

Merkblatt 823

Schweißen von Edelstahl Rostfrei



Die Informations- stelle Edelstahl Rostfrei

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

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

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

- praxisbezogene, zielgruppenorientierte Publikationen,
- Online-Informationplattform unter www.edelstahl-rostfrei.de,
- Pressearbeit für Fach- und Publikumsmedien,
- Messebeteiligungen,
- Durchführung von Schulungsveranstaltungen,
- Errichtung von Kompetenzzentren „Edelstahl-Rostfrei-Verarbeitung“,
- Informationen über Bezugsmöglichkeiten von Produkten aus Edelstahl Rostfrei,
- individuelle Bearbeitung technischer Anfragen.

Ein aktuelles Schriftenverzeichnis ist einsehbar unter www.edelstahl-rostfrei.de/ Publikationen.

Impressum

Merkblatt 823
Schweißen von Edelstahl Rostfrei
5. überarbeitete und korrigierte
Auflage 2019

Herausgeber:
Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 10 22 05
40013 Düsseldorf
Telefon: 0211 / 67 07-8 36
Telefax: 0211 / 67 07-3 44
Internet: www.edelstahl-rostfrei.de
E-Mail: info@edelstahl-rostfrei.de

Autor der aktuellen Auflage:
Prof. Dr. W.-B. Busch, Bielefeld

Autoren der vorhergehenden Auflagen:

Dipl.-Ing. L. Faust, Dortmund
Dr. D. Grimme, NL-CV Bocholtz
Dipl.-Ing. G. Metting, Duisburg
Dr.-Ing. M. Nagel, Aachen
Dipl.-Ing. S. Nestler, Hamm
Dipl.-Ing. SFI H.-D. Prinz, Eisenberg
Dipl.-Ing. S. Schreiber, Duisburg
Dr. F.W. Strassburg, Kempen
Dipl.-Ing. Rainer Trillmich, Meinerzhagen
Dr. G. Uhlig, Krefeld
Dr.-Ing. H. Wehner, Trebur

Titelfoto:
Wilhelm Modersohn GmbH & Co. KG,
Spenge

Abbildungen:
Stefan Elgaß,
Geretsried
ThyssenKrupp Nirosta GmbH,
Krefeld
Thyssen Laser-Technik GmbH,
Aachen

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.

Inhalt

	Seite
1 Einleitung	1
2 Grundwerkstoffe	1
2.1 Metallkundliche Merkmale der nichtrostenden Stähle in Bezug auf das Schweißen	2
2.2 Korrosionseigenschaften	5
2.3 Einteilung nach Korrosionsbeständigkeitsklassen	7
3 Schweißprozesse	7
3.1 Schmelzschweißen	7
3.1.1 Lichtbogenhandschweißen mit umhüllter Stabelektrode	7
3.1.2 Schutzgasschweißen	8
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	
Plasmalichtbogenschweißen (WPL)	
Metall-Schutzgasschweißen (MSG)	
3.1.3 Laserstrahlschweißen	10
3.1.4 Unterpulverschweißen (UP)	13
3.2 Preßschweißverfahren	13
3.2.1 Widerstandspreßschweißen	13
3.2.2 Bolzenschweißen	15
4 Schweißzusätze	18
4.1 Schweißzusätze für austenitische Stähle	18
4.2 Schweißzusätze für ferritisch-austenitische Stähle	18
4.3 Schweißzusätze für ferritische Stähle	18
5 Vorbereiten und Ausführen der Schweißarbeiten	18
5.1 Schweißnahtvorbereitung	18
5.2 Schweißausführung	19
6 Nachbehandlung von Schweißverbindungen	19
6.1 Bürsten	19
6.2 Schleifen und Polieren	19
6.3 Strahlen	20
6.4 Beizen	20
7 Artverschiedene Schweißverbindungen	20
8 Schweißen auf der Baustelle	21
9 Betriebliche Voraussetzungen für das Schweißen nichtrostender Stähle (Herstellerqualifikation)	22
9.1 Gütesicherung der Schweißarbeiten, Anforderungen an die Betriebe	22
9.2 Voraussetzungen für das Schweißen nichtrostender Stähle	23
9.3 Schweißerprüfung für nichtrostende Stähle	23
10 Schrifttum	23
11 Normen und Regelwerke	24

1 Einleitung

„Edelstahl Rostfrei“ ist ein Sammelbegriff für die nichtrostenden Stähle. Diese enthalten nach der Norm DIN EN 10020 mindestens 10,5% Chrom. Höhere Chromgehalte und weitere Legierungsbestandteile, insbesondere Nickel, Molybdän, Titan, Niob und Stickstoff verbessern die Korrosionsbeständigkeit und beeinflussen auch die mechanischen Eigenschaften nachhaltig.

Edelstahl Rostfrei hat in seiner über 100 jährigen Geschichte wegen seiner hohen Korrosionsbeständigkeit, guten mechanischen Eigenschaften und ausgezeichneten Verarbeitbarkeit wesentliche Bedeutung für Industrie und Wirtschaft erlangt.

Weltweit werden jährlich über 48 Millionen Tonnen rostfreier Stähle erzeugt, der überwiegende Teil in Form von Flachprodukten, aber auch als Langprodukte wie Stangen, Drähte

und Rohre sowie als Schmiedestücke und Formguss.

Alle diese Erzeugnisse werden vorwiegend durch Schmelzschweißen, in geringerem Umfang durch Widerstandsschweißen und Löten gefügt.

Von der großen Zahl weltweit genormter Stähle (z.B. DIN EN 10088 in ihren verschiedenen Teilen) werden einige Sorten besonders umfangreich für zahlreiche Anwendungen eingesetzt. Für diese Sorten werden in der vorliegenden Schrift allgemeine Erfahrungen und Empfehlungen zum Schweißen gegeben. Bei speziellen Fragen sind die Hersteller der Stähle und der Schweißzusätze zu weiteren Auskünften bereit.

Die Angaben zu den Grund- und Zusatzwerkstoffen entsprechen den europäischen und den deutschen Normen bzw. Stahl-Eisen-Werkstoffblättern und den DVS-Merkblättern.

2 Grundwerkstoffe

Die vorliegende Schrift behandelt das Schweißen von ausgewählten, häufig verwendeten Stählen aus den Gruppen der austenitischen Chrom-Nickel-(Molybdän)-Stähle, der ferritisch-austenitischen (Duplex-)Stähle und der ferritischen Stähle (Tabelle 1). Diese Stähle unterscheiden sich durch ihre Gehalte der Legierungselemente, die die Austenitphase und die Ferritphase stabilisieren. Das aus der Zusammensetzung resultierende Gefüge mit seinen Phasen ist aus dem Schaeffler-Diagramm ablesbar (Bild 1).

Weitergehende Angaben zu den Grundwerkstoffen enthalten die Broschüren der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei „Edelstahl Rostfrei-Eigenschaften (MB 821)“ und „Die Verarbeitung von Edelstahl Rostfrei (MB 822)“.

Stahlsorte			Wärmeleitfähigkeit bei RT W/(m·K)	elektr. Widerstand bei RT $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	Wärmeausdehnungskoeffizient $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$
Kurzname	Werkstoff-Nr.	Gefüge ^{a)}			
Unlegierter Baustahl		F	50	0,22	12,0
X2CrNi12	1.4003	F	25	0,60	10,4
X6Cr17	1.4016				10,0
X3CrNb17	1.4511				10,0
X2CrTi12	1.4512				10,5
X2CrNiN22-2	1.4062	AF	15	0,70	12,0
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162				13,0
X2CrNiN23-4	1.4362				
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462				
X5CrNi18-10	1.4301	A	15	0,73	16,0
X2CrNi18-9	1.4307				
X6CrNiTi18-10	1.4541				
X2CrNiN18-7	1.4318				
X5CrNiMo17-12-2	1.4401		0,75	16,4	
X2CrNiMo17-12-2	1.4404				
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571		0,75	16,5	
X2CrNiMo18-14-3	1.4435				
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439		14	0,85	15,8
X1CrNiMoCuN20-18-7	1.4547				
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539		12	1,00	14,5
X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529				
X2CrNiMnMoN25-18-6-5	1.4565			0,92	

a) F = Ferrit, A = Austenit, AF = Austenit-Ferrit (Duplex)

Tabelle 1: Auswahl häufig eingesetzter nichtrostender Stähle mit ihren physikalischen Eigenschaften im Vergleich zu einem unlegierten Baustahl

Bei allen Rostfrei-Sorten beruht die Korrosionsbeständigkeit auf der Passivität der Werkstückoberfläche, die sich bei Anwesenheit von Sauerstoff in dem umgebenden Medium (z.B. Luft) ausbildet. Diese Passivschicht ist ein optisch nicht erkennbarer, transparenter, dünner amorpher Film von weniger als 1 µm (etwa 10^{-5} mm) Dicke. Nach Beschädigung der Passivschicht bildet sich diese neu, solange Sauerstoff aus der Umgebung zur Verfügung steht.

Weil das für die Bildung der Passivschicht verantwortliche Chrom auch mit dem in dem Werkstoff vorhandenen Kohlenstoff zu Chromkarbiden reagieren kann, sollte der Kohlenstoffgehalt entweder niedrig gehalten werden (sogenannte LC- oder ELC-Güten) oder durch Elemente abgebunden werden, die im Vergleich zu Chrom eine größere Affinität zu Kohlenstoff aufweisen, wie Titan und Niob. Diese Legierungen werden dann als stabilisiert bezeichnet.

Die hier erfassten Chromstähle haben ein ferritisches Gefüge mit kubisch-raumzentriertem (krz-)Gitter und die Chrom-Nickel-(Molybdän-)Stähle weisen ein austenitisches Gefüge mit kubisch-flächenzentriertem (kfz-)Gitter auf. Ferritisch-austenitische Stähle, wie z.B. der Stahl mit der Werkstoff-Nr. 1.4462, haben ein Mischgefüge aus Ferrit und Austenit. Eine gute Übersicht über die sich durch die chemische Zusammensetzung ergebenden Gefüge bietet das Schaeffler-Diagramm, das A.L. Schaeffler im Jahre 1948 veröffentlicht hat. Ermittelt wurde dieses Diagramm durch Schweißversuche mit Ø 5 mm Stabelektroden (Bild 1).

2.1 Metallkundliche Merkmale der nichtrostenden Stähle in Bezug auf das Schweißen

Die beiden Gefügearten Austenit und Ferrit weisen neben der unterschiedlichen Korrosionsbeständigkeit der Stähle unterschiedliche Festigkeits- und Umformeigenschaften auf, die auch für das Schmelzschweißen der Stähle von Bedeutung sind. Aus der komplexen Zusammensetzung und den sich einstellenden Phasen er-

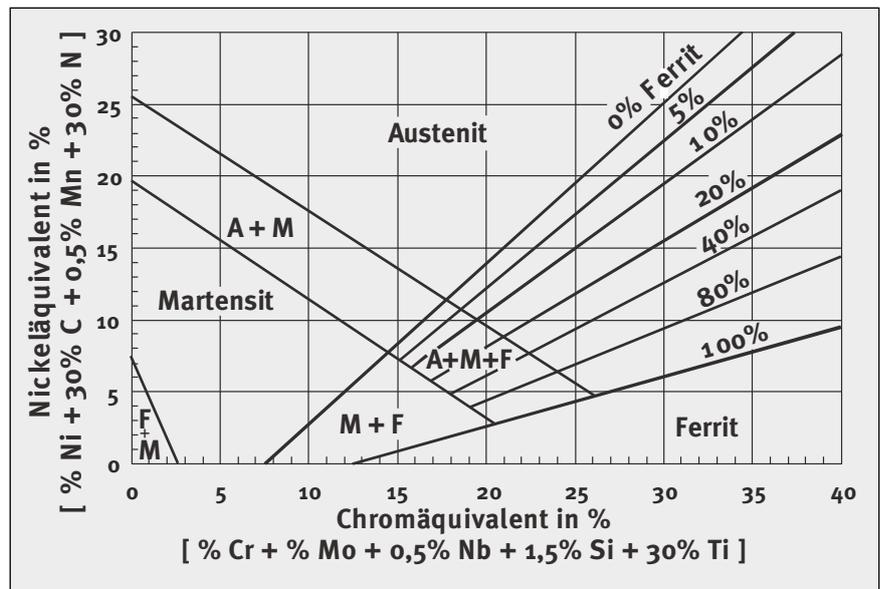


Bild 1: Schaeffler-Diagramm für Verbindungsschweißungen mit den entstehenden Phasen, ermittelt mit E-Handschweißung, Elektroden Durchmesser 5 mm, erweitert auch für andere wichtige Legierungselemente

wachsen beim Schmelzschweißen eine Reihe von Besonderheiten, die im Nachfolgenden besprochen werden.

Je nach den sich einstellenden Phasen und ihren Gehalten muss beim Schweißen der nichtrostenden Stähle mit vier Besonderheiten gerechnet werden, die zu schweißbedingten Schäden oder zumindest zu einer nachhaltigen Verschlechterung der Eigenschaften führen können. Diese

vier Bereiche sind in Bild 2 mit ihren ungefähren Grenzen eingetragen.

