusätzlich mit nichtpolierten Walzen leicht nachgewalzt sein
2B	2B	Glänzende kaltgewalzte Ausführung	Wie 2D, jedoch zusätzlich mit polierten Walzen leicht nachgewalzt
BA	2R	Blankgeglühte Ausführung	Kaltgewalzt, anschließend unter Schutzgas gegläht, dann mit hochglanzpolierten Walzen nachgewalzt, so dass eine noch stärkere Glanzwirkung entsteht als bei 2B. Zur Erzielung von echtem Spiegelglanz ist eine mechanische Hochglanzpolitur (z. B. ausgehend von 2B) vorzusehen.
TR	2H	Zur Erzielung spezieller Eigenschaften kaltverfestigt	Zusätzlich kaltgewalztes geglähtes, entzündertes oder blankgeglühtes Erzeugnis, bei dem gegenüber dem geglähten Ausgangszustand eine höhere Festigkeit erzielt wird. Das Aussehen variiert je nach Ausgangsoberfläche, Grad der Kaltverfestigung und Legierungszusammensetzung.
<b>Schmalband<sup>2</sup>: kaltgewalzte Coils und Festlängen in Dicken zwischen 0,127 und 4,76 mm (0,005 und 3/16 Zoll) und Breiten unter 610 mm (24 Zoll)</b>			
1	2D/2E	Stumpf, grau, matte bis spiegelnde Oberfläche	Auf Endabmessungen kaltgewalzt, wärmebehandelt und gebeizt (2D) oder mechanisch entzündert (2E)
2	2B	Glatter und spiegelnder als 2D/2E	Wie 2D, jedoch anschließend leicht nachgewalzt (meist mit glatt polierten Walzen)
BA	2R	Blankgeglüht	Glänzende kaltgewalzte Ausführung, erzielt durch Glühen in einer kontrollierten Schutzgasatmosphäre
TR	2H	Zur Erzielung spezieller Eigenschaften kaltverfestigt	Zusätzlich kaltgewalztes geglähtes, entzündertes oder blankgeglühtes Erzeugnis, bei dem gegenüber dem geglähten Ausgangszustand eine höhere Festigkeit erzielt wird. Das Aussehen variiert je nach Ausgangsoberfläche, Grad der Kaltverfestigung und Legierungszusammensetzung.

1 In EN 10088 steht 1 für warmgewalzte und 2 für kaltgewalzte Ausführungen

2 EN 10088 unterscheidet für die Bezeichnungen nicht zwischen Blech und Band wie ASTM A480/A480M

Sowohl für Standard- als auch für Sonderoberflächen bestehen bestimmte Verfahrensabläufe. **Tabelle 28** beschreibt die werksseitigen Oberflächen gemäß ASTM mit Querverweisen zu den entsprechenden EN-Ausführungen. Die am weitesten verbreitete Oberfläche bei Blechen und Bändern ist 2B.

### 14.3 Mechanische Oberflächenbearbeitung

Geradlinige Schriffe oder Polituren

werden in der Regel mit Schleifmitteln sowie ggfs. durch Schwabbeln ausgeführt. Zudem gibt es aufgewalzte Muster, die Schriffe nachbilden und in einigen Normen als Ersatz für letztere akzeptiert werden. In einigen Teilen der Welt hat sich das Kunstwort „linished“ im Sinne von „geradlinig geschliffen“ eingebürgert. Die erzielte Oberflächenwirkung hängt von vielen Faktoren ab: zuletzt verwendete Körnung, Austauschhaftigkeit des Schleifbands, Art des Schleifmittels, Einsatz von Schmiermitteln (d. h. Trocken-

oder Nassschliff) sowie weitere Verfahrensvariablen. Unter den geschliffenen Ausführungen sind 2J und 2K (Nr. 3 und Nr. 4 nach ASTM) am weitesten verbreitet. Die Korrosionsbeständigkeit geschliffener Oberflächen kann stark variieren. Auch innerhalb derselben Bezeichnung (z. B. 2K bzw. Nr. 4) können Aussehen und Beständigkeit gegen einsetzende Lokalkorrosion je nach Lieferant deutlich voneinander abweichen. Die Unterschiede erklären sich durch die jeweiligen Schleifverfahren und die

dabei verwendeten Schleifmittel. Wenn das Korrosionsverhalten von Bedeutung ist, sollte beim Auswahlverfahren die Beständigkeit geschliffener Proben bewertet werden.

Der übliche Weg, Anforderungen an die Oberflächenausführung in Lastenheften zu quantifizieren, liegt in Oberflächenmustern und einem festgelegten Rauheitswert (z. B.  $R_a$ ) sowie Angaben zum Glanzgrad (z. B. Reflexionswerte). Wenn allerdings Lieferungen von verschiedenen Anbietern übereinstimmen müssen,

etwa in der Hausgeräteindustrie, oder wenn strenge Anforderungen an das Reflexionsvermögen gestellt werden, müssen ggfs. zusätzliche Eigenschaften wie  $R_z$ ,  $R_y$  oder eine Charakterisierung der 3D-Oberflächentopographie vorgegeben werden. Bei manchen Anwendungen sind die Reflexionseigenschaften wichtig. So sind z. B. in baulichen Außenanwendungen hochglänzende Oberflächen wegen der Blendungsgefahr zu vermeiden. Das Reflexionsvermögen wird durch Struktur und Richtung der Oberflächenbehandlung bestimmt.

Dabei sind glattere Oberflächen nicht automatisch auch spiegelnder.

Oberflächenveredler sind häufig bestrebt, das Aussehen ihrer Produkte von dem der Wettbewerber zu unterscheiden. Es kann also nicht davon ausgegangen werden, dass ein Produkt mit gleicher Bezeichnung bei einem anderen Anbieter auch ein genau gleiches Aussehen haben wird. **Tabelle 29** fasst die gebräuchlichen in ASTM- und EN-Normen aufgeführten geschliffenen und polierten Oberflächen zusammen.

Tabelle 29: Vergleich geschliffener Blechoberflächen gemäß ASTM A480 und EN 10088<sup>1</sup>

ASTM-Ausführung	Ausführung gem. EN 10088	Beschreibung in ASTM	Beschreibung in EN 10088	Erläuterung in ASTM <sup>2</sup>	Erläuterungen in EN 10088 <sup>2</sup>
	2G		Geschliffen	Keine ASTM-Entsprechung	Schleifpulver oder Oberflächenrauheit kann festgelegt werden. Gleichgerichtete Textur, nicht sehr reflektierend.
Nr. 3	2J	Mittlerer Glanzgrad, einseitig oder beidseitig	Gebürstet oder mattpoliert	Gleichgerichtete Textur, die entweder durch Schleifen oder Kaltwalzen aufgebracht wird. Die durchschnittliche Oberflächenrauheit kann bis zu 1,0 µm (40 Mikrozoll) betragen, allerdings ist dieser Wert nicht verbindlich. Die ASTM-Oberflächen 3 und 4 sind häufig doppelt zertifiziert.	Glatter als 2G. Bürstenart oder Polierband oder Oberflächenrauheit kann festgelegt werden. Gleichgerichtete Textur, nicht sehr reflektierend. Typischer $R_a$ -Wert 0,2–1,0 µm (8–40 Mikrozoll)
Nr. 4	2K	Geschliffene Oberfläche für allgemeine Anwendungen, einseitig oder beidseitig	Seidenmattpoliert	Gleichgerichtete Textur, die entweder durch Schleifen oder Kaltwalzen aufgebracht wird. Die durchschnittliche Oberflächenrauheit kann bis zu 0,64 µm (25 Mikrozoll) betragen, allerdings ist dieser Wert nicht verbindlich. Die ASTM-Oberflächen 3 und 4 sind häufig doppelt zertifiziert	Glatteste unter den nichtspiegelnden Oberflächen um angemessene Korrosionsbeständigkeit für See und architektonische Aussenanwendungen zu erzielen. Der $R_a$ -Wert quer zur Walzrichtung liegt unter 0,5 µm (20 Mikrozoll)
Nr. 6		Stumpf-seidenmatte Ausführung, ein- oder beidseitig mit Tampico-Fibre gebürstet		Wird normalerweise auf einer Ausgangsoberfläche Nr. 4 vorgenommen und ergibt einen weichen Seidenglanz. Dabei werden die als „Tampico-Fibre“ bezeichnete Naturfaser, Öl und Schleifmittel verwendet.	Keine Entsprechung in EN 10088
Nr. 7	2P	Hochglänzende Ausführung	Blankpoliert	Hohe Glanzwirkung durch Feinpolitur einer fein geschliffenen Ausgangsoberfläche. Schliifspuren sind noch sichtbar.	Mechanisches Polieren. Verfahren oder Oberflächenrauheit kann festgelegt werden. Ungerichtete Ausführung, reflektierend mit hohem Grad von Bildklarheit.
Nr. 8	2P	Spiegelglanz	Blankpoliert	Hochglänzend spiegelnde, glatte Oberfläche, üblicherweise durch Politur mit zunehmend feineren Schleifmitteln, dann Schwabbeln. Sehr geringe Schliifspuren können auf dem fertigen Erzeugnis noch sichtbar sein.	Mechanisches Polieren. Verfahren oder Oberflächenrauheit kann festgelegt werden. Ungerichtete Ausführung, reflektierend mit hohem Grad von Bildklarheit.

<sup>1</sup> Die Oberflächenausführungen ähneln sich in den Anforderungen, sind aber nicht identisch.

<sup>2</sup> Die Erläuterungen dienen der Erläuterung der speziellen Produkteigenschaften, stellen jedoch keine formalen Anforderungen dar.