Die ferritischen Chromstähle (Bereich 1) neigen bei hohen Temperaturen zu einem verstärkten **Kornwachstum** (Grobkornbildung) und einer hiermit verbundenen Neigung zur Versprödung. Diese Stähle sind ab Wanddicken über 6 mm nur bedingt schweißgeeignet. Die ferritischen Chromstähle, insbesondere die nichtstabilisierten Sorten, haben

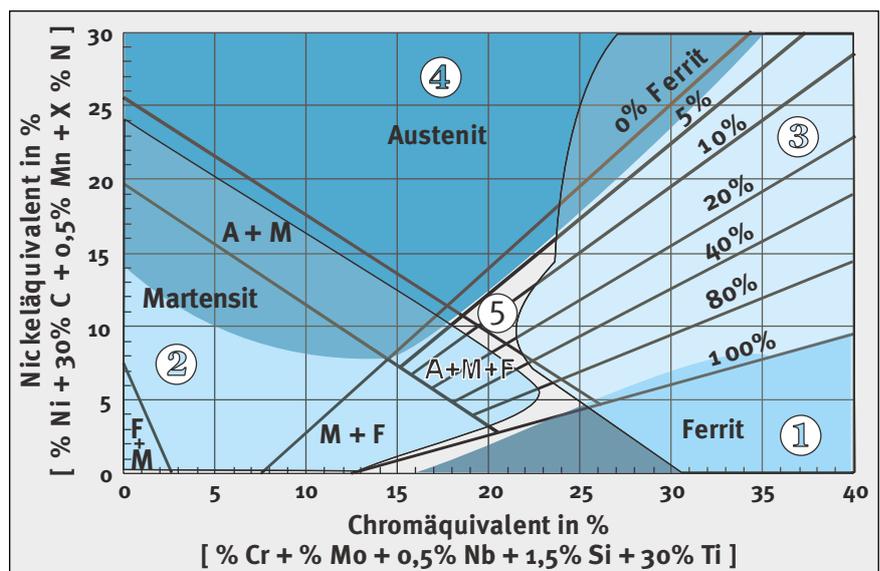


Bild 2: Beim Schweißen gefährdete Bereiche der nichtrostenden Stähle. Es bedeuten ① Gefahr des unkontrollierten Kornwachstums, ② Härterissbildung durch Martensitbildung, ③ Versprödung durch die Bildung von Sigma-Phase (σ -Phase) und ④ Heißrissbildung. Anm.: Die Wertigkeit des Elements Stickstoff variiert und ist für einfache austenitische Stähle zu vernachlässigen, für austenitisch-ferritische Duplexstähle beträgt der Faktor 16 und für voll-austenitische Stähle 30

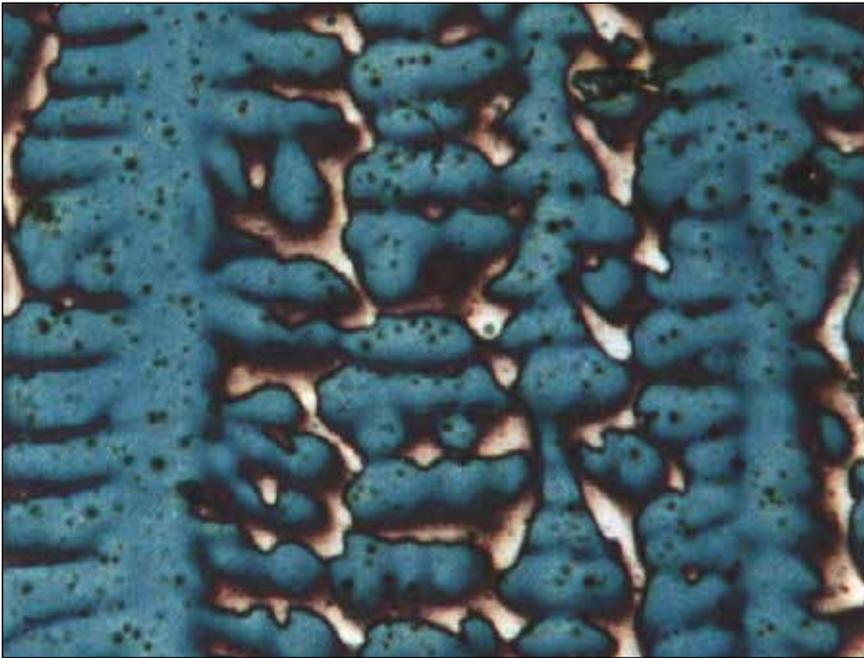


Bild 3: Dendritisch erstarrtes Schweißgut eines austenitischen Stahls mit δ -Ferrit

eine geringere Bruchdehnung und Zähigkeit, die beim Schweißen größere Aufmerksamkeit in Bezug auf Schweißzusatz, -verfahren und Wärmeeinbringung erfordert, um Risse beim Schweißen zu vermeiden.

Die **vollaustenitischen Stähle** (Bereich 4) erstarren austenitisch. Wegen der praktisch nicht vorhandenen Löslichkeit in der kubisch-flächenzentrierten austenitischen Matrix für Spurenelemente, hier ist insbesondere das Element Schwefel zu nennen, reichern sich diese Elemente in der Restschmelze an und senken die Erstarrungstemperatur stark ab. Durch die beim Abkühlen auftretenden Schrumpfspannungen führt dies zur Bildung von Mikrorissen in den noch flüssigen oder teigigen Korngrenzbereichen. Ursache hierfür ist meistens das Nickelsulfid, das bereits bei 645 °C schmilzt.

In dem erstarrten Schweißgut und den benachbarten Körnern der Wärmeeinflusszone weisen die Korngrenzbereiche eine sehr niedrige Schmelztemperatur auf. So kann es bei einer zweiten Schweißraupe in der Wärmeeinflusszone zu Aufschmelzungen der Korngrenzen kommen. Die Entstehungsmechanismen der Erstarrungsrissen und der Wiederaufschmelzungsrissen sind identisch.

Sollen diese heißrisseanfälligen Werkstoffe geschweißt werden, so ist mit

möglichst geringem Wärmeeintrag zu schweißen. Kleine Schweißbäder erstarren schnell, was die Seigerungsneigung begrenzt. Das Schweißen mit Pendelraupen sollte vermieden werden. Weit besser sind Strichraupen geeignet. Auch sind die auftretenden Schrumpfspannungen bei Strichraupen kleiner, so dass die Bildung von Korngrenzentrennungen deutlich geringer ist. Weil aber Schwefel auch in der Umgebung praktisch überall vorhanden ist, muss bei diesen Werkstoffen auf erhöhte Sauberkeit geachtet werden. Hierzu zählt auch, dass die zu verschweißenden Bereiche nach dem Reinigen nicht mehr mit den bloßen Händen berührt werden dürfen.

Zur Vermeidung von Heißrissen genügt häufig eine geringe Änderung in der chemischen Zusammensetzung, so dass die austenitischen Stähle nicht mehr primär austenitisch erstarren, sondern ferritisch. Diese nichtrostenden Stähle werden als metastabil bezeichnet und liegen gemäß ihrer Zusammensetzung im Bereich 5 des Schaeffler-Diagramms (Bild 2).

Das Grundgefüge der meisten austenitischen nichtrostenden Standardstähle ist deshalb im Walz- und Schmiedezustand sowohl bei Raumtemperatur als auch bei hohen Temperaturen nicht vollständig austenitisch. Die chemische Zusammen-

setzung der Stähle ist vielmehr so abgestimmt, dass in der Wärmeeinflusszone und auch im Schweißgut bei der Abkühlung auf Raumtemperatur noch kleine Anteile von Delta-Ferrit vorhanden sind, typische Gehalte liegen bei etwa 5 % (Bild 3). Dies wirkt einer Heißrissbildung entgegen. Diese Stähle liegen im Schaeffler-Diagramm in dem Bereich mit geringen Gehalten an Delta-Ferrit (Bereich 5), was sich in einem geringen Magnetismus dieser Legierungen zeigt. Die Anteile des Delta-Ferrits sind in erster Linie von dem Verhältnis der Ferritbildner Chrom (Cr), Molybdän (Mo), Silizium (Si) und Niob (Nb) zu den Austenitbildnern Nickel (Ni), Kohlenstoff (C), Mangan (Mn) und Stickstoff (N) abhängig und lassen sich mit Hilfe des De-Long-Diagramms näherungsweise bestimmen.

Das De-Long-Diagramm (Bild 4) ist ein Ausschnitt aus dem Schaeffler-Diagramm, das die Wirkung des Stickstoffes auf die Austenitbildung berücksichtigt und für Ferrit-Nummern bis FN 18 angewendet werden kann.

Weil die schweißtechnische Verarbeitung dieser Gruppe der austenitischen Stähle mit Delta-Ferrit so unproblematisch ist, wird für den geregelten bauaufsichtlichen Bereich keine Verfahrensprüfung verlangt, die hingegen für alle anderen nichtrostenden Stähle vorgeschrieben ist.

In den letzten Jahren sind vermehrt **austenitisch-ferritische Duplex-Stähle** (Bereich 3) entwickelt worden, die in Bezug auf ihre Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit den ferritischen nichtrostenden Stählen deutlich überlegen sind. Aber auch gegenüber den austenitischen nichtrostenden Stählen weisen sie einen deutlichen Gewinn an Festigkeit auf, ohne dass ihre Korrosionsbeständigkeit geringer ist. Diese Stähle haben eine Gefügeausbildung, die zwischen 40 und 60 % Ferrit liegt. Zur Abschätzung des Ferritgehaltes genügt das De-Long-Diagramm nicht mehr. Stattdessen bietet das WRC-Diagramm eine Lösung, weil hier Ferritgehalte bis zu 100 % berücksichtigt werden können. Es ermöglicht genauere Angaben der Ferritnummern bis FN 100 und ist damit auch zur Abschätzung

des Ferritgehaltes im Schweißgut von Duplex-Stählen geeignet. Aber auch das WRC-Diagramm liefert nur Anhaltswerte (Bild 5).

Die Gefügeausbildung der austenitisch-ferritischen Duplex-Stähle entsteht nach dem Erstarren erst bei der weiteren Abkühlung (Bild 6). Die Primärerstarrung ist vollständig ferritisch, was die Beständigkeit gegenüber einer Heißrissbildung begründet. Erst bei der weiteren Abkühlung scheidet sich aus dem Ferrit die Austenitphase als Gleichgewichtsphase aus. Hatten die ersten Duplex-Stähle das große Problem, dass nach dem Schweißen eine Versprödung durch einen deutlichen Mangel an Austenit auftrat, konnte diese Besonderheit durch die Zugabe des Austenitbildners Stickstoff eliminiert werden. Die Verschiebung der Austenitbildung zu höheren Temperaturen ist durch den grauen Bereich in Bild 6 verdeutlicht.

Duplex-Stähle sind grundsätzlich gut schweißgeeignet. Im Schrifttum finden sich Hinweise, dass die eingebrachte Wärmemenge weder zu groß noch zu klein sein soll.

Bei der Erstarrung und auch bei hohen Temperaturen liegen die Duplex-Stähle vollständig ferritisch vor. Während der Abkühlung auf Raumtemperatur wandelt sich ein Teil dieses Ferrits durch Diffusion zu Austenit um. Weil für eine erfolgreiche Diffusion Zeit und Temperatur benötigt werden, sollte der Abkühlprozess nicht zu rasch erfolgen.

Untersuchungen haben aber ergeben, dass bei ausreichend hohen Gehalten an Nickel und Stickstoff, diese Werkstoffe auch mit dem Laserstrahl ohne Zusatzwerkstoff erfolgreich geschweißt werden können, ohne dass eine signifikante Versprödung, wie sie für einen erhöhten Ferritgehalt typisch wäre, auftritt.

Wird zu langsam abgekühlt, oder sind die Verweilzeiten der Duplex-Stähle im Temperaturbereich um die 800 °C deutlich zu lang, so können sich beim Abkühlen intermetallische Phasen ausscheiden. Hier sind insbesondere die Sigma-Phase (σ -Phase) aber auch die Chi-Phase (χ -Phase) zu nennen. Die Ausscheidungskine-

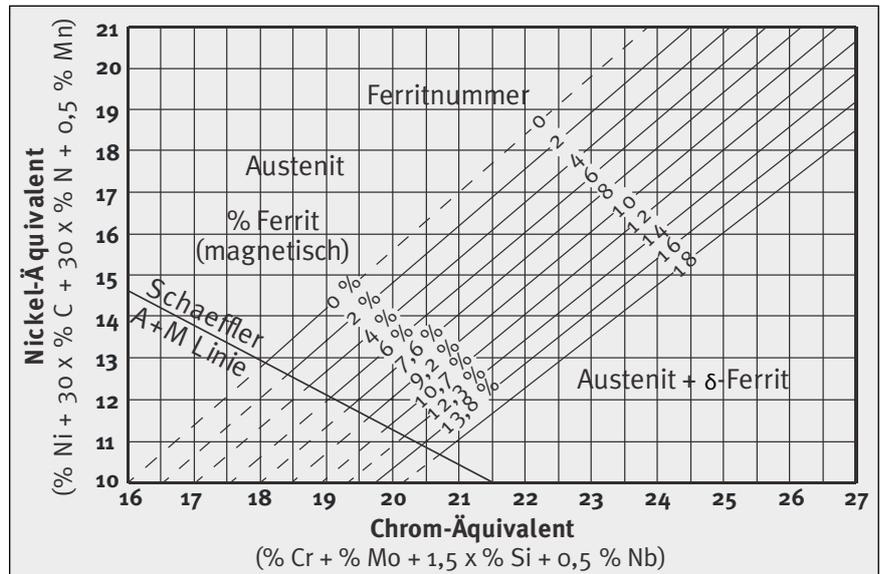


Bild 4: De-Long-Diagramm zur Bestimmung der Ferritnummer (Ferritzahl) in nicht-trosendem austenitischem Schweißgut als Ausschnitt des Schaeffler-Diagramms

tik verdeutlicht das Zeit-Temperatur-Ausscheidungsdiagramm (Bild 7).

Bildet sich auch nur 1 % Sigma-Phase, halbiert sich die Kerbschlagarbeit, d.h. der Werkstoff versprödet deutlich. Duplex-Stähle mit einem abgesenkten Gehalt an Molybdän, sogenannte Lean-Duplex-Stähle weisen zwar eine etwas verminderte Korrosionsbeständigkeit auf, dafür ist aber die Neigung zur Bildung versprödend wirkender Phasen stark abgesenkt. Eine zusätzliche Problematik, die insbesondere den Langzeit-Einsatz bei höheren Temperaturen betrifft, ist die Entmischung der Ferritphase in eine chromarme α -Phase und eine chromreiche α' -Phase. Dieses Phänomen ist unter dem Begriff 475°-Versprödung bekannt. Dieses Phänomen begrenzt die maximalen Einsatztempe-

raturen für längere Zeiten nach ASTM auf 315 °C und nach AD-Regelwerk, je nach Legierung auf Temperaturen zwischen 250 und 300 °C. Beim Schweißen muss aber wegen der kurzen Verweilzeiten nicht mit dieser Phasentrennung gerechnet werden.

Die Verbindung von austenitischen Stählen mit Baustählen, genannt Schwarz-Weiß-Verbindungen, ist wegen der möglichen Bildung von Martensit problematisch (Bereich 2). Wird aber ein Zusatzwerkstoff verwendet, der in der Lage ist, zusammen mit den zu schweißenden Grundwerkstoffen ein austenitisches Schweißgut mit nur einem geringen Anteil an Ferrit zu erzeugen, so sind solche Verbindungen sicher herzustellen. Nähere Erläuterungen hierzu sind Abschnitt 7 zu entnehmen. Hier

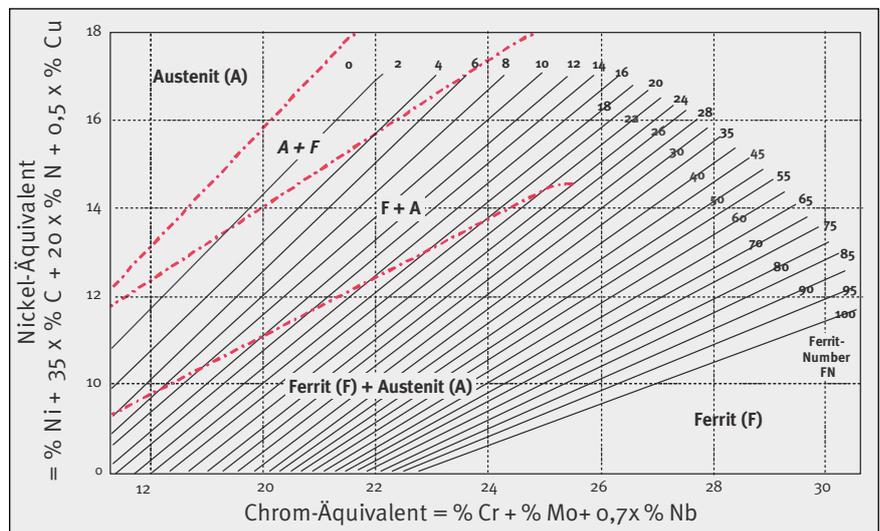


Bild 5: WRC-Diagramm zur Ermittlung der Ferritgehalte bei höheren Ferritnummern FN

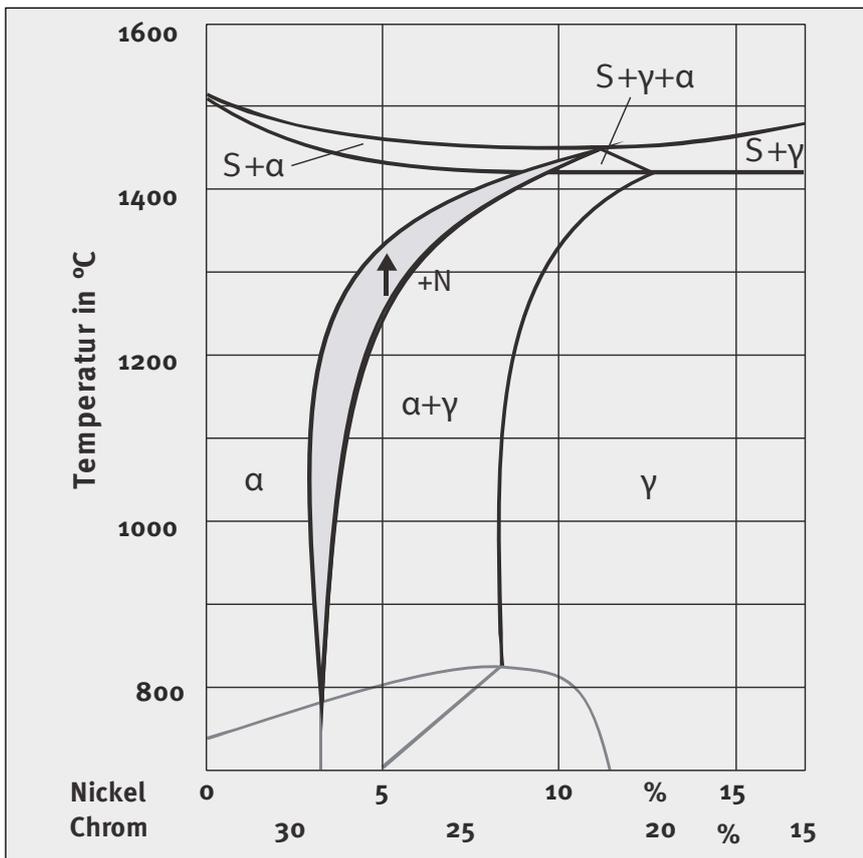


Bild 6: Quasibinärer Schnitt durch das System Eisen-Nickel-Chrom bei einem Eisen-gehalt von etwa 77,5%. Deutlich ist die Verschiebung der Austenitbildung zu höheren Temperaturen durch die Zugabe von Stickstoff zu erkennen (graue Fläche)

wird auch an einem Beispiel die Auswahl eines geeigneten Zusatzwerkstoffs erläutert.

2.2 Korrosionseigenschaften

In passivem Zustand sind die nichtrostenden Stähle gegen zahlreiche aggressive Medien beständig und

bedürfen keines weiteren Oberflächenschutzes. Es ist aber wichtig, dass die Passivschicht nicht defekt ist. Ein typischer Defekt sind die durch das Schweißen verursachten Anlauffarben und/oder Zunder im Bereich der Wärmeeinflusszonen der Schweißnaht. Vom Hersteller werden die Erzeugnisse (Bänder, Bleche, Stangen, Rohre u.a.) in der Regel

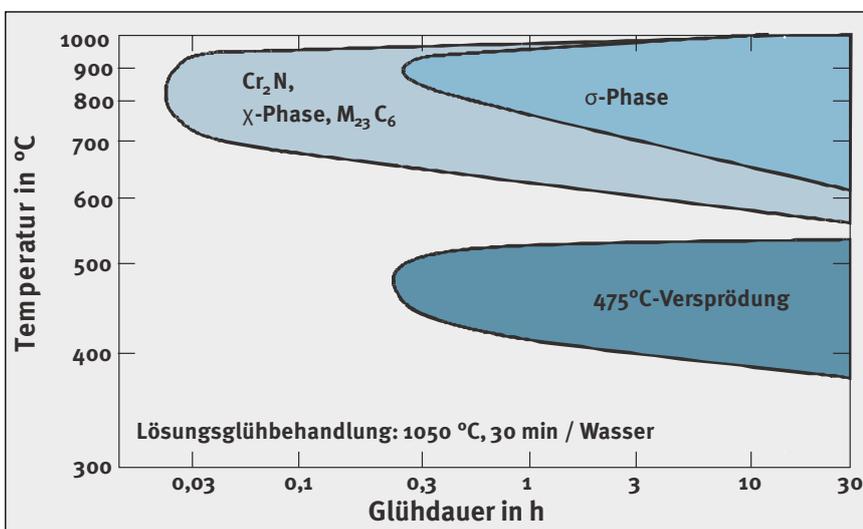


Bild 7: Zeit-Temperatur-Ausscheidungsdiagramm für den austenitisch-ferritischen Duplex-Stahl X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462)

mit passivierter Oberfläche geliefert. Häufig werden die blanken Bleche aber auch mit Folie oder Abziehlack gegen Beschädigung geschützt. Es muss beachtet werden, dass sich unter diesen Abdeckungen keine Passivschicht ausbilden kann.

Eine Möglichkeit zur Abschätzung der Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle ist die Wirksumme, im angelsächsischen Sprachraum PREN (pitting resistance equivalent number) genannt. Diese Kennzahl berechnet sich zu:

$$\text{Wirksumme (WS)} = \%Cr + 3,3 \cdot (\%Mo + 0,5 \cdot \%W) + (0 - 30) \cdot \%N$$

Bei den einfachen austenitischen nichtrostenden Stählen mit kleinen Gehalten an δ -Ferrit wird Stickstoff nicht berücksichtigt, bei den austenitisch-ferritischen Duplex-Stählen beträgt der Faktor für Stickstoff 16 und für die sehr hoch Nickel-legierten Stähle wird Stickstoff mit dem Faktor 30 eingerechnet.

Wichtige Korrosionsarten:

Flächenkorrosion ist durch einen gleichmäßigen oder annähernd gleichmäßigen Werkstoffabtrag gekennzeichnet. In der Regel wird eine Abtragung unter 0,1 mm/Jahr als ausreichende Beständigkeit gegen Flächenkorrosion zugelassen. Wenn anstelle der Abtragungsrates die Massenverlustrate pro Flächeneinheit als Maßgröße benutzt wird, so gilt bei nichtrostendem Stahl für die Umrechnung die Beziehung $1 \text{ g/h} \cdot \text{m}^2 = 1,1 \text{ mm/a}$. Ungleichmäßige Flächenkorrosion wird als Muldenkorrosion bezeichnet.

Für die Beständigkeit nichtrostender Stähle gegen Flächenkorrosion gibt es zahlreiche Beständigkeitstabellen und -diagramme. Gleichmäßige Flächenkorrosion kann bei nichtrostenden Stählen in Säuren und starken Laugen auftreten; sie wird von der Stahlzusammensetzung wesentlich mitbestimmt. Die 13%-Chromstähle liegen an der unteren Grenze, die 17%-Chromstähle sind wesentlich beständiger. Eine noch höhere Beständigkeit gegen Flächenkorrosion zeigen die austenitischen Cr-Ni-Stähle. Molybdän verbessert die Bestän-

digkeit gegen chloridhaltige Medien und nichtoxidierende Säuren. Auch der Oberflächenzustand spielt eine Rolle: glattere Oberflächen ergeben im Allgemeinen eine bessere Korrosionsbeständigkeit.

Gegen **interkristalline Korrosion** sind die austenitischen Stähle mit einem niedrigen C-Gehalt ($\leq 0,03\%$ C) ohne Wärmenachbehandlung auch bei größeren Wanddicken ($>6\text{ mm}$) sicher, sogenannte LC-Güten (low carbon). Alternativ können auch die mit Titan oder Niob stabilisierten Stähle verwendet werden. LC-Güten oder stabilisierte Stähle sollten deshalb für geschweißte Bauteile bevorzugt werden. Nichtrostende Stähle mit C-Gehalten $>0,03\%$ können bei Wanddicken oberhalb 6 mm – abhängig von der Korrosionsbeanspruchung – ohne Wärmenachbehandlung durch die Bildung chromreicher Karbide entlang der Korngrenzen interkristalline Korrosion zeigen, bevorzugt im Bereich der Wärmeinflusszone von Schweißnähten. Dabei tritt durch das Ausscheiden von Chromkarbiden an den Korngrenzen eine starke Chromverarmung ein, wodurch die Bereiche unter den Mindestgehalt von $10,5\%$ Chrom absinken können, was zu Kornzerfall führen kann. Hierbei ist wichtig, dass auch durch die Zusatz- und Hilfsstoffe, wie z.B. die Schutzgase, kein Kohlenstoff z.B. durch Kohlendioxid CO_2 in die Schweißnaht eingebracht wird (**Bild 8**).

Lochkorrosion (Pitting corrosion) kann eintreten, wenn die Passivschicht örtlich beschädigt wird; an diesen Stellen können Grübchen oder Löcher entstehen, wenn Chloridionen (oder andere Halogenionen), besonders bei erhöhten Temperaturen, die Oberfläche angreifen. Auch Ablagerungen auf der Oberfläche, z.B. Fremdstoffe, Schlackenreste, Anlauffarben, können zu Lochkorrosion führen.

Spaltkorrosion kann eintreten, wenn sich in Spalten ein Korrosionsmedium anreichert. Es tritt hier ein Abbau der Passivschicht ein, so dass eine aktive Metallauflösung erfolgt. Unter aggressiven Bedingungen sind mit Molybdän legierte nichtrostende Stähle besser beständig. Enge Spalte sollten nach Möglichkeit konstruktiv vermieden werden.

Bimetallkorrosion (früher als Kontaktkorrosion bezeichnet) ist eine Korrosionsart, die auftreten kann, wenn sich zwei unterschiedliche metallische Werkstoffe in Anwesenheit eines flüssigen Mediums, das als Elektrolyt wirkt, in Kontakt befinden. Wenn eine Hemmung für den Verbrauch der freigesetzten Elektronen auf dem unedlen Material vorliegt, kann der elektrisch leitende Kontakt mit einem deutlich edleren Material den Materialverlust beschleunigen: der weniger edle Werkstoff (Anode) wird an der Kontaktstelle angegrif-

fen und geht in Lösung. Der edlere Werkstoff (Kathode) wird nicht angegriffen. In der Praxis, besonders im Stahlbau, sind die nichtrostenden Stähle die edleren Werkstoffe gegenüber vielen anderen metallischen Werkstoffen wie unlegierten und niedrig legierten Stählen und Aluminium. Bimetallkorrosion ist besonders dann kritisch, wenn die Oberfläche des edleren Werkstoffes groß ist im Verhältnis zur Oberfläche des weniger edlen Werkstoffes. Die Höhe des Potentialunterschieds spielt praktisch für die Korrosionsgeschwindigkeit keine Rolle. Aber bei größerem Potentialunterschied zwischen den beiden Werkstoffen, steigt das Risiko für die Entstehung von Bimetallkorrosion. Schäden lassen sich vermeiden, indem die beiden Werkstoffe gegeneinander isoliert werden. Bei deutlichen Größenunterschieden der Werkstückoberflächen der Paarung muss die kleinere Fläche aus dem edleren Werkstoff, die größere Fläche aus dem weniger edlen Werkstoff bestehen. Typisches Beispiel: Edelstahl Rostfrei-Schrauben an Aluminium-Fassaden vermeiden Kontaktkorrosion.

Spannungsrissskorrosion ist eine Korrosionsart, die im Bauwesen kaum auftritt. Bei Spannungsrissskorrosion entstehen transkristalline Risse bevorzugt bei austenitischen Stählen, selten bei ferritischen Stählen, wenn chloridhaltige Medien bei erhöhten Temperaturen unter Zugspannung auf den Werkstoff einwirken. Austenitische Stähle mit höheren Nickelgehalten und ferritisch-austenitische Stähle sind weniger empfindlich gegen Spannungsrissskorrosion als austenitische Stähle mit 8 bis 12% Nickel (Ni).

Schwingungsrissskorrosion ist eine Sonderform der Spannungsrissskorrosion bei Beanspruchung mit zeitlich wechselnden Lasten (Schwingfestigkeit). Korrosionsmedien können die Schwingfestigkeit herabsetzen. Die höher legierten nichtrostenden Stähle (z.B. mit Molybdän) sind besser beständig gegen Schwingungsrissskorrosion als die Standardgüten.