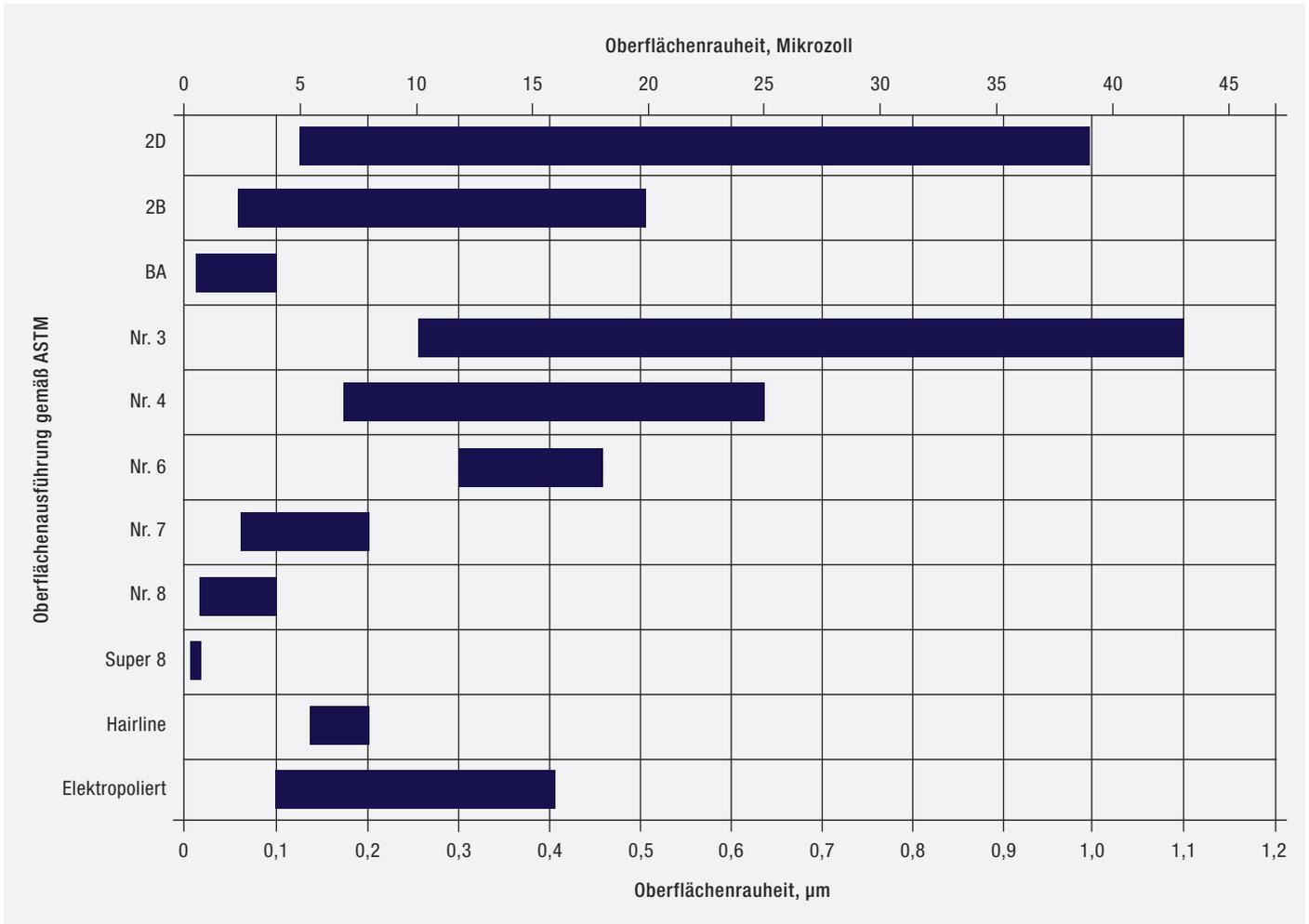


Abbildung 33: Typische Bereiche der durchschnittlichen Oberflächenrauheit ( $R_a$ ) bei nichtrostendem Stahlblech nordamerikanischer und europäischer Lieferanten (30)

Anm.: Die höchsten und niedrigsten in der Untersuchung festgestellten Werte wurden als Bereichsgrenzen angesetzt. Berücksichtigt wurden sowohl geringe als auch große Dicken. Dünnere Bleche weisen zumeist glattere Oberflächen auf als dickere und liegen daher am unteren Ende des Bereichs. Die Oberflächenrauheit variierte über die Länge und Breite.

Sofern die Oberflächenrauheit für die Produkteignung bedeutsam ist, z. B. unter korrosiven Bedingungen, sollten ein Maximalwert angegeben und Parameter wie Trocken-/Nassschliff oder die Häufigkeit des Austauschs des Schleifbandes mit dem Lieferanten vereinbart werden. **Abbildung 33** und Tabelle 29 fassen die typischen Rauheitswerte ( $R_a$ ) für werksseitige und geschliffene Oberflächen zusammen.

Wenn eine gleichförmige Oberfläche gewünscht wird, diese aber bei der Verarbeitung durch Schritte wie Schweißen oder Biegen beeinträchtigt wird, sollte am besten eine geschliffene oder polierte

Ausgangsoberfläche festgeschrieben werden. Bei der Fertigung kann die Oberfläche größtenteils mit Klebefolie geschützt werden. Die betroffenen Teile lassen sich anschließend lokal durch Schleifen und Polieren wieder angleichen.

#### 14.3.1 Sonderoberflächen

Spezielle Oberflächen werden von feinen, glatten und richtungslosen Schwinggeschliffen bis hin zu rauen, grob geschliffenen Ausführungen in großer Vielfalt angeboten. Sie können bei kleineren Projekten handgefertigt werden; das gleichmäßigste Resultat erzielen jedoch computergesteuerte maschinelle

Verfahren. Bei größeren Mustern sollte auch die Rückseite geschliffen werden, damit sich das Blech nicht durch ungleichmäßige Spannungen verzieht.

Grobe Muster umfassen z. B. Kreise, richtungslose Schliffe zur Kaschierung von Vandalismusschäden oder speziell entworfene dekorative Designs. Rauere Schliffbilder halten auch mehr Schmutz und Ablagerungen zurück, was bei Planung und Sortenauswahl zu berücksichtigen ist. Sehr feine richtungslose Schliffe, etwa Schwinggeschliffe, können sich in korrosiveren Umgebungen ebenso günstig verhalten wie gerichtete Schliffe.



Das Schwabbeln macht Edelstahloberflächen noch glänzender © Magic Disc

### 14.3.2 Schwabbeln

Beim Schwabbeln sind zwei Varianten zu unterscheiden: Zum einen kann das Werkstück mit mittlerem bis hohem Druck entgegen der Drehrichtung der Schwabbelscheibe bewegt werden. Ein deutlich abrasiv wirkendes Schleifmittel trägt Metall von der Oberfläche ab und ergibt eine gleichmäßige, glatte und halbgänzende Oberfläche, wobei verbliebene Kratzer und andere Unvollkommenheiten entfernt werden. Zum anderen kann das Werkstück aber auch bei mittlerem bis leichterem Druck mit der Schleifrichtung bewegt werden. Das Schleifmittel ist in diesem Fall weniger aggressiv und erzeugt eine glänzende Oberfläche.

Die besten, spurfreien Oberflächen erbringen schwefelarme austenitische Sorten (mit S-Gehalten von 0,002 Masse-% und weniger). Anderenfalls kann die erzielte spiegelglänzende Oberfläche winzige Einkerbungen aufweisen – Stellen, an denen Sulfide aus der Oberfläche gerissen wurden.

Die hochwertigsten spiegelpolierten Oberflächen werden erzielt, wenn zunächst durch Schleifen Oberflächen-defekte entfernt werden und anschließend mit Schleifbändern von immer feiner werdender Körnung in Längsrichtung geschliffen wird. Der Nassschliff mit feinsten Körnung ist der letzte Schritt, bevor mit dem Schwabbeln begonnen wird. Gemäß ASTM A480 gibt es zwei geschwabbelte Oberflächenausführungen: Nr. 7 ist bereits stark geglättet, lässt aber noch geringe Schliifspuren

erkennen. Nr. 8 ist noch umfassender geschwabbeln. Hier lassen sich Schliifspuren allenfalls noch bei genauem Hinsehen feststellen.

Bei manchen Anwendungen wird eine spiegelglänzende Oberfläche kostengünstig dadurch erreicht, dass blankgeglühtes Blech – nach ASTM als BA (*bright annealed*) bezeichnet, nach EN als 2R – zusätzlich geschwabbeln wird. Das Schwabbeln einer werksseitigen Oberfläche kann aber nicht immer alle Oberflächendefekte vollständig beseitigen. Dieses Verfahren kommt daher in Anwendungen zum Einsatz, in denen keine extremen Hygieneanforderungen gestellt werden, ferner bei kleineren oder erhöht angebrachten dekorativen Oberflächen, bei denen kleine Defekte weniger auffällig sind.

### 14.3.3 Schleifmittel für das mechanische Polieren

Das Schleifen beginnt mit größeren Körnungen, die tiefere Kratzer und Unvollkommenheiten entfernen, und setzt sich mit zunehmend feineren Schleifmitteln fort, bis eine glatte Oberfläche erreicht ist. Die Art des verwendeten

Schleifmittels bestimmt Schleifwirkung und Kosten. Für jede Körnung und jede Art von Schleifmittel sind die jeweils angegebenen Geschwindigkeiten einzuhalten. Zu schnelles Schleifen kann einen Hitzestau verursachen, der zu Verzug und gelblicher Verfärbung durch Oxidation führt. Die Hersteller geben Hinweise zu den jeweils optimalen Kombinationen von Schleifmittel und -geschwindigkeit. Die nachstehenden Abschnitte vermitteln einen Überblick über die verfügbaren Arten von Schleifmitteln. Der Einsatz von Schmiermitteln beim Nassschleifen kann noch saubere Schliife bewirken.

#### 14.3.3.1 Schleifmittel auf Träger

Bei Schleifmitteln wie z. B. Sandpapier sind die Schleifpartikel in einen Träger aus Papier, Gewebe o. a. eingebettet. Als Schleifpartikel kommen überwiegend mineralische Substanzen zum Einsatz, darunter Zirkonkorund, Aluminiumkorund und Siliziumcarbid. Korund ist braun, Zirkonkorund blau oder grün.

Schleifmittel auf Trägern gibt es in unterschiedlichen Abmessungen, Formen und Körnungen. „Körnung“ bezeichnet die



Händisches Schleifen von nichtrostendem Stahlrohr zur Angleichung der Schweißnaht an die herstellereitige Oberfläche © Olya Humeniuk/Shutterstock.com

Rauheit des Schleifmittels und bezieht sich auf die Größe der eingebetteten Partikel. Größere Schleifkörper tragen mehr Material ab als kleinere. Die Korngrößen reichen von 36 bis 600. Je größer die Zahl, desto feiner die Körnung. Beim schrittweisen Polieren mit immer feineren Körnungen brauchen nicht alle Stufen durchlaufen zu werden. Eine Faustregel besagt, dass sich die Korngrößen-Zahl von einem Schritt zum nächsten höchstens verdoppeln sollte, z. B. von 40 auf 80.

Wenn praktisch möglich, sollte bei jedem Sprung auch die Schleifrichtung um 90° gedreht werden. Hierdurch wird verhindert, dass bestehende Schleifriefen sich weiter vertiefen. Vielmehr wird der Unterschied zwischen Erhebungen und Vertiefungen nivelliert. Außerdem wird so sichtbar, wann alle Spuren des vorhergehenden Durchgangs entfernt sind. Ist das nicht der Fall, können Schliffspuren zurückbleiben und kann es zu Ungleichmäßigkeiten kommen.

#### 14.3.3.2 Vliesförmige Produkte

Vliesförmige Produkte bestehen aus Nylonfasern, die mit einem Schleifmittel durchtränkt sind, dessen Korngröße die „Rauheit“ des Produkts bestimmt. Anders als beschichtete Schleifbänder tragen vliesförmige Produkte kaum Material von der Oberfläche ab, sondern vergleichmäßigen lediglich erhöhte und vertiefte Bereiche. Folglich ist auch die Nomenklatur eine andere. Anstelle von Körnungen werden die Bezeichnungen „grob“, „mittel“, „fein“ und „sehr fein“ angegeben.

#### 14.3.3.3 Polierpasten

Poliermittel können flüssig oder fest sein. Festigkeit und Härte des zu polierenden Werkstoffs entscheiden über deren Art. Herstellerspezifische Ergebnisse unterscheiden sich auch hinsichtlich ihrer Lagerfähigkeit, die durch das Bindemittel bestimmt wird. Sog. „Schwabbeln“ werden aus Baumwoll- oder Wollstoff in vielfältigen Variationen hergestellt. Die optimale Kombination von Polierscheiben und -mitteln hängt davon ab, um welchen Feinheitsgrad des Polierens es sich handelt. Hierzu gelten die Herstellerempfehlungen. Für die großflächige Feinpolitur in industriellem Maßstab kommt für den größeren Schliff, bei dem mehr Material

abgetragen werden soll, ein schwarzes Schleifmittel (Schmirgel) zur Anwendung. Grüne Schleifmittel (Chrom- oder Aluminiumoxid) dienen der abschließenden Feinpolitur. Auch andere Mineralien werden zuweilen zum Polieren von nichtrostendem Stahl eingesetzt, rote (Eisenoxid) dürfen aber auf keinen Fall verwendet werden.

## 14.4 Mustergewalzte und geprägte Oberflächen

Bei mustergewalzten und geprägten Oberflächen wird die Struktur walztechnisch in die Oberfläche eingebracht. Bei einseitigen Mustern, die mit einer strukturierten und einer glatten Walze hergestellt werden, spricht man von musterwalzen. Die mustergewalzten Ausführungen schließen auch matte Bedachungsbleche ein, Nachbildungen von Schliffmustern (vor allem für Elektro-Haushaltsgeräte) oder beliebige Fassadenbleche, z. B. mit Leinenstruktur. Diese nur mäßig erhabenen Muster streuen wirksam das Licht. Hierdurch wird die Blendwirkung abgemildert und Paneele, etwa für bauliche Anwendungen, wirken optisch planer. Sind beide Walzen strukturiert und ist das Muster dementsprechend beidseitig, spricht man von geprägten Blechen. Die Muster umfassen Wellen-, Nuten-, Schachbrett- oder Rautenmuster oder feine, gleichmäßige Muster wie Punkte und Tränen. Sie finden Anwendung bei Transportbändern, rutschfesten und hoch beanspruchbaren Böden und Treppen, beschadigungsresistenten Wandbekleidungen im öffentlichen Raum sowie Trennwänden im Sanitärbereich. Das Einbringen des Musters führt bei austenitischen nichtrostenden Stählen zu Kaltverfestigung, wodurch das Blech steifer sowie kratz- und stoßfester wird.

Bei der Bestellung solcher Oberflächen sind die internationalen Normen zu beachten. ASTM A947M beschreibt gemusterte Bleche aus nichtrostendem Stahl. Die europäische Norm EN 10088 schließt auch gewellte (2W) oder mustergewalzte Oberflächenausführungen (1M bei warm- und 2M bei kaltgewalztem Blech) ein.

Zu Rohren umgeformt und geschweißt, sind diese Ausführungen in rutschhemmenden Geländern, Haltestangen



Geprägte Fassadenpaneele aus nichtrostendem Stahl © Martina Helzel

im öffentlichen Nahverkehr, Pflegeeinrichtungen und Parks weit verbreitet. Die Schweißnaht bleibt auf einer Rohrseite erkennbar.

## 14.5 Gefärbter nichtrostender Stahl

Im Wesentlichen gibt es drei Wege, nichtrostenden Stahl zu färben. Er lässt sich mit handelsüblichen Lacken für Metall beschichten oder emaillieren. Damit der Lack haftet, muss der nichtrostende Stahl längstens einige Stunden vor der Aufbringung des Erstanstrichs depassiviert werden. Die Passivschicht wird chemisch, d. h. mit einer aktivierenden Lösung, entfernt. Alternativ kann auch ein ätzend wirkender Haftvermittler benutzt werden. Wie alle Beschichtungen altert Lack im Laufe der Zeit. Die Korrosionsbeständigkeit des nichtrostenden Grundwerkstoffs verlängert in diesem Fall jedoch die Lebensdauer gegenüber weniger korrosionsbeständigen Materialien.

Das elektrochemische Färben von nichtrostendem Stahl wirkt ähnlich wie bei Aluminium oder Titan. Allen diesen Techniken ist gemeinsam, dass sie die jeweilige Passivschicht zu größerer Dicke aufwachsen lassen, wodurch sie farbig erscheint. Die Beständigkeit entspricht der einer vollständig passivierten Oberfläche. Korrosionserscheinungen führen allerdings immer auch zu Farbveränderungen. Deshalb sollte die Werkstoffauswahl auf der sicheren



Die Finnen am Doppler Building in Seattle sind (mit Ausnahme der orangen) elektrochemisch gefärbt. © IMO A

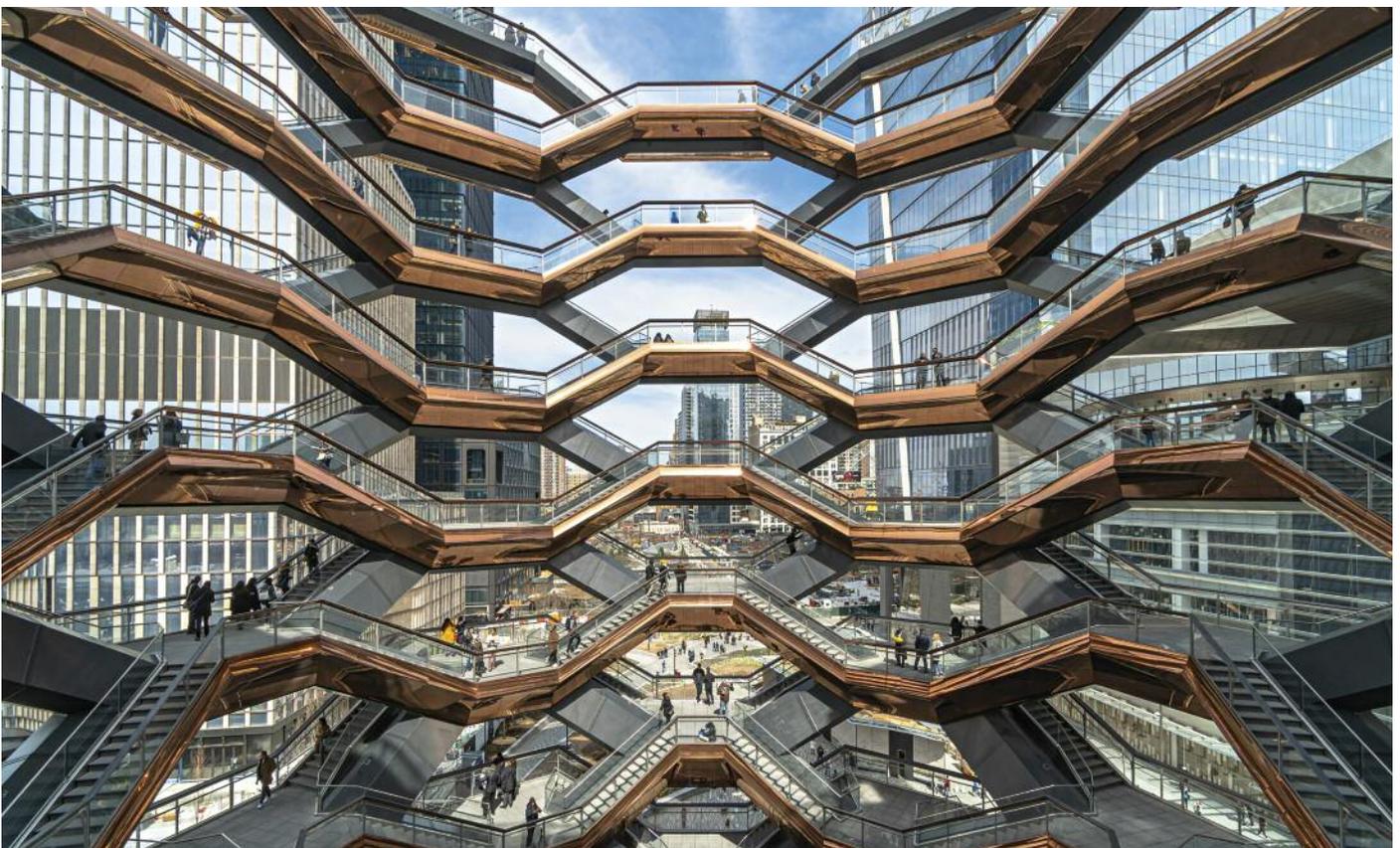
Seite liegen. In Bereichen mit Salz- und Schmutzbeaufschlagung sollte eine regelmäßige Reinigung vorgesehen werden. Die Oberfläche ist kratz- und beschädigungsempfindlich. Gegen UV-Strahlung ist sie dagegen vollkommen beständig. Beispiele von Dächern und Fassaden die über 40 Jahre alt sind

zeigen keine erkennbaren Farbänderungen. Die Farbpalette ist breit und das Verfahren kann bei jeder Oberflächenausführung angewandt werden. Besonders beliebt sind geprägte und gefärbte Oberflächen. Das Grundmuster bleibt unter der durchscheinenden Farbe erkennbar. Bei der Betrachtung aus unterschied-

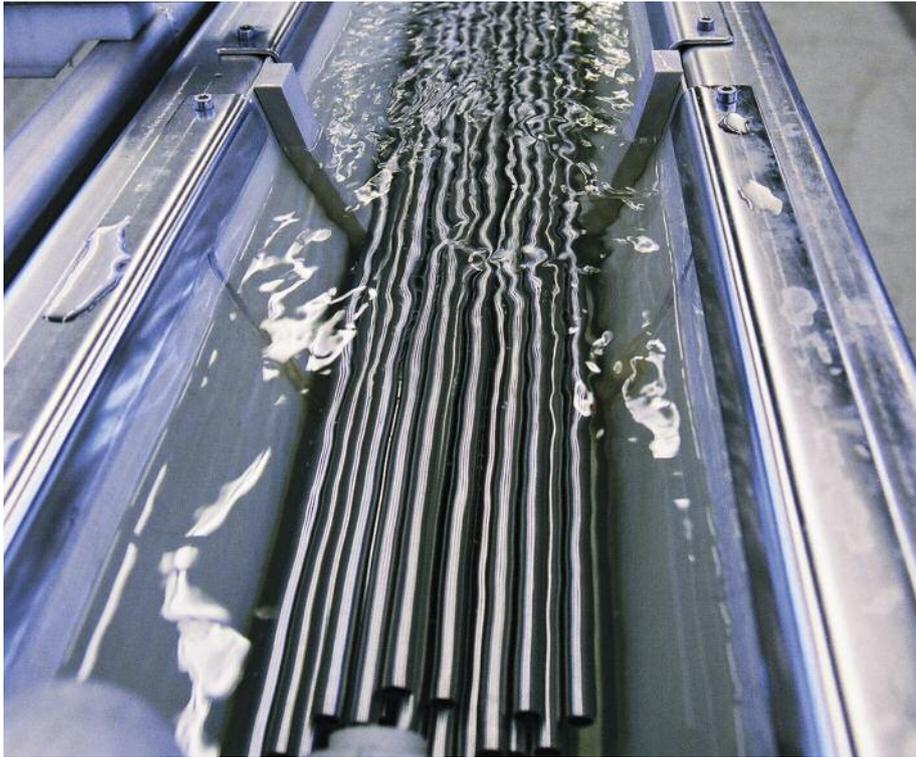
lichen Winkeln ändert sich auch die Farbwirkung.