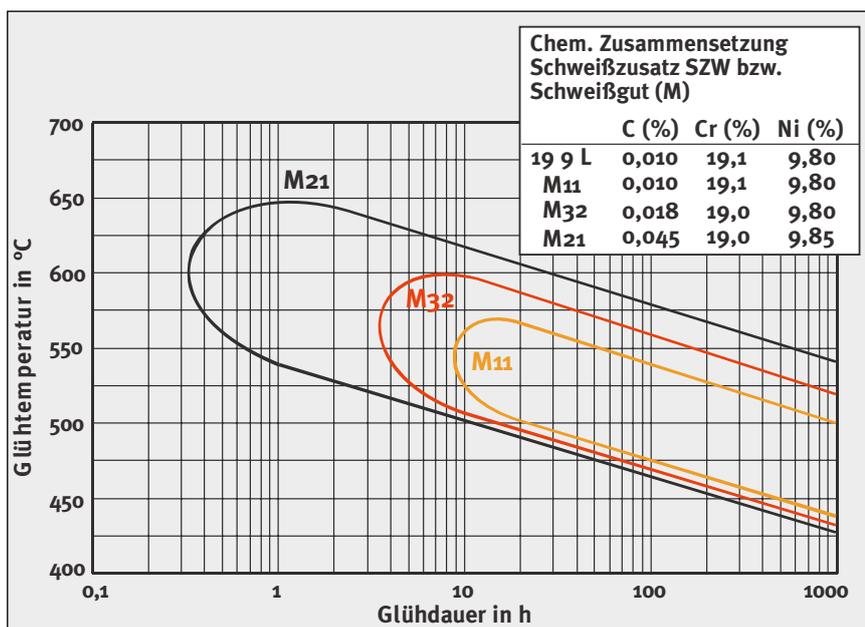


Bild 8: Sensibilisierung von Schweißgütern für interkristalline Korrosion durch Anreicherung von Kohlenstoff im Schweißgut durch CO_2 -reiche Schutzgase

2.3 Einteilung nach Korrosionsbeständigkeitsklassen

Für die Auswahl einer für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Werkstoffsorte spielt die Beständigkeit gegen Korrosion eine wichtige Rolle. Hier gibt die Norm DIN EN 1993-1-4 im Anhang A wichtige Hinweise. Streng genommen gilt diese Norm nur für das Bauwesen, dennoch können auch für andere Einsatzbereiche wertvolle Hinweise entnommen werden.

In dieser Norm wird eine Summenbildung aus den beiden Risikofaktoren „Exposition gegenüber Chloriden aus Salzwasser oder Auftausalzen (Streusalz)“ und „Exposition gegenüber Schwefeldioxid“ gebildet. In der Regel kann die hieraus gebildete Klasse durch ein „Reinigungskonzept oder die Exposition gegenüber Abwaschen durch Regen“ abgemindert werden. Diese Einteilungen gelten nicht nur für die Grundwerkstoffe, sondern auch für die Schweißnähte, wenn sie ordnungsgemäß nachbehandelt wurden.

Diese Norm enthält folgerichtig auch eine umfangreiche Tabelle, in denen nichtrostende Stähle (für das Bauwesen) den Korrosionsbeständigkeitsklassen CRC I bis CRC V zugeordnet werden.

3 Schweißprozesse

Mit wenigen Einschränkungen können die austenitischen und ferritischen nichtrostenden Stähle mit denselben Schmelz- und Pressschweißverfahren (ausgenommen Gasschmelzschweißen) und Schweißanlagen gefügt werden, die für un- und niedriglegierte Stähle üblich sind. Folgende Schweißprozesse werden vorwiegend angewendet:

Schmelzschweißprozesse:

- Lichtbogenhandschweißen (E)
- Schutzgasschweißen:
 - Wolfram-Schutzgasschweißen (WSG),
 - Metall-Schutzgasschweißen (MSG),
 - Plasma-Lichtbogenschweißen (WPL).

- Strahlschweißen:
 - Laserstrahlschweißen,
 - Elektronenstrahlschweißen.
- Unterpulverschweißen (UP).

Preßschweißprozesse:

- Widerstandspreßschweißen (Punkt-, Rollennaht- und Abbrennstumpfschweißen),
- Bolzenschweißen.

3.1 Schmelzschweißen

3.1.1 Lichtbogenhandschweißen mit umhüllter Stabelektrode

Bild 9 zeigt schematisch das Lichtbogenhandschweißen. Das Lichtbogenhandschweißen besitzt heutzutage keinen sehr großen Stellenwert mehr in der Fertigung, obwohl einige verfahrenstypische Vorteile auch beim Schweißen nichtrostender Stähle vorhanden sind:

- einfache Handhabung,
- geringer Geräteaufwand,
- universell in der Werkstatt und auf der Baustelle einsetzbar,
- breites Angebot an Spezialelektroden für unterschiedliche Anwendungsfälle,
- auch für Zwangspositionen sicher einsetzbar,
- niedriges Wärmeeinbringen (wichtig für vollaustenitische Stähle).

Schweißverhalten und Nahtaussehen werden maßgeblich von der Umhüllung bestimmt. Für die nichtrostenden Stähle werden rutilum-

hüllte und basische Stabelektroden verwendet.

Rutilumhüllte Elektroden haben einen feintropfigen Werkstoffübergang und führen zu feinschuppigen, glatten und flachen Nähten. Sie sind sowohl an Gleichstrom als auch an Wechselstrom verschweißbar. Die Schlacke lässt sich leicht entfernen, zum Teil ist sie selbstablösend. Wegen der besseren Schweißeigenschaften werden wesentlich mehr rutilumhüllte Stabelektroden verarbeitet als die nachfolgend beschriebenen mit basischer Umhüllung. Für das Schweißen von austenitisch-ferritischen Stählen wird empfohlen, auch rutilumhüllte Stabelektroden vorzutrocknen, da die hochfesten Werkstoffe dieser Legierungsgruppe anfällig für wasserstoffunterstützte Rissbildung sind.

Basisch umhüllte Elektroden sind ausschließlich mit Gleichstrom (Elektrode am Pluspol) verschweißbar. Wegen des größeren Tropfenüberganges lassen sie sich gut in Zwangspositionen schweißen. Aufgrund ihrer guten Spaltüberbrückbarkeit werden sie häufig für Wurzelnähte eingesetzt. Im Vergleich zu den rutilumhüllten Stabelektroden ist hier die Naht grobschuppiger und die Schlacke vergleichsweise schlechter zu entfernen. Generell sind diese Elektroden nach Vorgabe der Hersteller rückzutrocknen. Die Verschweißung der rückgetrockneten Elektroden sollte aus einem Warmhalteköcher erfolgen.

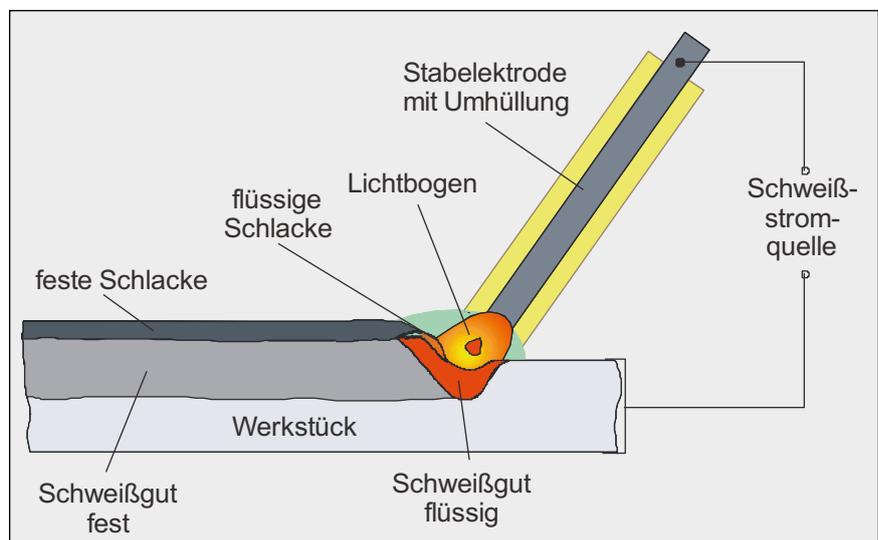


Bild 9: Schweißen mit umhüllten Stabelektroden

Bei beiden Hüllentypen ist mit möglichst kurzem Lichtbogen zu arbeiten.

Wegen des höheren elektrischen Widerstandes des hochlegierten Kernstabes müssen diese Stabelektroden mit niedrigerer Stromstärke verschweißt werden als Baustahlelektroden.

Feuchtigkeit in der Elektrodenumhüllung kann Schweißverhalten und Schlackenabgang verschlechtern sowie zu offenen Poren und bei empfindlichen Stählen (z.B. Feinkornstähle, ferritische nichtrostende Stähle) zu Kaltrissen führen. Basisch umhüllte hochlegierte Stabelektroden sind weniger porenempfindlich als rutilumhüllte. Für Transport, Lagerung und Rücktrocknung umhüllter Stabelektroden gibt das Merkblatt DVS 0957 Hinweise. Die Norm DIN EN ISO 3581 enthält die Stabelektroden für den Gebrauch mit nichtrostenden Stählen.

Die Schweißzusätze, auch die umhüllten Stabelektroden werden in Europa nach dem folgenden Schema benannt:

ISO 3581-A – E 19 12 2 R 3 4

Hierin folgt der Norm-Nummer der Geltungsbereich, „A“ steht für Europa, das Kurzzeichen „E“ bezeichnet den Schweißprozess mit umhüllten Stabelektroden, die chemische Zusammensetzung wird durch Zahlen in immer gleicher Reihenfolge angegeben: „19“ für Chrom, „12“ für Nickel und „2“ für Molybdän; es bezieht sich auf das reine Schweißgut. „R“ bezeichnet den rutil-sauren Umhüllungstyp. Dieser Teil ist verbindlich und kann ergänzt werden durch „3“ für die Stromart (hier Gleich- und Wechselstrom) und die Ausbringung und „4“ steht für die möglichen Schweißpositionen. Eine Angabe des Schweißgutes mit der Werkstoff-Nummer ist nicht mehr vorgesehen.

Das Schweißen mit Stabelektroden ist sowohl im Freien als auch in der Halle möglich. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens ist nicht sehr hoch, bietet aber eine große Schweißsicherheit. Auch wenn die austenitischen Werkstoffe nicht empfindlich

gegen Wasserstoffversprödung sind, sollten die Elektroden rückgetrocknet werden. Dies gilt auch für die rutilumhüllten Elektroden. Hinweise sind den Elektrodenpackungen zu entnehmen.

3.1.2 Schutzgasschweißen

Bei den Schutzgasschweißverfahren brennt der Lichtbogen unter einer Glocke aus inertem oder aktivem Schutzgas, der die Umgebungsluft von Lichtbogen und Schweißbad fernhält. Zu den Wolfram-Schutzgasschweißverfahren (WSG) gehören die Verfahren WIG (Prozess 141) und WPL (Prozess 15).

Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)

Das WIG-Schweißen (Bild 10) ist im Merkblatt DVS 0920 beschrieben. Als Schutzgas dient Schweißargon (DIN EN ISO 14175), für die austenitischen Stähle können bei maschinellen Verfahren zum Erhöhen der Schweißgeschwindigkeit auch handelsübliche Argon-Wasserstoff-Mischgase (R 2 nach DIN EN ISO 14175) verwendet werden. Geschweißt wird mit Gleichstrom, die nicht abschmelzende Wolframelektrode ist mit dem Minuspol verbunden. Das WIG-Schweißen eignet sich für alle Schweißpositionen und besonders gut für dünne Bleche und Wurzellagen. Bis zu Blechdicken von ca. 3 mm können die austenitischen Stähle mit den Werkstoff-Nrn. 1.4301, 1.4307, 1.4541, 1.4401, 1.4404 und 1.4571 auch ohne Schweißzusatz verbunden werden (Prozess 142). Für die Stähle mit den Werkstoff-Nrn. 1.4435, 1.4439, 1.4539 und 1.4462 wird die

Verbindung vorwiegend mit Schweißzusatz ausgeführt. Die Wolframelektroden sind in DIN EN ISO 6848 enthalten, die Schweißstäbe für den Zusatzwerkstoff sind in DIN EN ISO 14343 genormt. Auch hier wieder ein Beispiel:

ISO 14343-A – W 20 10 3

Der Normen-Nummer und dem Kurzzeichen für Europa „A“, folgt das Zeichen für den Schweißprozess, hier „W“ für Wolfram-Inertgasschweißen, hieran schließt sich die Zusammensetzung des Drahtes mit den Elementen Chrom (hier 20 %), Nickel (hier 10 %) und Molybdän (hier 3 %) an. Weitere Elemente wie ein geringer Kohlenstoffgehalt (L) oder Silizium (Si) können folgen, aber ohne Mengenangabe.

Plasmalichtbogenschweißen (WPL)

Das Plasmalichtbogenschweißen (Bild 11) ist mit dem WIG-Verfahren eng verwandt. Durch die scharfe Bündelung des Lichtbogens wird eine wesentlich höhere Energiedichte erreicht.