Durch physikalische Gasphasenabscheidung (*physical vapor deposition*, PVD) oder Sputtern lassen sich äußerst dünne keramische Schichten auf Oberflächen aufbringen. Die Schichten selbst sind deckend, allerdings wirkt sich die Oberfläche des Grundwerkstoffs auf die Glanzwirkung aus. Gegenüber der elektrochemischen Färbung sind die Oberflächen kratzbeständiger und gleichförmiger. Allerdings sind sie porös. Bei schlechter Verarbeitung können sie abplatzen, Farbabweichungen aufweisen oder Spaltkorrosion auslösen. Es empfiehlt sich daher, den Anbieter zu überprüfen und das Produkt zu testen.

Bei nichtrostendem Stahl sind auch noch andere Färbverfahren eingesetzt worden, allerdings waren die Ergebnisse allesamt weniger langzeitbeständig als bei den o. g. Methoden. Bei hochbeanspruchten Innen- und Außenanwendungen sowie bei sandhaltigen Winden sollte die Haltbarkeit der Farbschichten getestet werden.



Beim „Vessel“ in New York City kommt farbig PVD-beschichteter nichtrostender Stahl zur Anwendung. © Shutterstock.com/TZIDO SUN



Elektropolieren nichtrostender Stahlrohre © Sandvik

## 14.6 Elektropolieren

Das Elektropolieren ist ein elektrochemisches Verfahren zur Oberflächen-glättung. Dabei fließt in einem speziellen Elektrolyten ein galvanischer Strom zwischen der Oberfläche eines metallenen Werkstücks und einer inerten Kathode. Das Elektropolieren ebnet die Oberfläche ein und verleiht ihr einen spiegelähnlichen Hochglanz. Das Verfahren wird zumeist bei Oberflächen angewandt, die zuvor bereits mechanisch fein geschliffen wurden.

Das Elektropolieren kann entweder in einem Tauchbad erfolgen, in dem der erforderliche anodische Strom angelegt wird. Oder es kann lokal manuell mittels handgeführter Kathoden durchgeführt werden, die mit einem elektrolytgetränkten Kissen ummantelt sind. Das Elektropolieren entfernt Oberflächenfehler und ergibt eine äußerst glatte und passive Oberfläche, die im Vergleich zu anderen Oberflächenausführungen eine überlegene Korrosionsbeständigkeit

aufweist. Wegen dieser Korrosionsbeständigkeit und Reinigungsfreundlichkeit wird das Elektropolieren vor allem bei Anlagenteilen für die Lebensmittel-, Pharma-, Medizin- und Halbleitertechnik angewandt. Als Normen sind zu nennen:

- DIN EN ISO 15730:2016-09 Metallische und andere anorganische Überzüge – Elektropolieren als Mittel zum Glätten und Passivieren von nichtrostendem Stahl
- ASTM B912, Standard Specification for Passivation of Stainless Steels Using Electropolishing (Standard-spezifikation der Passivierung von nichtrostendem Stahl durch Elektropolieren)
- SEMI F19, Specification for the Surface Condition of the Wetted Surfaces of Stainless Steel Components (Spezifikation der Oberflächenbeschaffenheit von benetzten Oberflächen von nichtrostendem Stahl)

## 14.7 Wiederherstellung und Schutz der Oberfläche nach der Verarbeitung

Die meisten Verarbeitungsschritte und selbst das bloße Handling können die Oberfläche von nichtrostendem Stahl beschädigen. Eine angleichende mechanische Oberflächenbehandlung kann diese Abweichungen beheben und ein durchgehendes Schliffbild wiederherstellen. Das Schleifen einer Schweißnaht oder anderen Störstelle verläuft genauso, wie oben beim Thema Polieren beschrieben. Zunächst werden Schweißraupe und Zunder entfernt. Je nach Bauteilgeometrie kann das mittels einer groben (Fächer-)Schleifscheibe oder eines Schleifbands geschehen. Anschließend wird die grob geschliffene Oberfläche mit immer feineren Schleifmitteln bearbeitet, bis sie der benachbarten Oberfläche angeglichen ist. Allerdings kann es schwierig sein, die Schweißnaht völlig unsichtbar zu machen.

Nichtrostender Stahl kann auch mit einer Schutzfolie bestellt werden, die während der meisten Verarbeitungsschritte auf der Oberfläche verbleibt. Wird das Bauteil lokal erhitzt, sollte die Folie zuvor aus dem entsprechenden Bereich entfernt werden. Der Schutz sollte erst dann vollständig abgezogen werden, wenn das Teil angebracht (oder fertig zur Anbringung) ist. So bleibt ein Großteil der Oberfläche geschützt und die Nachbearbeitung wird auf ein Minimum reduziert. Nicht alle Schutzfolien sind UV-beständig und für Außenanwendungen geeignet. Sie können verspröden und sind dann nur noch schwer zu entfernen (siehe Abschnitt 7.2).

# 15 Abschließende Reinigung

Die Oberflächen nichtrostenden Stahls sollten sauber, glatt und frei von stärkeren oberflächlichen Oxiden und Verunreinigungen sein. Verarbeitungsschritte wie Schweißen und spanende Bearbeitung können die Oberfläche verändern und die Korrosionsbeständigkeit herabsetzen. Sie können die Oberfläche mit Fremdeisen, Oxiden und anderen Ablagerungen verunreinigen; sie können die Passivschicht durch Chromverarmung schädigen und sie können mechanische Beschädigungen wie Schleifriefen verursachen (siehe die Beispiele für verarbeitungsbedingte Schäden in **Abbildung 34**). Daher müssen Bauteile nach der Fertigung durch geeignete Oberflächenbehandlungstechniken gereinigt und die Korrosionsbeständigkeit wiederhergestellt werden. Das nachstehende Kapitel behandelt häufig vorkommende Oberflächenbeschädigungen sowie die Techniken, sie zu beheben.

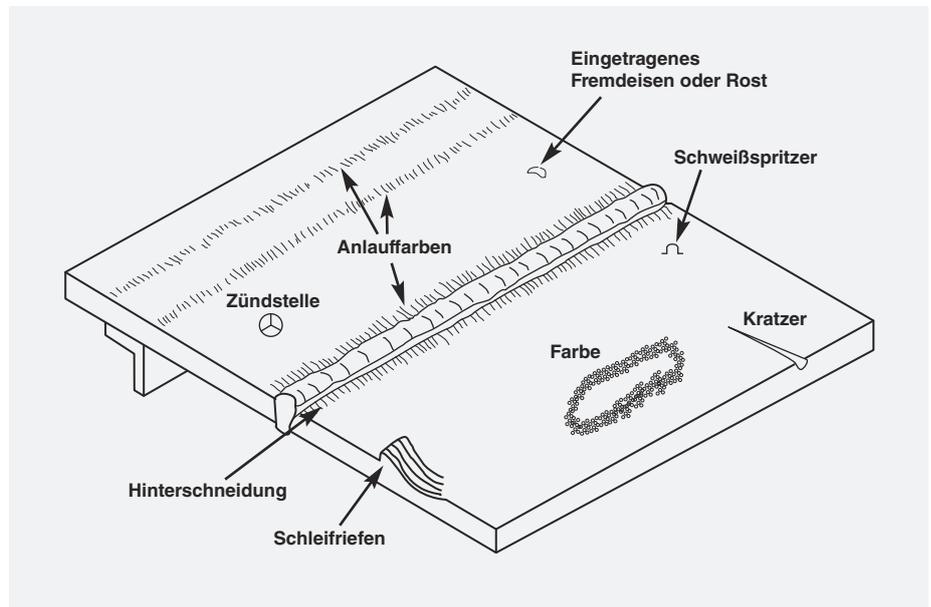


Abbildung 34: Während der Verarbeitung kann es zu Kontamination und Beschädigungen kommen (5).

## 15.1 Häufig vorkommende Beschädigungen und Oberflächenverunreinigungen

### 15.1.1 Fremdeisenkontamination

Fremdeisenkontamination kann immer dann auftreten, wenn nichtrostender Stahl mit unlegiertem Stahl in Berührung kommt. Sie ist weit verbreitet, weil bei der Verarbeitung stets stählerne Werkzeuge und Halterungen zum Einsatz kommen. Auf dem nichtrostenden Stahl befindliche Eisenpartikel rosten und bilden in feuchter Umgebung Flecken. Das Bild rechts zeigt einen vermeidbaren Kontakt von unlegiertem Stahl mit einer Oberfläche von nichtrostendem Stahl. Der Rost kann auch den nichtrostenden Stahl korrodieren lassen, wenn dieser unter den jeweiligen Bedingungen im Grenzbereich seiner Korrosionsbeständigkeit liegt. Auch Hochleistungsorten sind hiergegen nicht immun, auch wenn die Wirkung zumeist weniger gravierend ist als bei Standardsorten. **Abbildung 35** stellt die Auswirkungen unterschiedlicher Arten von Fremdeisenkontamination auf die Korrosionsbeständigkeit der Sorte AISI 316 (EN 1.4401) und einer mit 6 % Mo legierten Sorte vergleichend dar.

Zu den häufigsten Ausgangspunkten von Fremdeisenkontamination bei der Verarbeitung gehören

- Staub von unlegiertem Stahl durch Schleifarbeiten im Umfeld des nichtrostenden Stahls,
- der Einsatz von Werkzeugen, die aus un- oder niedriglegiertem Stahl bestehen oder zuvor bereits für solche Stähle gebraucht wurden,
- Schleifscheiben, die bereits für unlegierten Stahl verwendet wurden,
- Stahlkugeln als Strahlmittel,
- andere Strahlmittel, die jedoch zuvor bereits für unlegierten Stahl gebraucht wurden,
- Klemmen, Haken und Ketten aus Stahl,
- für die Stahlverarbeitung eingesetzte Walzen, Pressen und Formen,
- Stahlbürsten und Stahlwolle sowie
- jeglicher anderer Kontakt zwischen unlegiertem und nichtrostendem Stahl.