Als Plasmagas dient Schweißargon, dem beim Schweißen von Austeniten geringe Anteile von Wasserstoff zugemischt werden können. Für das äußere Schutzgas werden meist Argon-Wasserstoff-Gemische verwendet. Das Plasmaschweißen wird überwiegend als mechanisiertes Verfahren eingesetzt:

- Mikroplasmaschweißen für den Dickenbereich bis 1 mm,
- Stichlochschiessen: Blechdicken

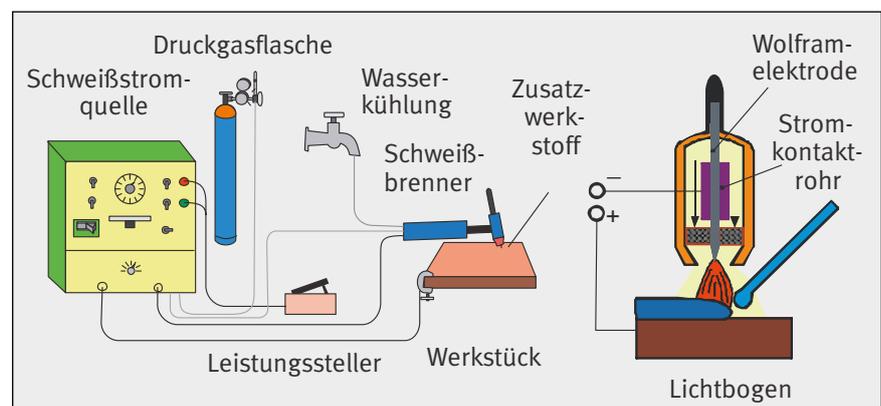


Bild 10: Schweißarbeitsplatz zum WIG-Schweißen: Werkstück, Lichtbogen, Schweißnaht, Zusatzwerkstoff, Gasdüse, Schutzgas, Kontaktrohr, Wolframelektrode, Stromquelle

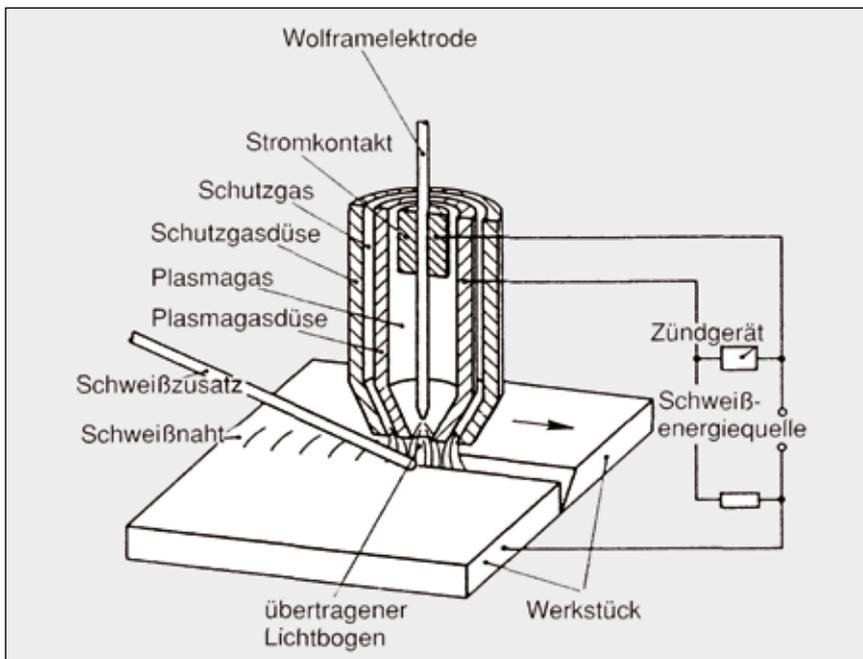


Bild 11: Plasmalichtbogenschweißen

bis ca. 10 mm können als I-Stoß durchgeschweißt werden (Tabelle 2). Für größere Blechdicken wird eine Y-Naht mit einer Steghöhe von ca. 5 mm gewählt. Der verbleibende Querschnitt wird nach anderen Verfahren gefüllt.

Meist wird ohne Schweißzusatz gearbeitet, Spaltbreiten $>0,08 \times$ Blechdicke erfordern Schweißzusatz. Vorteile des Plasmaschweißens sind:

- hohe Schweißgeschwindigkeit,
- schmale Raupe und schmale Wärmeeinflußzone (WEZ),
- geringe Wärmeeinbringung,
- geringer Verzug.

Von Nachteil sind:

- aufwendigere Schweißanlage im

Vergleich zu WIG,

- genaue Nahtvorbereitung erforderlich,
- Spannvorrichtungen und Fahrwerk erforderlich.

Metall-Schutzgasschweißen (MSG) (Prozess 13)

Bei nichtrostenden Stählen wird fast ausschließlich das Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG) eingesetzt mit einem argonreichen Mischgas, das einen geringen Anteil an Sauerstoff oder Kohlendioxid enthält. Der Schweißstrom wird der abschmelzenden Drahtelektrode im Schweißbrenner durch schleifenden Kontakt in einem Stromkontakrohr aus Kupfer zugeführt (Bild 12) zugeführt. Im Vergleich zum WIG-Schweißen lassen sich hohe Abschmelzleistungen erzielen. Verwendet werden sowohl

Blechdicke mm	Schweißstromstärke A	Düsendurchmesser mm	Plasmagas l/min	Schutzgas l/min	Schweißgeschwindigkeit cm/min
Mikroplasmaweldschweißen von Hand					
0,1	2,5	0,8	0,2	5,0	2
0,5	18,0	1,0	0,3	7,0	25
1,0	40,0	1,2	0,3	7,0	25
Mechanisches Plasma-Stichlochschiessen					
2,5	180	2,8	2,4	15,0	50
5,0	230	3,2	2,5	20,0	45
10,0	340	4,0	4,0	20,0	22

Tabelle 2: Richtwerte für I-Nähte (ohne Spalt) zwischen austenitischen Stählen in w-Position

Massiv- als auch Fülldrahtelektroden. Die Drahtdurchmesser liegen meist zwischen 0,8 bis 1,6 mm. Geschweißt wird mit Gleichstrom, Drahtelektrode am Pluspol.

Für **Massivdrahtelektroden (Prozess 135)** wird als Schutzgas üblicherweise Argon mit 1 bis 3 % Sauerstoff oder mit max. 2,5 % CO₂ verwendet. Höhere CO₂-Gehalte können zu einer Aufkohlung des Schweißgutes führen und vermindern die Beständigkeit gegenüber interkristalliner Korrosion (Bild 8). Die Drahtelektroden können je nach Anwendungsfall im Sprüh-, Kurz- und Impulslichtbogen verschweißt werden.

In Wannen- und Horizontalposition wird in der Regel mit dem **Sprühlichtbogen** gearbeitet, der bei geringer Spritzerneigung einen kurzschlußfreien, feinstropfigen Werkstoffübergang ergibt. Der **Kurzlichtbogen** wird angewendet, wenn eine geringe Wärmeeinbringung gefordert ist, z.B. für dünne Bleche, Wurzellagen und in Zwangspositionen. Von Nachteil sind Spritzerneigung (festhaftend) und eine überhöhte Raupe. Mit dem **Impulslichtbogen** ist die Wärmeeinbringung ebenfalls verringert; so lassen sich sowohl dünne Bleche als auch größere Wanddicken (diese auch in Zwangsposition) vorteilhaft fügen.

Fülldrahtelektroden (Prozess 136 und 138) sind mit jedem üblichen MSG-Gerät verschweißbar; dabei kann dieselbe Vorschubeinheit benutzt werden wie für Massivdraht. Es besteht sehr geringe Spritzerneigung, die Raupen fließen flach und kerbfrei an und ihre Oberfläche ist glatt und nur leicht geschuppt. Die besonderen Eigenschaften der üblichen Fülldraht-Typen sind in Tabelle 3 gegenübergestellt.

Bei der Drahtvorschubeinheit ist die Druckbelastung des Fülldrahtes wegen der Gefahr der Deformation gering zu halten, weshalb mindestens ein 4-Rollenantrieb eingesetzt werden muss. Die Fülldrähte für nichtrostende Stähle sind in DIN EN ISO 17633 enthalten. Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Fülldrahttypen, die **Metallpulverfülldrähte** (Prozess 138), die **schlackebildenden Fülldrähte** (Prozess 136), entweder mit basischer

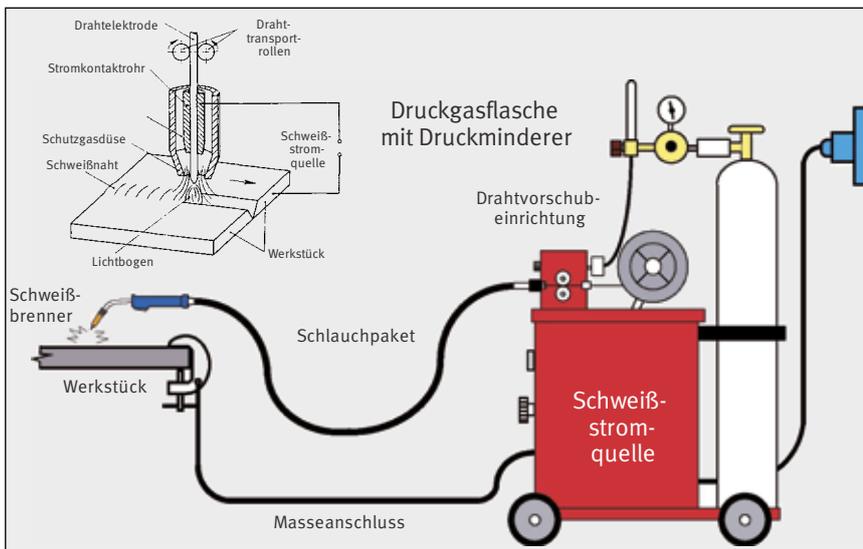


Bild 12: Schweißarbeitsplatz zum MSG-Schweißen

	Typ der Fülldrahtelektrode	
	schlackenlos	schlackebildend
Stahlmantel	un- oder niedriglegiert	Cr-Ni-(Mo-)Stahl
Füllung	Metallpulver	Metallpulver + Schlackenbildner
Lichtbogen	Sprüh-, Kurz- und Impulslichtbogen	Sprüh- und Kurzlichtbogen, nicht für Impulslichtbogen
Schutzgas	Argon + 1 bis 3% O ₂ Argon + max. 2,5% CO ₂	Argon + O ₂ Argon + CO ₂
Schweißtechnische Eigenschaften	hohe Abschmelzleistung und tiefer Einbrand keine Schlacke, daher zum vollmechanisierten Mehrlagenschweißen gut geeignet	geringer Einbrand und weicher Lichtbogen leicht abhebende Schlacke

Tabelle 3: Eigenschaften üblicher Fülldrahttypen

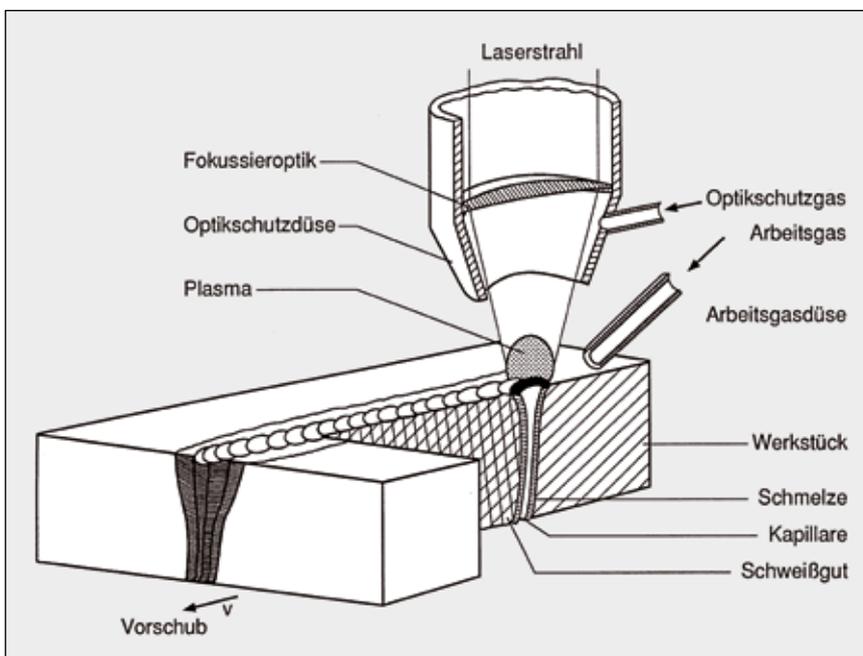


Bild 13: Laserstrahlschweißen

Schlacke oder rutilhaltige Schlacke, wobei letztere noch einmal in langsam oder schnell erstarrend unterteilt werden. Die dritte Art stellen **selbstschützende Fülldrähte** dar, die kein Schutzgas benötigen, um eine saubere Naht herzustellen (Prozess 114).

Beispiele für das MAG Schweißen:

ISO 14343-A-G 19 12 3 L Si
ISO 17633-A-T 19 12 3 LR M21 3

mit S = Massivdraht und T = Fülldraht, der chemischen Zusammensetzung mit wenig Kohlenstoff, dem Pulvertyp R, dem Schutzgas M21 und der Schweißposition 3.

3.1.3 Laserstrahlschweißen

Neben den konventionellen Schweißverfahren hat sich das Laserstrahlschweißen als leicht automatisierbares Fügeverfahren etabliert. Nach DIN ISO 857-1 wird das Laserstrahlschweißen den Schmelzschweißverfahren zugeordnet. Durch fokussierte Laserstrahlung wird das Metall lokal eng begrenzt aufgeschmolzen und durch Erzeugung einer Dampfkapillare (Key-hole) ein Tiefschweißeffekt erzeugt (Bild 13). Die erzielten Schweißnähte sind daher wesentlich schlanker als vergleichbare Schweißnähte der konventionellen Schweißverfahren. Durch die Anwendung von Hochleistungslasern im Multikilowatt-Bereich können so Blechdicken bis zu 15 mm und mehr verschweißt werden.

Aufgrund der lokal begrenzten Wärmeeinbringung und der schnellen Wärmeabfuhr aus der Schweißnaht ergeben sich spezifische Eigenschaften von Laserschweißnähten:

- schmale Schweißnähte mit großem Tiefen/Breitenverhältnis,
- sehr schmale Wärmeeinflusszone,
- geringer thermischer Verzug,
- gute Umformbarkeit.

Diese Vorteile lassen sich aber bei den austenitisch-ferritischen nichtrostenden Duplex-Stählen nicht automatisch nutzen. Weil wegen der sehr raschen Abkühlung aus der Schweißwärme nur wenig Zeit für die diffusionsgesteuerte Ausscheidung des Austenits aus der Ferritphase vorhanden ist, kann die

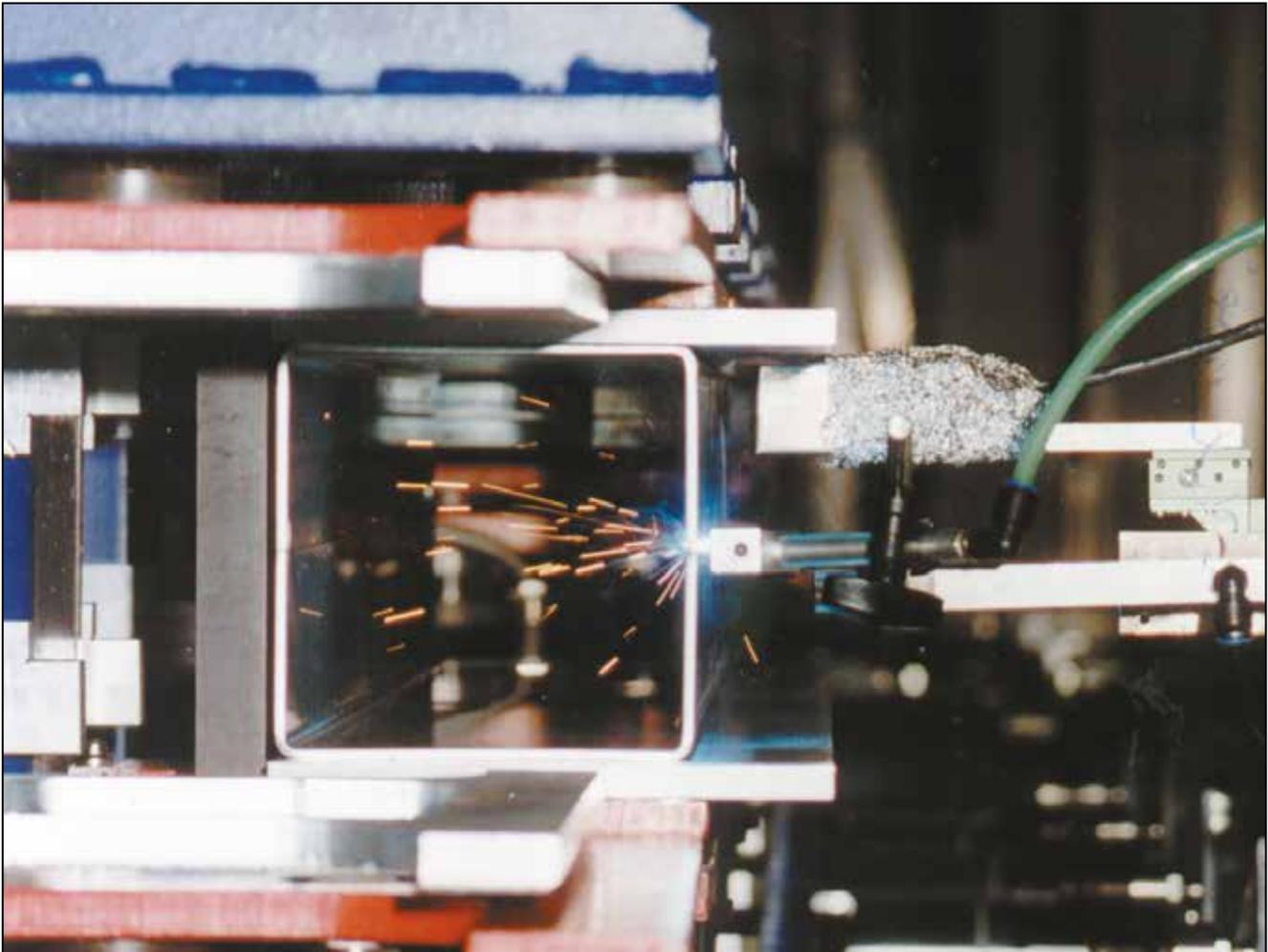


Bild 14: Schweißprozess mit CO₂-Laser an speziell konfektionierten Edelstahlprofilen (tailored beams)

Austenitmenge relativ gering ausfallen. Untersuchungen an 10 mm dicken Blechen haben aber ergeben, dass bei dem Standardduplex-Stahl

1.4462 dennoch ausreichend hohe Kerbschlagarbeitswerte auch ohne eine Wärmenachbehandlung erzielbar sind.

Im industriellen Einsatz stehen heute zwei Lasertypen zum Schweißen von Edelstählen zur Verfügung:

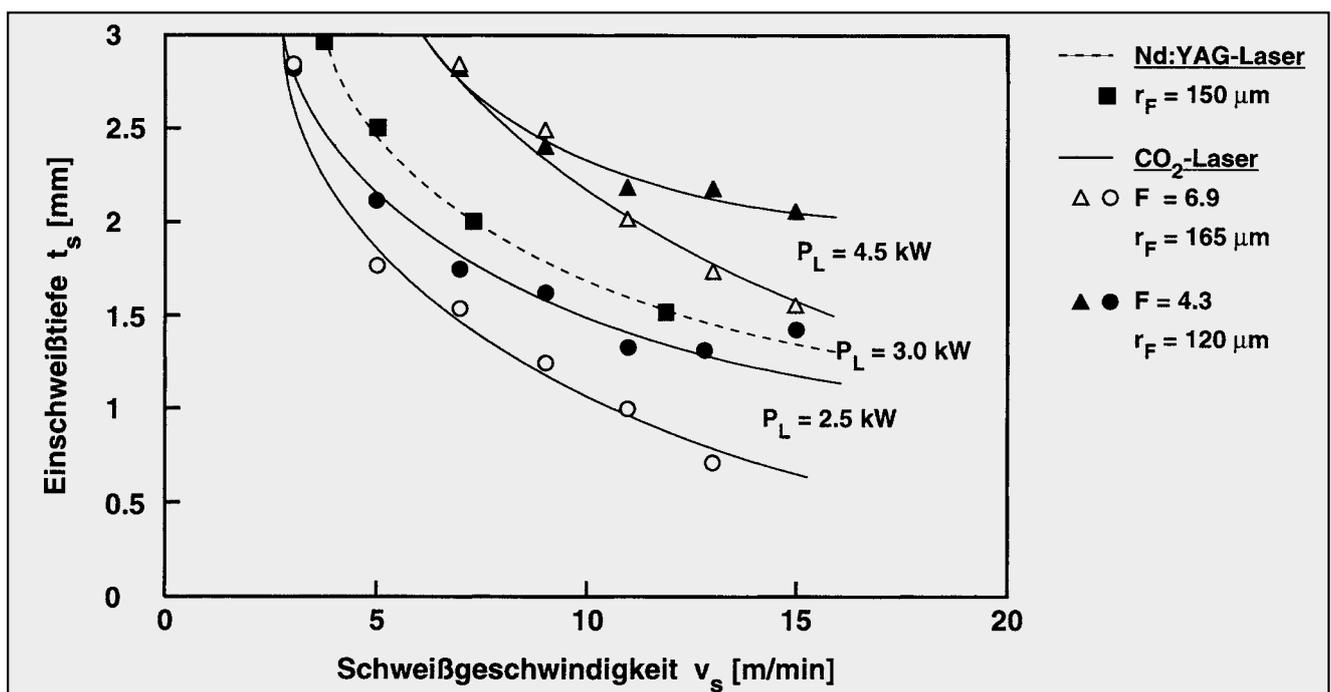


Bild 15: Einfluss von Leistung und Fokussierung auf den Schweißprozess am Beispiel eines 3 mm Bleches

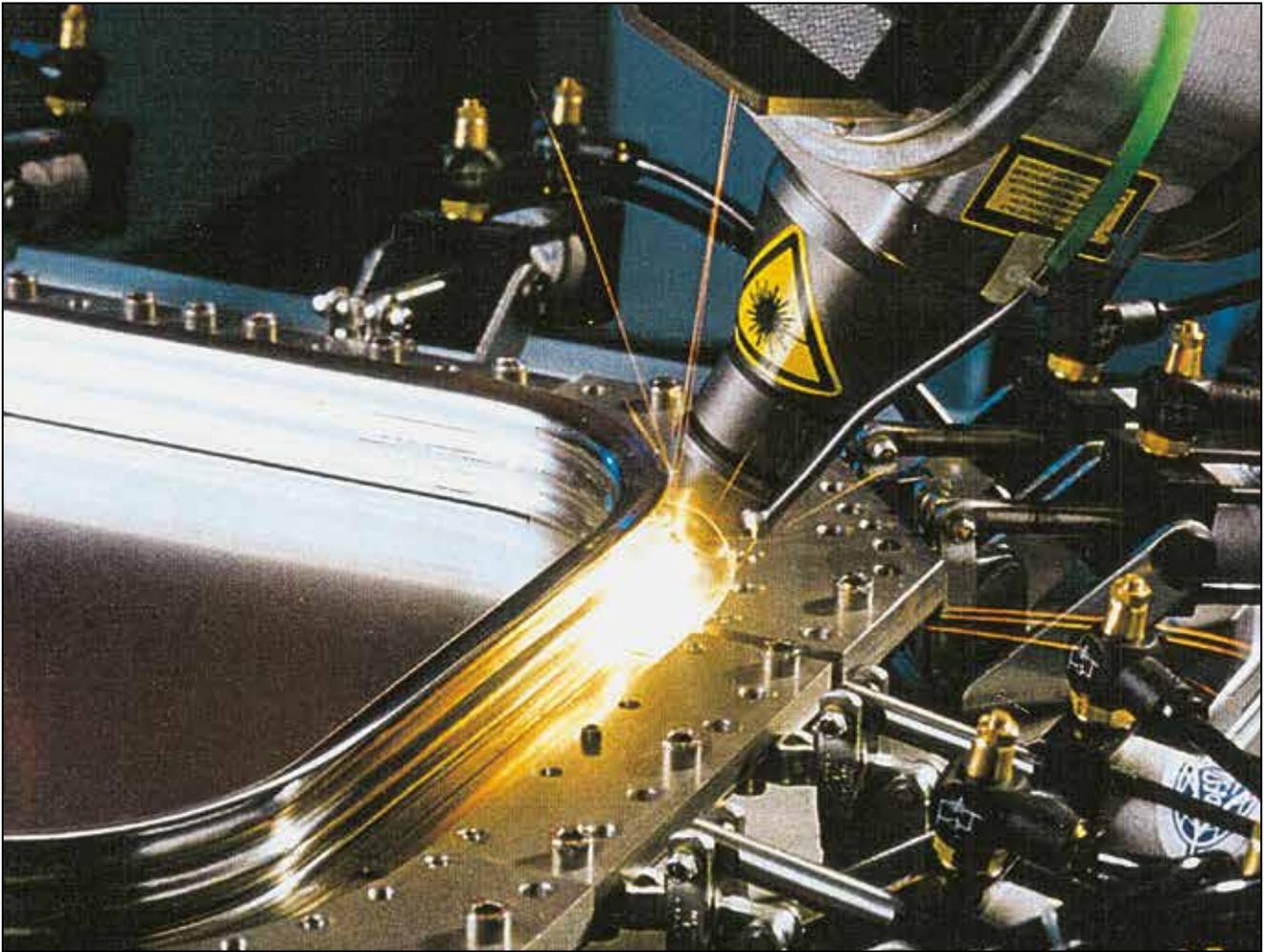


Bild 16: Schweißen von Membranringen mit einem Nd:YAG-Laser

CO₂-Laser

Der CO₂-Laser ist im kW-Bereich bis zu 25 kW-Laserleistung kommerziell verfügbar und eignet sich gut für das Verschweißen von Werkstücken von 1 mm bis ca. 15 mm. Beim CO₂-Laser wird die Laserstrahlung über Spiegeloptiken auf das Werkstück fokussiert. Der Schweißprozess wird durch ein Schutzgas wie Helium, Argon oder ein Gasmischung unterstützt. Durch den Schweißprozess baut sich über dem Keyhole ein laserinduziertes Plasma auf, das bei geeigneter Steuerung durch das Schutzgas den Schweißprozess unterstützt. **Bild 14** zeigt eine Darstellung des Schweißprozesses an speziell konfektionierten Edelstahlprofilen (tailored beams). Aufgrund der starren Strahlführung über Spiegelemente stellen Schweißanlagen mit CO₂-Laser eine komplexe Anlagenlösung dar. **Bild 15** ist eine graphische Darstellung der zum Schweißen notwendigen Laserleistung in Abhängigkeit von der Einschweißtiefe.

Faserlaser

Aufgrund der verfügbaren Laserleistungen von ca. 100 W bis 10 kW wird der Faserlaser vorwiegend zur Feinbearbeitung von Komponenten aus Edelstahl und zum Verschweißen von Blechdicken von 0,2 bis ca. 4 mm eingesetzt. Die Laserstrahlung wird im Unterschied zu den CO₂-Lasern von der Strahlquelle zur Bearbeitungsoptik über Glasfaserkabel geführt. Die Bearbeitungsoptik ist ein Linsensystem, das die Laserstrahlung auf das Werkstück fokussiert. Durch die Strahlführung über Glasfaserkabel wird eine Verknüpfung mit Knickarmrobotern für die Führung der Fokussieroptik ermöglicht. Dadurch wird eine sehr hohe Flexibilität für die dreidimensionale Bearbeitung gewährleistet.

Bild 16 zeigt das Verschweißen von Edelstahlbehältern aus 0,7 mm dickem Blech der Qualität 1.4301 mittels Roboterarm. Aufgrund der schmalen Nahtgeometrie ist eine präzise Kantenvorbereitung für das

Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff erforderlich. Als maximales Spaltmaß zwischen den Fügeteilen wird ein Verhältnis von 1/10 der Blechdicke angesetzt. Bei größeren Blechdicken darf der Fügeseit nicht größer als der halbe Fokussdurchmesser, z.B. von 0,6 mm, sein. Sollten größere Spaltmaße unvermeidbar sein, kann beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzdraht gearbeitet werden. Die erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten reduzieren sich dabei um ca. 1/3 gegenüber der Schweißgeschwindigkeit ohne Zusatzdraht.

Bei höher legierten Edelstählen kann eine Heißrissbildung in Form von Mitelnahtrissen beim Schweißen auftreten. Dies kann durch Verwendung eines geeigneten Zusatzdrahtes oder durch Vorwärmen verhindert werden. In jedem Fall ist auf äußerste Sauberkeit zu achten, denn bereits geringe Mengen an Verunreinigungen, und hier insbesondere von Schwefel, können zu Heißrissen führen.