Bürsten aus unlegiertem Stahl können auf nichtrostendem Stahl Verfärbungen und Rost verursachen. © Outokumpu Stainless

### 15.1.2 Organische Verunreinigungen

Zu den organischen Verunreinigungen zählen Schmierstoffe, Kühlmittel auf Ölbasis, Markierungsstifte und Schmutz. Sie können auf nichtrostendem Stahl Spalte bilden und unter bestimmten Bedingungen Spaltkorrosion auslösen. Auch können sie zuvor in die Oberfläche eingebrachtes Fremdeisen oder aus dem Schweißprozess resultierende Oxide abdecken und verhindern, dass

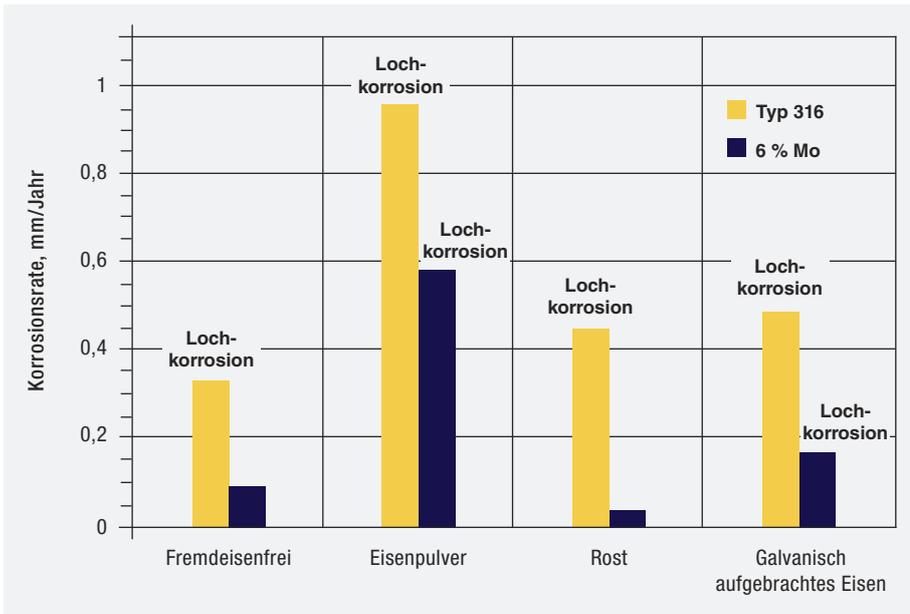


Abbildung 35: Wirkung unterschiedlicher Arten von Fremdeisenkontamination auf die Lochkorrosionsbeständigkeit von nichtrostendem Stahl AISI 316 (EN 1.4401) sowie einer Sorte mit 6 % Mo. Die Proben wurden 24 Stunden einer wässrigen Lösung mit 3 % CaCl<sub>2</sub>, 3 % NaCl, 0,5 % FeCl<sub>3</sub>, angereichert mit einem Gemisch aus 80 % Luft und 20 % SO<sub>2</sub>, ausgesetzt (31).

Beiz- und Passivierungsmittel sie entfernen. Überdies können verbleibende organische Stoffe nichtrostende Stahloberflächen bei anschließendem Wärmeeinfluss (Schweißen, Wärmebehandlung) aufkohlen.

### 15.1.3 Verzunderung durch Glühen und Schweißen

In Anwesenheit von Sauerstoff und unter gleichzeitigem Einfluss hoher Temperaturen beim (Spannungsarm-) Glühen oder Schweißen verzundern nichtrostende Stähle. Die Oxide bilden sich in Luft oder oxidierender Atmosphäre im Ofen. Derartige Oxide stellen keine wirksame Schutzschicht gegen Korrosion in Anwesenheit von Wasser dar und setzen die Korrosionsbeständigkeit im Allgemeinen herab. Sie sind porös und wesentlich dicker als die Passivschicht, die sich bei niedrigeren Temperaturen auf sauberen Oberflächen von nichtrostendem Stahl ausbildet. Mit zunehmender Dicke gehen die Anlaufarben von einem durchscheinenden hellen Strohgelb über Blau bis zu einem deckenden Schwarz über. Farbe und Dicke der Anlaufarben hängen von Temperatur und Einwirkungsdauer ab: Je höher die Temperatur und je länger die Einwirkung, desto dicker die Schicht.

So sind schweißbedingte Anlaufarben i. d. R. dünner und heller als Zunder aus dem Glühprozess. Die Oxidation lässt sich minimieren, indem man beim Schweißen Schutzgas mit niedrigem Sauerstoffgehalt verwendet oder in Schutzgasatmosphäre glüht, allerdings ist Verfärbung nur schwer vollständig zu verhindern. Jede sichtbare Verfärbung zeigt an, dass eine Nachbehandlung

erforderlich ist, um die optimale Korrosionsbeständigkeit zu erreichen.

Der Bereich unterhalb der Oxidschicht ist weniger korrosionsbeständig als der Grundwerkstoff. Der Grund: Bei Bildung und Aufwachsen der Oxidschicht geht Chrom aus dem Grundwerkstoff in die Verfärbung über, der Bereich unmittelbar darunter wird entsprechend chromverarmt. **Abbildung 36** zeigt die Chromkonzentration in einem Schnitt durch die Anlaufarben und den darunterliegenden nichtrostenden Stahl. Direkt unter der Oxidschicht kann der Chromgehalt bis unter 10,5 % absinken – jenes Niveau, das aus Stahl einen nichtrostenden macht. Folglich müssen sowohl die Anlaufarben als auch das chromverarmte Material bei der Nachbehandlung abgetragen werden, um die Korrosionsbeständigkeit vollständig wiederherzustellen.

### 15.1.4 Sonstige Fehler

Schweißfehler (Hinterschneidungen, Spritzer und Krater) bilden Spalte, die zu Korrosion führen. Kratzer, Kerben und extreme Rauheit führen zu Spalten und Oberflächenfehlern, in denen sich aggressive Verschmutzungen ansammeln und aufkonzentrieren können. Werden sie nicht entfernt, können sie zu Ausgangspunkten von Lokalkorrosion werden. Die oberflächliche Verunreinigung durch Metalle mit niedrigerem Schmelzpunkt,

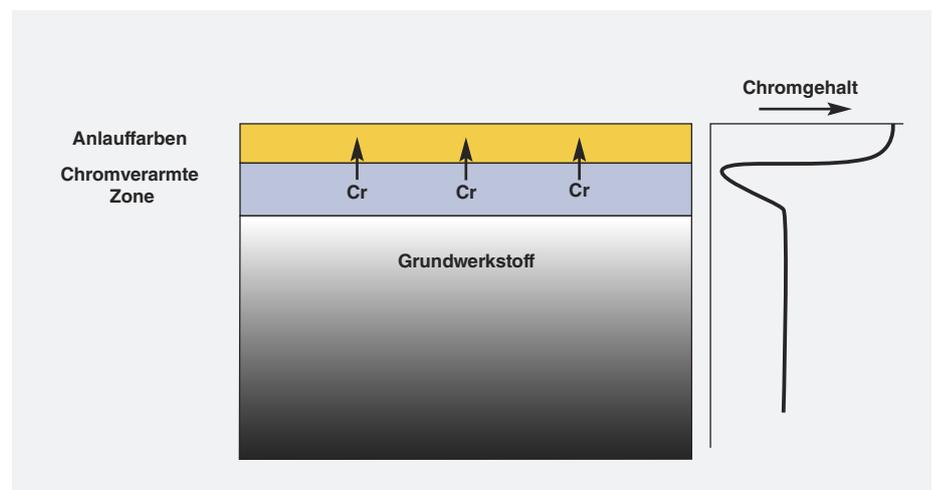


Abbildung 36: Chromkonzentration über den Querschnitt einer verzundernten Oberfläche (Prinzipienskizze)

z. B. Kupfer, kann bei späterer Wärme- einwirkung zu Flüssigmetallversprödung führen.

## 15.2 Abschließende Nachbe- handlung

Für die abschließende Behandlung nach der Verarbeitung gibt es zahlreiche Methoden. Welche geeignet ist, hängt von Art und Stärke der Verunreinigung sowie vom Einsatzzweck ab. Optimal ist stets eine Säurebehandlung, welche die Passivität und damit die Korrosions- beständigkeit wiederherstellt. **Tabelle 30** beschreibt zusammenfassend die ge- bräuchlichen Verfahren.

### 15.2.1 Sandstrahlen

Durch Sandstrahlen lassen sich groß- flächige, starke Verzunderungen kosten- günstig beseitigen. Der Sand sollte sauber und nicht zuvor bereits für un- legierten Stahl verwendet werden

sein. Er kann leicht Verunreinigungen wie Schmutz oder Eisenpartikel in die Oberfläche eintragen. Daher ist nach dem Sandstrahlen eine abschließende Passivierung – oder bei stärkerer Ver- unreinigung eine Beizbehandlung – erforderlich.

### 15.2.2 Glasperlenstrahlen

Das Glasperlenstrahlen ist dem Sand- strahlen vorzuziehen, da es eine ver- gleichsweise glatte Oberfläche ergibt. Wichtig ist, dass die Ausgangsober- fläche bereits sehr sauber ist. Auch hier- bei ist eine abschließende Passivierung bzw., bei starker, tief eingelagerter Verunreinigung, Beizbehandlung nötig.

### 15.2.3 Schleifen und Polieren

Schliffe mit grober Körnung entfernen tiefergehende Fehlstellen wie Hinter- schneidungen und ausgeprägte Kratzer. Das Schleifmittel muss frisch sein

oder darf zuvor nur für nichtrostenden Stahl eingesetzt worden sein. Die Ober- fläche sollte sich beim Schleifen nicht so weit erhitzen, dass sie gelb anläuft. Dem groben Schliff müssen zunehmend feinere Durchgänge bis hin zu Korn 180- 220 folgen, damit glatte Oberflächen mit guter Korrosionsbeständigkeit erzielt werden. Letztere lässt sich durch eine nachfolgende Passivierung noch weiter verbessern.

### 15.2.4 Bürsten und Stahlwolle aus nichtrostendem Stahl

Bürsten oder Stahlwolle aus nicht- rostendem Stahl können oberflächliche Anlauffarben, Verunreinigungen und Schmutz beseitigen. Die chromverarmte Zone entfernen sie jedoch nicht. Um bei leicht oxidierten, mit Bürsten oder Stahlwolle behandelten Oberflächen die volle Korrosionsbeständigkeit wieder- herzustellen, ist eine nachfolgende Beiz- behandlung erforderlich.

Tabelle 30: Verfahren der Nachbehandlung

Schadensart oder Verunreinigung	Reinigungsverfahren	Anmerkungen
Öl, Schmiermittel, organische Substanzen	Lösemittel Heißdampf Hochdruck-Wasserstrahl Ätzende Reinigungsmittel	Organische Substanzen vor dem Beizen oder Passivieren sowie vor dem Einfluss hoher Temperaturen, z. B. beim Schweißen, entfernen
Eisen und Stahl	Passivierung	Die Passivation muss kräftig genug sein, um Fremdeisen zu entfernen. Liegt eine stärkere Fremdeisenkontamination vor, ist zu beizen.
	Beizen Elektropolieren Feines Schleifen	Wenn eine Beizbehandlung vorgesehen ist, braucht i. d. R. nicht passiviert zu werden. Dem Schleifen sollte immer eine Beiz- oder Passivierungsbehandlung folgen, damit sichergestellt ist, dass sämtliches Fremdeisen entfernt wird.
Farbe	Glasperlenstrahlen oder Lösemittel	Sauberes Strahlmittel verwenden
Verzunderung nach dem Glühen	Sand- oder Glasperlenstrahlen mit anschließendem Beizen und/oder Passivieren	Sauberes Strahlmittel verwenden
Hinterschneidungen Grobe Schleifriefen Kratzer Schweißspritzer	Leichtes Schleifen	Nur saubere, verunreinigungsfreie Schleifmittel verwenden. Der abschließende Schliff sollte nicht grob sein, sondern mit einer feinen Körnung erfolgen, so dass die Oberfläche geglättet wird.
Anlauffarben	Grobes/feines Schleifen Beizen Strahlen Elektropolieren Bürsten	Eine Kombination von Schleifen und Beizen ist die wirksamste Methode, die Korrosionsbeständigkeit wiederherzustellen. Wird gebürstet, sollte anschließend gebeizt oder elektropoliert werden, um wieder die volle Korrosionsbeständigkeit zu erzielen.