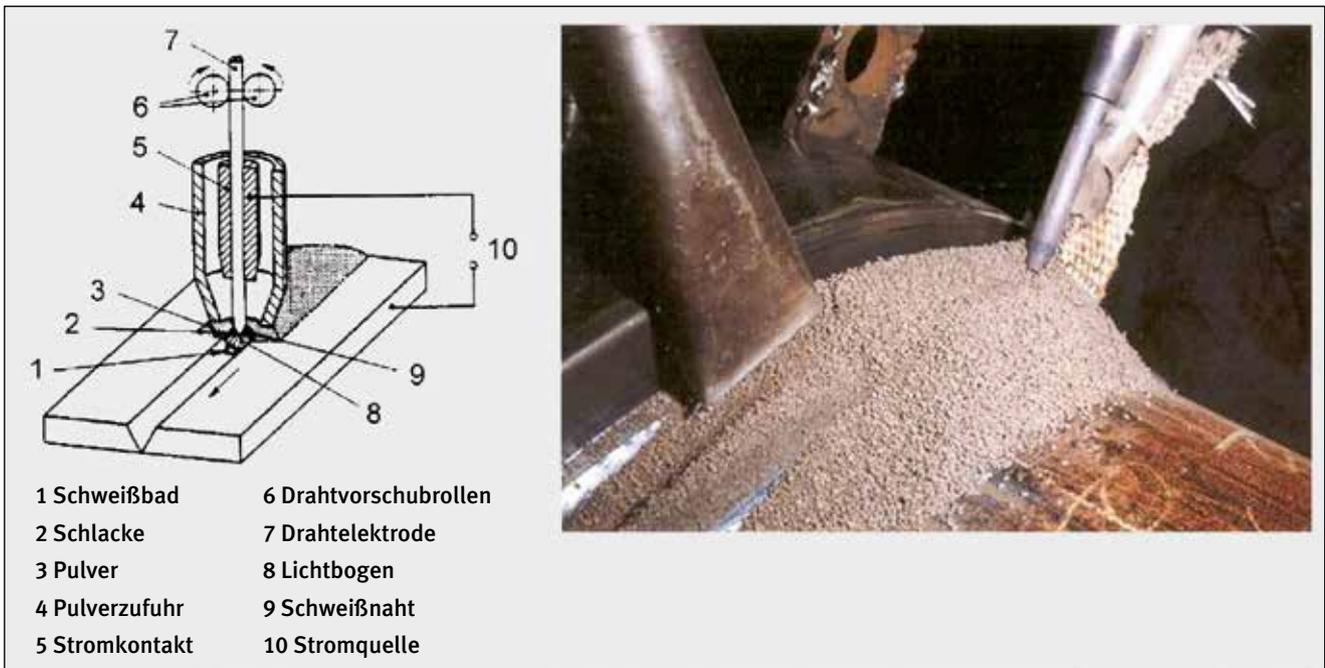


Bild 17: Unterpulver-Schweißen (UP)

3.1.4 Unterpulverschweißen (UP)

Beim UP-Verfahren (vgl. Merkblatt DVS 0917) brennt der Lichtbogen zwischen Drahtelektrode und Werkstück verdeckt in einer Schlackenkaverne, die durch Schmelzen des lose aufgeschütteten Pulvers entsteht (Bild 17).

UP-Schweißen ist nur in Wannen- (PA) und Horizontalposition (PB) möglich, mit Sondervorrichtung auch in der quer-Position (PC). Üblicherweise wird die Drahtelektrode am Pluspol mit Gleichstrom verschweißt. Je nach Wanddicke beträgt der Drahtelektroden-Durchmesser zwischen 1,2 und 4 mm. Die Stromstärke wird etwa 10 bis 20% niedriger angesetzt als bei den un- und niedriglegierten Stählen. Die Drähte für das UP-Schweißen enthält DIN EN ISO 14345, geeignete Schweißpulver sind in DIN EN ISO 14174 enthalten.

3.2 Pressschweißverfahren

3.2.1 Widerstandspressschweißen

Widerstandspressschweißverfahren (DVS-Merkblätter 2901 ff.) ermöglichen mit geringem Aufwand hochwertige Verbindungen guter Reproduzierbarkeit. Dank der niedrigen elektrischen Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit der austenitischen Stähle im Vergleich zu den unlegierten Stählen sind diese für das Wider-

standsschweißen sehr gut geeignet. Wegen der geringen Wärmezufuhr wird die Oberfläche dabei kaum beeinträchtigt. Ihre höhere Wärmeausdehnung (Tabelle 1) kann sich aber nachteilig auf den Verzug auswirken.

Beim Punkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen werden überlappt angeordnete Bleche miteinander verbunden. Bedingt durch die Überlappung ergibt sich somit ein Spalt zwischen den Blechen. Die Verfahren werden bevorzugt dort angewendet, wo eine Gefährdung durch Spaltkorrosion (siehe Abschnitt 2.2) nicht gegeben

ist. Die beim Schweißen entstehenden Anlauffarben sind ggf. zu entfernen (siehe Abschnitt 6). Sie können jedoch durch Zuführung von Schutzgas oder externe Kühlung zumindest gemindert werden.

Die Oberflächen der zu verschweißenen Teile müssen metallisch sauber sein. Beim Punktschweißen hängen Größe und Form der Schweißlinse wesentlich von Stromstärke, Schweißzeit und Elektrodenkraft ab. Mit zunehmender Schweißzeit werden Höhe und Durchmesser der Schweißlinse größer. In der Praxis werden bei nicht-

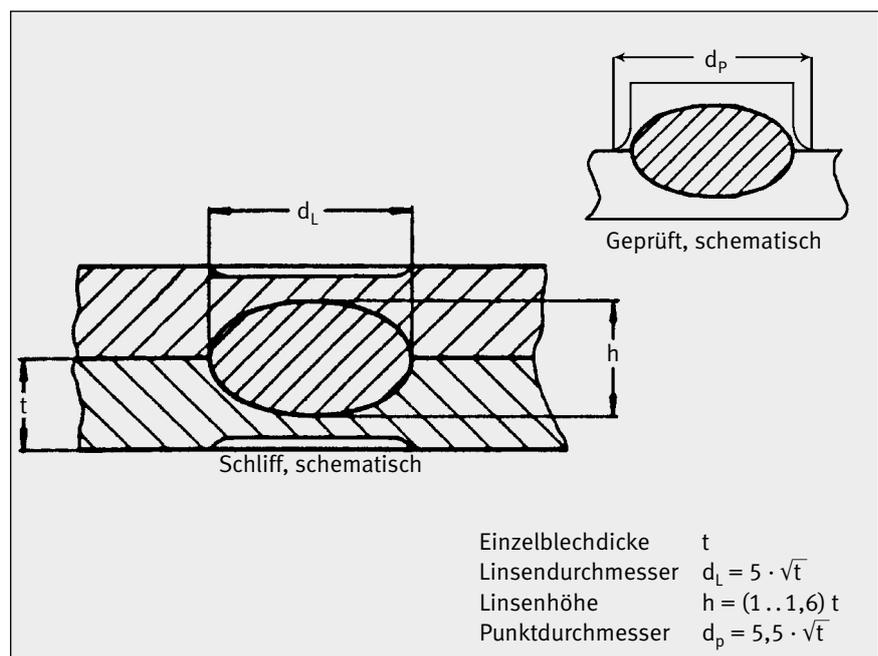


Bild 18: Angaben für empfohlene Abmessungen beim Widerstandspunktschweißen

Blechdicke mm	Elektrode		Elektrodenkraft F kN	Schweißstrom I *) kA	Stromzeit Perioden	Mindestpunktdurchmesser mm	Scherzugkraft N
	Durchmesser D mm	Balligkeitsradius R mm					
0,5	16	40	1,3	4,0	4	2,8	2.000
1,0	16	40	4,0	7,0	7	4,0	5.000
1,5	20	50	6,5	9,0	10	4,9	7.000
2,0	20	50	9,0	10,5	13	5,7	11.000
2,5	25	100	12,0	12,5	16	6,3	13.000
3,0	25	100	15,0	15,0	19	6,9	16.000

*) Der Schweißstrom ist auf die jeweilige Verbindung hin zu optimieren

Tabelle 4: Richtwerte für die Maschineneinstellung zum Punktschweißen von austenitischen Stählen

Schweißfehler	Einstellwerte				Werkstückoberfläche
	Schweißstrom	Stromzeit	Elektrodenkraft	Elektroden Durchmesser	
Oberflächenfehler (Anlegieren, Aufschmelzen und dergleichen)	zu hoch	zu lang	zu niedrig	zu klein	verunreinigt
Übermäßige Eindrücke der Elektrode im Werkstück	zu hoch	zu lang	zu hoch	zu klein	
Spritzen zwischen den Werkstücken	zu hoch	zu lang	zu niedrig	zu klein	verunreinigt
Klaffen der Werkstücke	zu hoch	zu lang	zu hoch	zu klein	
zu große Schweißlinse	zu hoch	zu lang	zu niedrig		
zu kleine Schweißlinse	zu niedrig	zu kurz	zu hoch		verunreinigt
Porosität	zu hoch	zu kurz	zu niedrig	zu klein	verunreinigt
Risse	zu hoch	zu lang	zu niedrig		verunreinigt

Tabelle 5: Schweißfehler beim Punktschweißen und ihre möglichen Ursachen

Blechdicke Mm	Rollenelektrode		Elektrodenkraft F kN	Schweißstrom I kA	Stromzeit ts Perioden	Strompause tp Perioden	Schweißgeschwindigkeit m/min
	Breite B mm	Radius R mm					
0,5	3,0	50	3,0	8,0	3	2	1,4
1,0	4,0	75	5,0	12,0	3	4	1,2
1,5	5,0	75	8,0	15,0	4	5	1,1
2,0	6,0	150	10,0	16,0	4	6	1,0
2,5	7,0	150	12,5	16,5	5	6	1,0

Tabelle 6: Richtwerte für das Rollenahtschweißen

rostenden Stählen kurze Schweißzeiten bevorzugt. Wegen des höheren elektrischen Widerstandes der austenitischen Stähle (Tabelle 1) werden niedrigere Stromstärken angewendet als bei unlegierten Stählen. Die Stromstärke ist so einzustellen, dass der Punkt-Ø etwa $5,5 \sqrt{t}$ beträgt (Linsen-Ø $5\sqrt{t}$). Dabei sollte die Höhe der

Schweißlinse zwischen 50 % und 80 % der Dicke beider Blechquerschnitte betragen (Bild 18). Zu hohe Schweißströme können Spritzer und damit Lunken in den Schweißlinsen verursachen, zu niedrige Ströme führen zu kleinen Schweißlinsen. Abhängig von der zu schweißenden Legierung sind zum Teil erhebliche Abweichungen

von den Richtwerten aus den Tabellen (Tabelle 4) möglich.

Im Vergleich zu unlegierten Stählen werden etwa zweimal höhere Elektrodenkräfte benötigt. Die Elektrodenkraft muss auch nach Abschalten des Stromes noch so lange aufrechterhalten bleiben, bis die Schweißlinse erstarrt ist (bei dünnen Blechen genügt eine Nachpresszeit von 25 Perioden, bei 3 mm Blechdicke von etwa 99 Perioden). Zum **Punktschweißen** der nichtrostenden Stähle werden Elektroden aus Kupferlegierungen mit einer Warmhärte von mind. 70 HBW bei 400 °C verwendet. Es kommen hierfür Elektroden aus Cu-Cr-Zr- oder Cu-Co-Be-Legierungen in Frage (Werkstoffklasse A2/3 oder A3/1 nach DIN ISO 5184 und Merkblatt DVS 2903, Abmessungen nach DIN ISO 5184). Elektroden mit balliger Kontaktfläche werden bevorzugt verwendet, weil sie keine so exakte Justierung erfordern wie Elektroden mit flachen Kontaktflächen. Es ist speziell bei den dickeren Blechen zu beachten, dass die Elektrodenkappen nur bis zu bestimmten maximalen Kräften belastet werden dürfen. Deshalb können hier keine Normkappen mehr eingesetzt werden, sondern es müssen spezielle Elektroden angefertigt werden. Richtwerte für Maschinen-Einstelldaten in Abhängigkeit von der Blechdicke enthält für austenitische Stähle **Tabelle 4**. Eine Zusammenstellung von Schweißfehlern beim Punktschweißen und deren Ursachen enthält **Tabelle 5**.

Das **Rollenahtschweißen** – kontinuierlich oder mit intermittierender Rollenbewegung (Schrittschweißen) – kann mit balligen oder flachen Elektrodenkontaktflächen durchgeführt werden. Die Elektrodenkraft bleibt ständig aufrechterhalten, der Strom wird entweder kontinuierlich oder intermittierend geschaltet. Richtwerte zum Rollenahtschweißen enthält **Tabelle 6**.

Beim **Abbrennstumpfschweißen** werden die Kontaktflächen der Werkstücke bei kontinuierlichem Vorschub unter geringer Kraft abgebrannt. Wenn sich die Enden der Teile auf Fügetemperatur erwärmt haben, werden sie mit hoher Geschwindigkeit zusammengepresst. Die dabei entstehende Stauchkraft bewirkt das Verschweißen der Enden, wobei Oxi-

Kenngröße	Hubzündungs- bolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas	Kurzzeitbolzen- schweißen mit Hubzündung	Kondensator- Entladungsbolzen- schweißen mit Hubzündung	Bolzenschweißen mit Spitzenzündung
Nr. nach ISO 4063	783	784	785	786
Bolzendurchmesser d (mm)	3 bis 25	3 bis 12	2 bis 8	2 bis 8
Spitzenstrom (A)	2500	1500	5000	8000
Schweißzeit (ms)	100 bis 2000	5 bis 100	3 bis 10	1 bis 3
Energiequelle	Schweißgleichrichter oder Umformen	Schweißgleichrichter	Kondensator	Kondensator
Schweißbadschutz	Keramikring oder Schutzgas	Ohne Schutz oder Schutzgas	Ohne Schutz	Ohne Schutz
Bolzenwerkstoff	S235, CrNi-Stahl (bis 12 mm)	S235, CrNi-Stahl, Mes- sing (mit Schutzgas)	S235, CrNi-Stahl, Messing, Kupfer	S235, CrNi-Stahl, Messing, Kupfer
Blechoberfläche	Metallisch blank, Walzhaut, Flugrost, Primer	Metallisch blank, verzinkt, leicht geölt	Metallisch blank, leicht geölt	Metallisch blank, verzinkt, (Kontakt- schweißen bis M6)
Mindestblechdicke	$\frac{1}{4} d$, bei Schutzgas $\frac{1}{8} d$	$\frac{1}{8} d$	$\frac{1}{10} d$	$\frac{1}{10} d$ (ab ca. 0,5 mm)

Tabelle 7: Kenngrößen beim Bolzenschweißen

de und ein Teil des Werkstoffes aus dem Schweißspalt herausgedrückt werden. Die Spannkraft muss genügend groß sein, damit die Werkstücke in den Spannbacken nicht rutschen (die Spannkraft soll das 1,5 bis 2-fache der Stauchkraft betragen). Zusätzlich zu dieser Abbrenn- und Stauchphase kann z.B. noch mit Vorwärmen, Planbrennen und Maßstauchen gearbeitet werden. Für Edelstahl Rostfrei werden etwas geringere Stromstärken, aber etwas höhere Stauchkräfte angewendet als für unlegierte Stähle. Dementsprechend sind auch die Spannkraften für nichtrostende Stähle höher als für un- und niedriglegierte Stähle. Die Einstellwerte sind im Vorversuch zu ermitteln. Weitere Angaben zum Abbrennstumpfschweißen enthält Merkblatt DVS 2901-1.

Das **Buckelschweißen** ist ein weiteres Widerstandspressschweißverfahren, findet aber im Bauwesen und Stahlbau kaum Anwendung; es wird deshalb hier nicht behandelt. Hinweise enthält das Merkblatt DVS 2905.