### 15.2.5 Entfettung

Organische Verunreinigungen wie Schmiermittel für das Zerspanen oder Ziehen sowie Markierungen können die Korrosionsbeständigkeit beeinträchtigen und zu Rost führen. Zudem verhindern sie, dass die Oberfläche des nichtrostenden Stahls beim Beizen und Passivieren benetzt wird. Diese Verunreinigungen gilt es also vor der Auslieferung oder der chemischen Oberflächenbehandlung mit einem alkalischen Reiniger oder chloridfreien Lösungsmittel zu entfernen.

### 15.2.6 Säurebeizen

Das Beizen ergibt eine äußerst korrosionsbeständige Oberfläche. Dabei kommen starke Säuren zur Anwendung, die Anlauffarben bzw. Zunder sowie die darunter liegende chromverarmte

Schicht entfernen. Da hierbei Werkstoff abgetragen wird, muss eine übermäßige Ätzwirkung auf die Oberfläche vermieden werden. Säurebeizen ergibt eine mattgraue, wirksam passivierte Oberfläche.

Beizlösungen gibt es viele. Zumeist enthalten sie kleine Mengen von Salpeter-, Fluss- und Schwefelsäure (einzeln oder in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen). Die jeweils geeignetste Zusammensetzung, Temperatur und Zeit hängen von Werkstoffsorte, Dicke der Oxidschicht sowie evtl. vorausgegangener mechanischer Vorbehandlung ab.

Die Beizparameter sind stark sortenabhängig. Die für die Stähle AISI 304 und 316 (EN 1.4301 und 1.4401) geltenden Werte wären für eine deutlich korrosionsbeständigere, mit 6 % Mo legierte Hochleistungsorte nicht zutreffend.

**Abbildung 37** verdeutlicht, dass die Metallabtragsraten der unterschiedlichen nichtrostenden Stähle in einer Salpeter-Flusssäure-Lösung stark vom Legierungsgehalt abhängen (zu beachten ist die logarithmische Skala der Abtragsrate). Die Balken zeigen, dass die Behandlungsdauer bei hochlegierten nichtrostenden Stählen erheblich länger ist als bei Standardsorten. Vorheriges Strahlen verkürzt sie zumeist auf ein akzeptables Maß. Wenn bei hochlegierten Sorten Zunder schneller entfernt werden soll, bietet sich eine Entzunderung in geschmolzenem Salz an.

Sofern keine mechanische Vorbehandlung stattfindet, muss die Oberfläche zunächst entfettet werden, um sicherzustellen, dass das Beizmittel auch mit der Oberfläche in Berührung kommt und so Zunder sowie chromverarmte Zone entfernen kann.

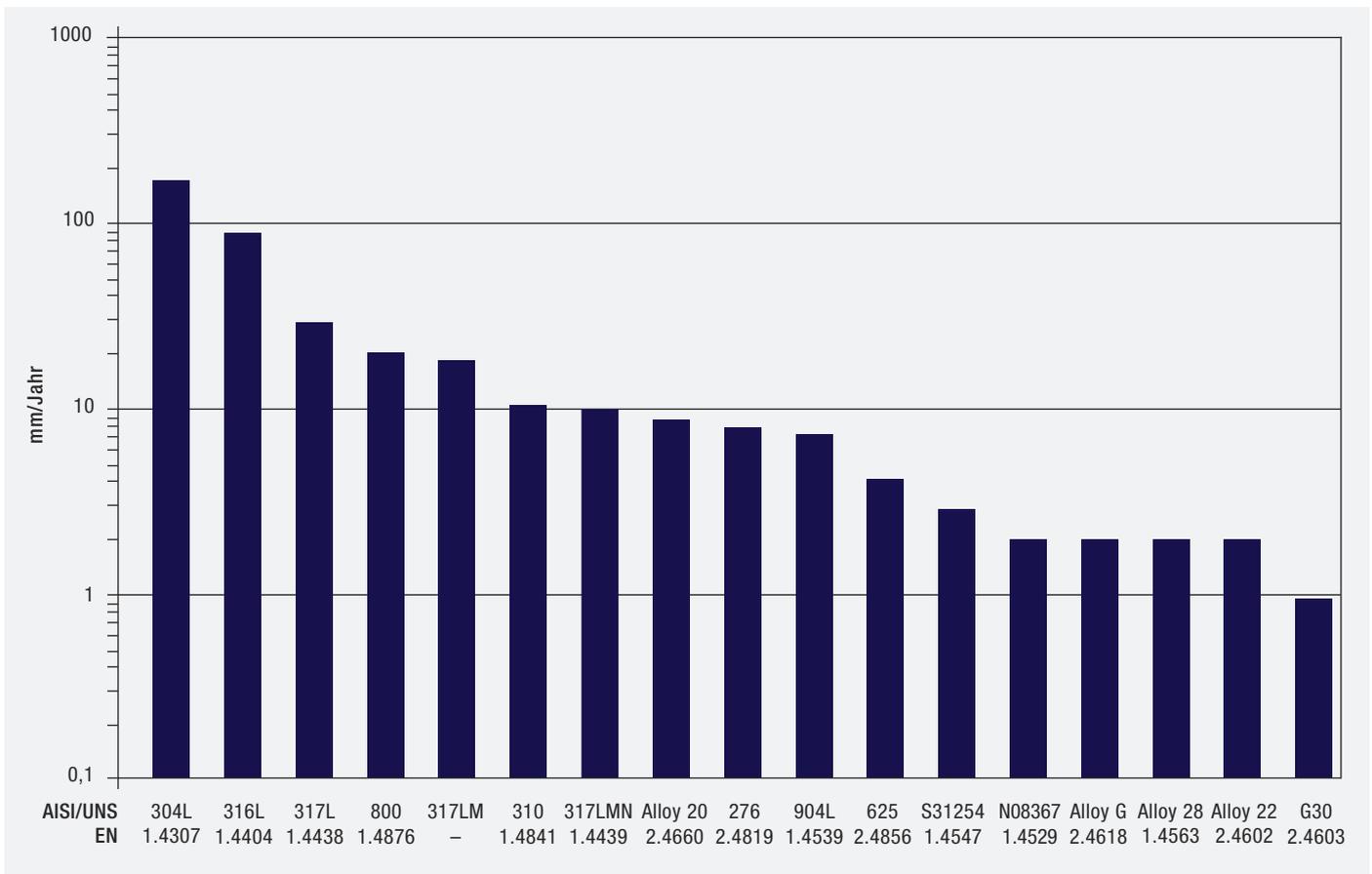


Abbildung 37: Metallabtragsraten für nichtrostenden Stahl und Nickelbasislegierungen in simulierter Beizlösung (10 % HNO<sub>3</sub> + 3 % HF) bei 21 °C (70 °F) (32)



Nachbehandlung eines Schweißteils: Ausgangszustand (links), gebeizt (Mitte), elektroliert (rechts) © Calamo AB

Das Beizen kann im Tauchbad oder mittels Sprühauftrag erfolgen. Bestimmte Produkte sind als Spray, Gel oder Paste auch für die lokale Anwendung geeignet. Beizpasten lassen sich mit dem Pinsel auftragen – auf das gesamte Teil oder nur einen bestimmten Bereich, etwa die Schweißnaht.

Nach dem Beizen muss das Bauteil gründlich mit einer Lösung behandelt werden, die evtl. verbliebenes Beizmittel neutralisiert, und danach mit Wasser von geringem Chloridgehalt abgespült werden. Anschließend kann es an der Luft trocknen. Mithilfe von Tests lässt sich feststellen, ob die Oberflächen nach der Spülung frei von Säure und Chloridionen sind. Verbrauchte Beizlösung und Spülwasser müssen entsprechend den geltenden Bestimmungen entsorgt werden. Es ist wichtig, alle Sicherheitshinweise zu lesen und zu befolgen (z. B. Schutzbrillen, -handschuhe und andere Schutzausrüstung zu benutzen). Besonders Flusssäure ist gefährlich, weil sie die Haut durchdringen und im Körper verbleiben kann. Sie kann zu schweren dauerhaften Schäden oder sogar zum Tod führen. Wie wichtig es ist, die Umweltschutz- und Arbeitssicherheitsauflagen zu beachten, kann nicht genug betont werden.

### 15.2.7 Passivierung

Die Passivierung dient dazu, leichte Fremdeisenkontamination von der Oberfläche von nichtrostendem Stahl zu entfernen. Sie wirkt weniger eingreifend als das Beizen und kann daher Anlauffarben und Zunder sowie die chromverarmte Schicht nicht entfernen. Sie erzeugt eine schützende Passivschicht und versetzt die Oberfläche in die Lage, sich an der Luft schnell zu repassivieren. Ferner stellt sie wirksam sicher, dass ein nicht gebeizter nichtrostender Stahl vollständig sauber ist. Nach einer mechanischen Vorbehandlung durch Strahlen, Schleifen oder Bürsten sorgt die Passivierung für eine vollständige Entfernung von Eisenpartikeln von der Oberfläche.

Die ASTM-Normen A967 und A380 umfassen Informationen zum Passivieren unterschiedlichster nichtrostender Stähle. Produkte für die Passivierung sind im Handel erhältlich. Bei der Passivierung mit Salpetersäure kommt i. A. eine 20–45 %ige wässrige Lösung zum Einsatz. Die zu behandelnden Teile werden rund 30 min bei 20–30 °C (70–90 °F) eingetaucht und anschließend mit Wasser abgespült. Auch die Behandlung mit Zitronensäure kann sehr wirksam

sein. Sie wird häufig bevorzugt, wenn Salpetersäure Sicherheits- oder Umweltfragen aufwirft. Ammoniakhaltige Zitronensäure-Lösungen sind bei der Entfernung oberflächlicher Fremdeisenverunreinigungen zumeist überlegen. Die Oberflächen müssen zuvor entfettet werden, damit das Passivierungsmittel mit der Oberfläche in Berührung kommen und Fremdeisen auflösen kann.

### 15.2.8 Elektropolieren

Beim Elektropolieren handelt es sich um einen elektrochemischen Prozess, der eingetragenes Fremdeisen, Anlauffarben sowie nichtmetallische Einschlüsse entfernt. Er glättet die Oberfläche und verleiht ihr ein glänzendes Aussehen. Es kommt häufig in Einsatzbereichen zur Anwendung, in denen höchste Anforderungen an Sauberkeit und Hygiene gestellt werden. Elektropolierete Oberflächen sind leichter zu überprüfen und zu reinigen, da Verschmutzungen auf den glatten Oberflächen weniger anhaften können. Diese Eigenschaften prädestinieren sie für Anwendungen in Pharmazie, Halbleiterfertigung sowie Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie.

Tabelle 31: Nachbehandlungsverfahren in der Übersicht

Defekt/Verunreinigung	Chemische Behandlung				Mechanische Behandlung		
	Entfetten	Beizen	Elektropolieren	Passivieren	Strahlen	Bürsten	Schleifen
Öl und Fett	E	N	N	N	N	N	N
Schweißbedingte Anlauffarben	N	W	W	N	W	(W)1	W
Schweißbedingt chromverarmte Zone	N	W	(W)2	N	N	N	(W)3
Schweißschlacke	N	W	(W)	N	(W)3	(W)	W
Leichte oberflächliche Fremdeisenkontamination	N	W	W	W	(W)4	(W)4	(W)4
In die Oberfläche eingetragene Fremdeisenkontamination	N	W	(W)	(W)	(W)4	N	(W)4
Oberflächliche Schweißfehler, Kratzer	N	N	N	N	N	N	W

W = wirksam  
 (W) = bedingt wirksam  
 N = nicht wirksam

1 = Entfernt nur schweißbedingte Anlauffarben  
 2 = Da diese Zone nicht sichtbar ist, ist schwer zu beurteilen, ob sie entfernt wurde  
 3 = Schwierig in engen Ecken usw.  
 4 = Fremdeisenverunreinigungen neigen zum Verschmieren

### 15.3 Einfluss der Reinigungsmethode auf die Korrosionsbeständigkeit

Die Auswahl der Nachbehandlungsmethode kann auf die erzielte Korrosionsbeständigkeit einen maßgeblichen Einfluss ausüben. Die Reinigung mit Scheuerschwämmen, Edelstahlbürsten oder groben Schleifmitteln ist am wenigsten wirksam, die Korrosionsbeständigkeit des Ausgangswerkstoffs wiederherzustellen (17). Eine Kombination von mechanischer Reinigung und anschließendem Beizen oder Passivieren ergibt die höchste Korrosionsbeständigkeit. **Tabelle 31** beschreibt die Wirksamkeit unterschiedlicher Reinigungsmethoden. **Abbildung 38** zeigt vergleichend den Effekt verschiedener Schweißnaht-Nachbehandlungen auf Grundwerkstoff, Naht und Wärmeinflusszone anhand der erzielten Korrosionsbeständigkeit (d. h. der kritischen Lochkorrosionstemperatur).

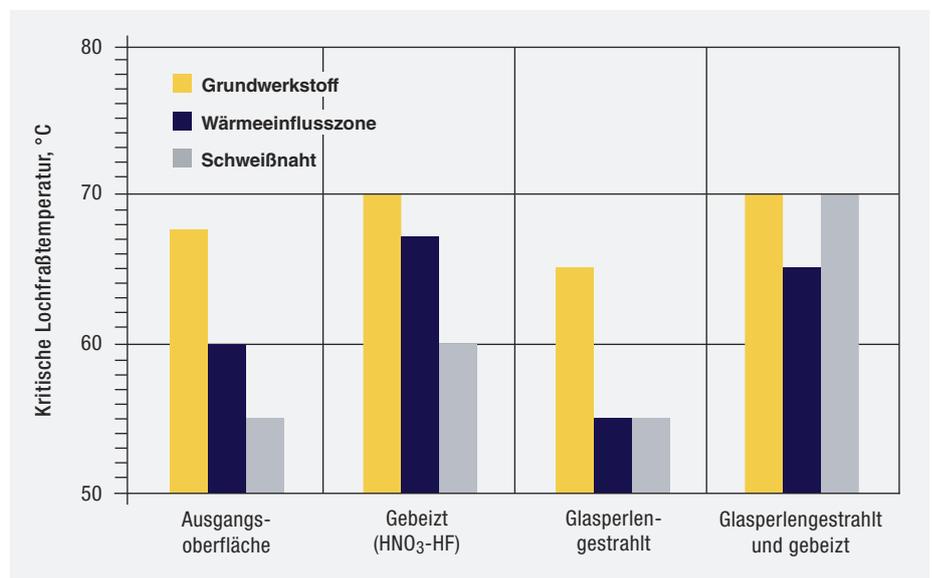


Abbildung 38: Auswirkung unterschiedlicher Reinigungsmethoden auf die Lochkorrosionsbeständigkeit eines nichtrostenden 6%-Mo-Stahls, gemessen anhand der kritischen Lochkorrosionstemperatur (33).

# Quellentexte

- 1 Antero Kyrolainen, Martti Vilpas, und Hannu Hanninen, *J of Materials Engineering and Performance*, Bd. 9 Dezember 2000, S. 669.
- 2 *Welding of Stainless Steels and Other Joining Methods*, American Iron and Steel Institute, Washington DC und Nickel Institute, Toronto, 1979. Verfügbar als Nickel-Institute-Publikation Nr. 9002.
- 3 M. G. Fontana und N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2. Auflage, McGraw-Hill, Boston, S. 59, 1978.
- 4 Novak, C. J., "Structural and Constitution of Wrought Austenitic Stainless Steels", Kap. 4 des *Handbook of Stainless Steels*, Peckner, D. & Bernstein, I. M., Hrsg., McGraw-Hill, 1977, S. 4-45.
- 5 *Guidelines for the Welded Fabrication of Nickel Stainless Steels for Corrosion Resistance Service*, Nickel Institute Toronto, überarbeitete Fassung 2020. Verfügbar als Nickel-Institute-Publikation Nr. 11007.
- 6 Weiss, B. und Stickler, R., *Metallurgical Transactions*, Bd. 3, 1972, S. 851.
- 7 Unveröffentlichte Daten, Outokumpu.
- 8 The influence of N, Mo, and Mn on the microstructure and corrosion resistance of austenitic stainless steels, R.F. A. Jargelius-Petersson, Dissertation, Dept. of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Loharad, 1998.
- 9 M. O. Speidel und P. J. Uggowitzer, "High Manganese, High Nitrogen Austenitic Stainless Steels: Their Strength and Toughness", Tagungsband zu zwei Konferenzen über hoch-manganlegierte austenitische Stähle, die erste im Rahmen der ASM International Materials Week '87, die zweite der ASM International Materials Week '92. R. A. Lula, Hrsg., American Society for Metals, Metals Park, 1992.
- 10 *High Performance Stainless Steels*, Nickel Institute, Toronto, 2000. Verfügbar als Nickel-Institute-Publikation Nr. 11021.
- 11 *Corrosion Resistance Tables: Metals, Nonmetals, Coatings, Mortars, Plastics, Elastomers, and Linings and Fabrics*, CRC Press, 5. Auflage (2004), Philip A. Schweitzer (Hrsg.).
- 12 Sandvik, Online-Korrosionstabellen.
- 13 BAM Dangerous Goods Database Version 12.1.
- 14 M. G. Fontana und N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2. Auflage, McGraw-Hill, Boston, S. 62, 1978.
- 15 American Boat & Yacht Council, Electric Division Standard ABYC E-2 Cathodic Protection, S. 9, Juli, 2013.
- 16 *Designer Handbook Stainless Steel Fabrication*, Specialty Steel Industry of North America.
- 17 *ASM Specialty Handbook, Stainless Steels*, hrsg. von J. R. Davis, ASM International 1994, S. 261.
- 18 *Stainless Steel Informational Series, The Fabrication Of Stainless Steel*, Southern Africa Stainless Steel Development Association (SASSDA), 2017.
- 19 *Stainless Steel Fabrication*, Allegheny Ludlum Steel Corp, 1959.
- 20 Curtis W. Kovach, "Sulfide Inclusions and the Machinability of Steel", in *Sulfide inclusions in steel: Proceedings of an International Symposium*, 7-8 November 1974, J. J. de Barbadillo and Edwin Snape, Hrsg., American Society for Metals, Metals Park, 1975.
- 21 Entnommen den Avesta Sheffield Machining Guidelines, vergriffen, ersetzt durch das Machining Handbook, Outokumpu, 3. Auflage, 2019
- 22 "Heat Treating of Stainless Steels", *ASM Handbook*, Bd. 4, Heat Treating, S. 774, ASM International, Materials Park, 1991.
- 23 *Welding Handbook*, Outokumpu, 2. Auflage, 2019
- 24 *Matchless in Stainless, Practice and Products for Stainless Steel Welding*. voestalpine Böhler Welding Group GmbH.
- 25 *The Avesta Welding Manual, Practice and products for stainless steel welding*, Avesta Welding AB, Avesta Sweden (2004).
- 26 Richard E. Avery, "Pay Attention to Dissimilar Metal Welds: Guidelines for Welding Dissimilar Metals", *Chemical Engineering Progress*, Mai 1991, American Institute of Chemical Engineers, Danbury. Verfügbar als Nickel-Institute-Publikation Nr. 14018.

- 27 Design Manual for Structural Stainless Steel, 4. Auflage, The Steel Construction Institute, 2017. Verfügbar unter [www.steel-stainless.org/designmanual](http://www.steel-stainless.org/designmanual)
- 28 P.-J. Cunat, Working with Stainless Steel, Brüssel, Euro Inox 2008, S. 117
- 29 Euro Inox, Adhesive Bonding of Stainless Steels, Materials and Application Series, Bd. 21.
- 30 Stainless Steels in Architecture, Building and Construction – Guidelines for Corrosion Prevention, Nickel Institute, Toronto, 2001. Verfügbar als Nickel-Institute-Publikation Nr. 11024.
- 31 W. L. Silence, P. Cook, J. R. Dillman, und F. G. Hodge, “The Effect of Surface Iron Contamination on the Corrosion Resistance of Alloys in Simulated FGD Environments”, Vortrag 482, Corrosion 98, National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, 1998.
- 32 J. F. Grubb, “Pickling and Surface Chromium-Depletion of Corrosion Resistant Alloys”, Stainless Steels '91, Proceedings of the International Conference on Stainless Steels, 1991, Chiba, S. 944-951 ISIJ, 1991.
- 33 A. Tuthill and R. E. Avery, “Specifying Stainless Steel Surface Treatments”, Advanced Materials and Processes, Dezember 1992. Verfügbar als Nickel-Institute-Publikation Nr. 10068.