3.2.2 Bolzenschweißen

Beim Bolzenschweißen werden stiftförmige Teile mit flächigen Werkstücken durch Pressschweißen verbunden. Die Verbindung erfolgt im flüssigen oder plastischen Zustand der Schweißzone. Das Lichtbogen-

Bolzenschweißen hat die größte Bedeutung. Dabei wird zwischen Bolzenspitze und Werkstück ein Licht-

bogen gezündet, der die Stirnflächen anschmilzt. Nach Ablauf der Schweißzeit wird der Bolzen in die Schmelze

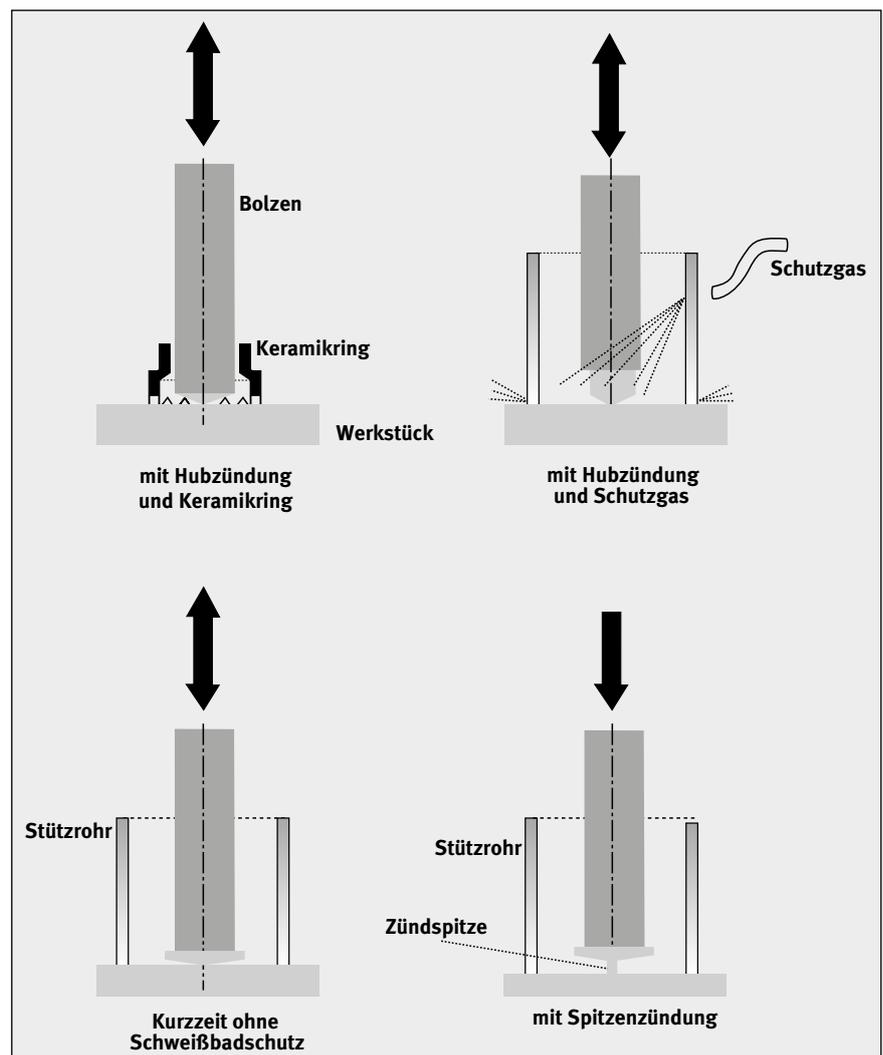


Bild 19: Die wichtigsten Verfahrensvarianten beim Lichtbogenbolzenschweißen

Bolzenwerkstoff	Grundwerkstoff nach ISO/TR 15608			
	Gruppen 1,2,3,4 und Kohlenstoffstahl bis 0,3% C	Gruppen 1,2,3,4 und verzinkte und metallbeschichtete Stahlbleche, max. Beschichtungsdicke 25 µm	Gruppe 8	Kupfer und bleifreie Kupferlegierungen z.B. CuZn 37
S235	a	b	a	b
1.4301; 1.4303	a	b	a	b

Erläuterung der Buchstaben für die Schweißbeignung:
a) Gut geeignet für jede Anwendung, z.B. Kraftübertragung
b) geeignet mit Einschränkungen für Kraftübertragung
Erläuterung der Gruppen nach CEN ISO/TR 15608:
Gruppe 1: Stähle mit einer gewährleisteten Mindeststreckgrenze von $R_{eH} \geq 460$ MPa und mit folgenden Analysenwerten in %: C $\leq 0,25$; Si $\leq 0,60$; Mn $\leq 1,8$; Mo $\leq 0,70$; S $\leq 0,045$; P $\leq 0,045$
Gruppe 2: Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle mit einer Mindeststreckgrenze $R_{eH} > 360$ MPa
Gruppe 3: Vergütete und ausscheidungshärtende Feinkornbaustähle mit einer Mindeststreckgrenze $R_{eH} > 360$ MPa,
Gruppe 4: niedrig Vanadinlegierte Cr-Mo-(Ni)Stähle mit Mo $\leq 0,7$ % und V $\leq 0,1$ %
Gruppe 8: austenitische nichtrostende Stähle

Tabelle 8: Schweißbeignung von gängigen Grundwerkstoff/Bolzen-Kombinationen beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung

Bolzenwerkstoff	Grundwerkstoffe nach ISO / TR 15608		
	Gruppe 1 und 2 ¹⁾	Gruppe 5 und 4	Gruppe 8
S235 4.8 (schweißgeeignet) 14Mo5	a	b	b ²⁾
X10CrAl18 X10CrAl24 X20CrNiSi24-4	c	c	c
1.4301 1.4401 1.4541 1.4571	b (a) ³⁾	b	a

Erläuterung:
¹⁾ maximale Streckgrenze $R_{eH} \leq 460$ MPa
²⁾ Nur bei Kurzzeit-Bolzenschweißen mit Hubzündung
³⁾ Bis 12 mm Durchmesser
Erläuterung der Buchstaben für die Schweißbeignung:
a: gut geeignet für jede Anwendung, z.B. Kraftübertragung
b: geeignet mit Einschränkungen für Kraftübertragung
c: geeignet mit Einschränkungen nur für Wärmeübertragung
Gruppe 1: Stähle mit einer gewährleisteten Mindeststreckgrenze von $R_{eH} \geq 460$ MPa und mit folgenden Analysenwerten in %: C $\leq 0,25$; Si $\leq 0,60$; Mn $\leq 1,8$; Mo $\leq 0,70$; S $\leq 0,045$; P $\leq 0,045$
Gruppe 2: Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle mit einer Mindeststreckgrenze $R_{eH} > 360$ MPa
Gruppe 4: niedrig Vanadinlegierte Cr-Mo-(Ni)Stähle mit Mo $\leq 0,7$ % und V $\leq 0,1$ %
Gruppe 5: Vanadinfreie Cr-Mo-Stähle mit C $\leq 0,35$ %
Gruppe 8: austenitische nichtrostende Stähle

Tabelle 9: Schweißbeignung von gängigen Grundwerkstoff/Bolzen-Kombinationen beim Hubzündungsbolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas und Kurzzeit-Bolzenschweißen mit Hubzündung

gedrückt, wodurch der Lichtbogen erlischt und die Schmelze erstarrt. Typische Verfahrensparameter können der **Tabelle 7** entnommen werden.

Von den verschiedenen Varianten des Lichtbogen-Bolzenschweißens (**Bild 19**) werden vor allem das Hubzündungsbolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas, das Kurzzeit-Bolzenschweißen mit Hubzündung und das Bolzenschweißen mit Spit-

zenzündung industriell eingesetzt. Gegenüber anderen Fügeverfahren haben sie folgende Vorteile:

- Das Bauteil muss nur von einer Seite zugänglich sein, es entfallen Bohrungen, die zu Undichtigkeiten führen können.
- Es entsteht eine vollflächige Verschweißung mit hoher Belastbarkeit.

- Der große Durchmesserbereich von 0,8 bis 25 mm und das Verarbeiten von Flachstiften mit einem Seitenverhältnis von bis zu 1:5 erlauben vielfältige Anwendungen.
- Mit leichten Handpistolen kann in allen Schweißpositionen gearbeitet werden.
- Durch die kurze Schweißzeit kommt es zu nur geringem Einbrand und Verzug.
- Durch einen angestauchten Flansch an der Bolzenspitze kann die Schweißfläche vergrößert werden, so dass die Schweißzone die Festigkeit des Bolzens oder des Grundwerkstoffs erreichen kann.

Die meisten Anwendungen gibt es im Bauwesen (Stahl-Beton-Verbundbau, Fassaden), im Anlagenbau (Verankerung von feuerfesten Isolierungen), im Apparatebau (Befestigung von Flanschen und Deckeln), im Schiffbau (Befestigung von Isolierungen und Ausbauelementen) sowie im Straßen- und Schienenfahrzeugbau (Befestigung von Kabelbäumen, Rohrleitungen und Aggregaten). Bei Bolzen ab 12 mm Durchmesser und Werkstückdicken über etwa 3 mm wird fast ausschließlich mit der Variante „Hubzündung mit Keramikring“ geschweißt. Bei dünnen Blechen (auch unter 1 mm Dicke) und hohen Ansprüchen an das dekorative Aussehen der Rückseite wird man der Variante „Bolzenschweißen mit Spitzenzündung“ den Vorzug geben (**Tabelle 8**). Dabei ist allerdings der Bolzendurchmesser auf $\varnothing 8$ mm, max. $\varnothing 10$ mm begrenzt.

Für hohe Ansprüche an die mechanische Festigkeit der Verbindung, auch für Schwarz-Weiß-Verbindungen, eignet sich besonders die Variante „Kurzzeit mit Hubzündung“ (**Tabelle 9**).

Bolzenschweißen von nichtrostenden Stählen

Beim Bolzenschweißen von austenitischen nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen tritt keine Gefügeumwandlung und damit auch keine Aufhärtung ein. Die hohe Abkühlungsgeschwindigkeit beim Bolzenschweißen ist daher von Vorteil, da sie Ausscheidungsvorgänge (z.B. Karbidausscheidungen) verhindert. Die austenitischen Stähle sind auch gut umformbar. Bei den austeniti-

Stahlsorte		Legierungstyp des Schweißzusatzes
Kurzname	Werkstoff-Nummer	
X2CrNi12	1.4003	18 8 Mn ¹⁾ 19 9 L
X6Cr17	1.4016	19 9 L 19 9 Nb
X3CrNb17	1.4511	19 9 Nb 19 9 L 18 8 Mn ¹⁾
X2CrTi12	1.4512	19 9 L 18 8 Mn ¹⁾
X2CrNiN22-2	1.4062	22 9 3 N L 23 7 L N
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	22 9 3 N L 23 7 L N
X2CrNiN23-4	1.4362	22 9 3 N L 23 7 L N
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	22 9 3 N L
X5CrNi18-10	1.4301	19 9 L
X2CrNi18-9	1.4307	19 9 L
X6CrNiTi18-10	1.4541	19 9 L 19 9 Nb
X2CrNiN18-7	1.4318	19 9 N L
X5CrNiMo12-12-2	1.4401	19 12 3 L
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	19 12 3 L
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	19 12 3 L 19 12 3 Nb
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	19 12 3 L
X2CrNiMoN13-13-5	1.4439	18 16 5 N L
X1CrNiMoCuN20-18-7	1.4547	EL-Ni Cr 20 Mo 9 Nb
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	20 25 5 Cu N L
X1NiCrMoCu25-20-7	1.4529	EL-Ni Cr 22 Mo 16 EL-Ni Cr 20 Mo 9 Nb
X2CrNiMnMoNbN25-18-5-4	1.4565	EL-Ni Cr 19 Mo 15

Zum Schweißen der Mo-freien Stähle 1.4301, 1.4307 und 1.4541 können allgemein auch die für die Mo-legierten Stähle 1.4401, 1.4403 und 1.4571 genannten Schweißzusätze verwendet werden.

¹⁾ Mit abgesenktem C-Gehalt: C ≤ 0,10 %

1. Umhüllte Stabelektroden nach DIN EN ISO 3851
Bezeichnung z.B. E 19 12 3 L R oder E 19 12 3 L B
R = rutilumhüllt, B = basisch umhüllt

2. Drahtelektroden, Drähte und Stäbe nach DIN EN ISO 14343
Drahtelektrode mit Si ≤ 0,65 % zum Schutzgasschweißen: z.B. G19 12 3 L
Drahtelektrode mit Si > 0,65 % bis 1,2 % zum Schutzgasschweißen: z.B. G 19 12 3 L Si
Drahtelektrode mit Si ≤ 0,65 % zum UP-Schweißen: z.B. S19 12 3 L
Stab oder Draht mit Si ≤ 0,65 % zum WIG-Schweißen: z.B. W19 12 3 L
Stab oder Draht mit Si > 0,65 % bis 1,2 % zum WIG-Schweißen: z.B. W19 12 3 L Si

3. Fülldrahtelektroden nach DIN EN ISO 17633
a) Schlackebildende Typen
Kennzeichen R: rutil, langsam erstarrende Schlacke für Positionen PA und PB
Kennzeichen P: rutil, schnell erstarrende Schlacke für alle Schweißpositionen
b) Schlackeloser Typ:
Kennzeichen M: Metallpulver
Bezeichnung für eine Fülldrahtelektrode mit schnell erstarrende Schlacke: z.B. T19 12 3 L M (M für Mischgas)

Tabelle 10: Zuordnung von Legierungstyp des Schweißzusatzes zum Grundwerkstoff

schen Cr-Ni-(Mo-)Stählen entsteht im Schweißgut bis zu 10 % Delta-Ferrit; sie sind daher nicht heißbrissgefährdet. Dagegen besteht bei den höherlegierten vollaustenitischen Stählen die Gefahr der Heißbrissbildung im aufgeschmolzenen Schweißgut; ihre Eignung zum Bolzenschweißen muss

daher geprüft werden. Eine Übersicht der möglichen Werkstoff-Kombinationen, z.B. das Schweißen von nichtrostenden Bolzen auf unlegierte oder niedriglegierte Bleche (Schwarz-Weiß-Verbindungen) enthalten **Tabellen 8 und 9**.

Die im Schweißgut zu erwartenden Gefüge als Folge der Vermischung der beiden