# Weiterführende Literatur

## Spezifikation

Specifying Stainless Steel Surface Treatments, Nickel-Institute-Publikation Nr. 10068

## Metallurgie

Handbook of Stainless Steels, Peckner, D. & Bernstein, I. M., McGraw-Hill, 1977

High Performance Stainless Steels, Nickel Institute Publication No. 11021, Nickel Institute, Toronto, Canada

## Korrosion

Corrosion of Stainless Steels, 2. Auflage, A. John Sedriks, John Wiley & Sons, Inc., 1996

Corrosion Resistance Tables, 5. Auflage, Philip A Schweitzer, Marcel Dekker, Inc., 2004

Corrosion Handbook, 11. Auflage, Outokumpu, 2015

Experience Survey – Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Water, MTI Publication No. 27, Materials Technology Institute of the Chemical Industry

Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle an der Atmosphäre, ISER-Merkblatt 828, 2016

## Verarbeitung

Fabrication of Chromium-Nickel Stainless Steels (300 series), Nickel Institute Publication No. 428, Nickel Institute, Toronto, Canada

Fabrication and Post-Fabrication Cleanup of Stainless Steels, Nickel Institute Publication No. 10004, Nickel Institute, Toronto, Canada

Practical guide to Using 6Mo Austenitic Stainless Steel, Nickel Institute Publication No. 10032, Nickel Institute, Toronto, Canada

Fabrication Options for Nickel Containing Alloys in FGD Service: Guidelines for Users, Nickel Institute Publication No. 14029, Nickel Institute, Toronto, Canada

Handbook of stainless steel, 2. Auflage, Outokumpu, 2017

Machining Handbook, 3. Auflage, Outokumpu, 2019

Sheet Metal Forming Handbook, Outokumpu, 2017

Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, 3. Auflage, International Molybdenum Association Publication, London, UK, 2014

Pickling and Passivating Stainless Steel (Materials and Applications Series, Volume 4), Euro Inox, Brüssel, Belgien, 2004

Stainless Steel in Contact with Other Metallic Materials, (Materials and Application Series, Volume 10), Euro Inox, Brüssel, Belgien, 2009

Electropolishing Stainless Steels, (Materials and Application Series, Volume 11), Euro Inox, Brüssel, Belgien, 2010

Designer Handbook Stainless Steel Fabrication, Specialty Steel Industry of North America

Die Verarbeitung von Edelstahl Rostfrei, ISER-Merkblatt 822, 2012

## Schweißen

Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, John C. Lippold and Damain J. Kotecki, John Wiley & Sons, Inc., 2005

Stainless Steels Welding Guide, Damian Kotecki and Frank Armao, The Lincoln Electric Company, 2003.

Welding Metallurgy, 2. Auflage, Sindo Kou, John Wiley & Sons, Inc., 2002

Welding Handbook, 2. Auflage, Outokumpu, 2019

Stainless Steel and Nickel-base Cored Wires to Join Stainless Steel, Voestalpine Böhler Welding, 2018

Welding of Stainless Steels (Materials and Applications Series, Volume 3), Euro Inox, Brüssel, Belgien, 2001

Guidelines on the Welded Fabrication of Stainless Steels (Materials and Application Series, Volume 9), Euro Inox, Brüssel, Belgien, 2007

Weld Fabrication of a 6% Molybdenum Alloy to Avoid Corrosion in Bleach Plant Service, Nickel Institute Publication No. 14020, Nickel Institute, Toronto, Canada

Guidelines for Welding Dissimilar Metals, Nickel Institute Reprint Series No. 14018, Nickel Institute, Toronto, Canada.

Schweißen von Edelstahl Rostfrei, ISER-Merkblatt 823, 2019

Visuelle Beurteilung von Schweißnähten bei nichtrostendem Stahl – ein bebildeter Leitfaden, ISER-Merkblatt 986, 2020

# ASTM-Normen

<b>Gewalzte Flachprodukte aus nichtrostendem Stahl</b>	
A480/A480M*	General requirements for flat-rolled stainless and heat-resisting steel plate, sheet, and strip
A240/A240M*	Chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications
A666	Annealed or cold-worked austenitic stainless steel sheet, strip, plate, and flat bar
<b>Gewalzte oder geschmiedete Langprodukte aus nichtrostendem Stahl</b>	
A484/A484M*	General requirements for stainless steel bars, billets, and forgings
A555/A555M	General requirements for stainless steel wire and wire rods
A276/A276M	Stainless steel bars and shapes
A479/A479M*	Stainless steel bars and shapes for use in boilers and other pressure vessels
A564/A564M	Hot-rolled and cold-finished age-hardening stainless steel bars and shapes
A314	Stainless steel billets and bars for forging
A473	Stainless steel forgings
A313/A313M	Stainless steel spring wire
A368	Stainless steel wire strand
A492	Stainless steel rope wire
A580/A580M	Stainless steel wire
<b>Nichtrostende Stahlrohre</b>	
A999/A999M*	General requirements for alloy and stainless steel pipe
A1016/A1016M*	General requirements for ferritic alloy steel, austenitic alloy steel, and stainless steel tubes
A312/A312M*	Seamless and welded austenitic stainless steel pipe
A358/A358M*	Electric-fusion-welded austenitic chromium-nickel stainless steel pipe for high-temperature service
A409/A409M	Welded large diameter austenitic steel pipe for corrosive or high-temperature service
A778/A778M	Welded, unannealed austenitic stainless steel tubular products
A813/A813M	Single- or double-welded austenitic stainless steel pipe
A814/A814M	Cold-worked welded austenitic stainless steel pipe
A249/A249M*	Welded austenitic steel boiler, superheater, heat-exchanger, and condenser tubes
A269/A269M	Seamless and welded austenitic stainless steel for general service
A270/A270M	Seamless and welded austenitic stainless steel sanitary tubing
A688/A688M	Welded austenitic stainless steel feedwater heater tubes

### Fittings, Verbindungsmittel und Schmiedestücke

A960/A960M	Common requirements for wrought steel pipe fittings
A962/A962M	Common requirements for steel bolting intended for use at any temperature from cryogenic to the creep range
A182/A182M	Forged or rolled alloy-steel pipe flanges, forged fittings, and valves and parts for high-temperature service
A193/A193M	Alloy-steel and stainless steel bolting materials for high-temperature service
A194/A194M	Carbon, and alloy steel nuts for bolts for high pressure and high-temperature service
A403/A403M	Wrought austenitic stainless steel pipe fittings

Anm.: In der Tabelle sind für die jeweiligen Kategorien von Produkten aus nichtrostendem Stahl zunächst die allgemeinen Normen, dann die Normen für einzelne Erzeugnisse verzeichnet. Die jeweiligen Produktnormen nehmen auf die allgemeinen Normen Bezug, letztere brauchen also nicht gesondert angeführt zu werden. Wird beispielsweise nichtrostendes Blech gemäß ASTM A240 bestellt, gelten automatisch auch alle Anforderungen von ASTM A480.

\* Norm, zu der in Abschnitt II des ASME Boiler and Pressure Vessel Code eine entsprechende „SA“-Norm mit gleicher Nummer besteht

# DIN EN-Normen

DIN EN 1011-3:2019-06	Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 3: Lichtbogenschweißen von nichtrostenden Stählen
DIN EN ISO 3581:2018-03	Schweißzusätze – Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen – Einteilung
DIN EN 10028-7:2016-10	Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen - Teil 7: Nichtrostende Stähle
DIN EN 10088-1:2014-12	Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle
DIN EN 10088-2:2014-12	Nichtrostende Stähle - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Blech und Band aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung
DIN EN 10088-3:2014-12	Nichtrostende Stähle - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für Halbzeug, Stäbe, Walzdraht, gezogenen Draht, Profile und Blankstahlerzeugnisse aus korrosionsbeständigen Stählen für allgemeine Verwendung
DIN EN 10151:2003-02	Federband aus nichtrostenden Stählen - Technische Lieferbedingungen
DIN EN 10213:2016-10	Stahlguss für Druckbehälter
DIN EN 10222-5:2017-06	Schmiedestücke aus Stahl für Druckbehälter - Teil 5: Martensitische, austenitische und austenitisch-ferritische nichtrostende Stähle
prEN EN 10250-1:2020-11 – Entwurf	Freiformschmiedestücke aus Stahl für allgemeine Verwendung - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
DIN EN ISO 9445-1:2010-06	Kontinuierlich kaltgewalzter nichtrostender Stahl - Grenzabmaße und Formtoleranzen - Teil 1: Kaltband und Kaltband in Stäben
DIN EN ISO 9445-2:2010-06	Kontinuierlich kaltgewalzter nichtrostender Stahl - Grenzabmaße und Formtoleranzen - Teil 2: Kaltbreitband und Blech
DIN EN 10269:2014-02	Stähle und Nickellegierungen für Befestigungselemente für den Einsatz bei erhöhten und/oder tiefen Temperaturen
DIN EN 10272:2016-10	Stäbe aus nichtrostendem Stahl für Druckbehälter
DIN EN 10283:2019-06	Korrosionsbeständiger Stahlguss
DIN EN 10312:2005-12	Geschweißte Rohre aus nichtrostendem Stahl für den Transport von Wasser und anderen wässrigen Flüssigkeiten - Technische Lieferbedingungen
DIN EN ISO 14343:2017-08	Schweißzusätze - Drahtelektroden, Bandelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen - Einteilung
DIN EN 10216-5:2021-06	Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 5: Rohre aus nichtrostenden Stählen
DIN EN 10217-7:2021-06	Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen - Technische Lieferbedingungen - Teil 7: Rohre aus nichtrostenden Stählen

Anmerkung: Aufgrund der ständig fortschreitenden Normungsarbeit sollten die oben aufgeführten Normen hinsichtlich Aktualität, Änderungen und Verfügbarkeit in der Datenbank des Beuth Verlages ([www.beuth.de](http://www.beuth.de)) überprüft werden.

# Eingetragene Warenzeichen und Handelsnamen

UNS (AISI)	EN	Geläufige Eingetragene Warenzeichen und Handelsnamen	Unternehmen
N08020	2.4660	20Cb-3 <sup>®</sup>	Carpenter Technology Corporation
N08904 (904L)	1.4539	ATI 904L <sup>™</sup> UR <sup>™</sup> 904L Ultra <sup>®</sup> 904L	ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal Outokumpu
N08028	1.4563	Sanicro <sup>®</sup> 28 INCOLOY <sup>®</sup> Alloy 28 UR <sup>™</sup> 28	Sandvik AB Special Metals Corporation Industeel - ArcelorMittal
S34565	1.4565	ATI 4565 <sup>™</sup> UR <sup>™</sup> 4565	ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal
N08026	–	20Mo-6 <sup>®</sup> INCOLOY <sup>®</sup> alloy 25-6MO	Carpenter Technology Corporation Special Metals Corporation
S32053	–	NAS 254N	Nippon Yakin Kogyo Co.
N08926	1.4529	VDM <sup>®</sup> Alloy 926, Cronifer <sup>®</sup> 1925 hMo NAS 255NM UR <sup>™</sup> 926 Ultra <sup>®</sup> 6XN	VDM Metals International GmbH Nippon Yakin Kogyo Co. Industeel - ArcelorMittal Outokumpu
S31254	1.4547	254 SMO <sup>®</sup> UR <sup>™</sup> 254	Outokumpu Industeel - ArcelorMittal
N08367	1.4529	AL-6XN <sup>®</sup> UR <sup>™</sup> 367 Ultra <sup>®</sup> 6XN	ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal Outokumpu
S31266	1.4659	UR <sup>™</sup> 66	Industeel - ArcelorMittal
S31277	–	INCOLOY <sup>®</sup> alloy 27-7MO	Special Metals Corporation
N08031	1.4562	VDM <sup>®</sup> Alloy 31, Nicrofer <sup>®</sup> 3127 ATI 31 <sup>™</sup> UR <sup>™</sup> 31	VDM Metals International GmbH ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal
N08354	–	NAS 354N	Nippon Yakin Kogyo Co.
N08935	–	Sanicro <sup>®</sup> 35	Sandvik AB
S32654	1.4652	654 SMO <sup>®</sup>	Outokumpu





Mitherausgeber:



Deutsche Bearbeitung:



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei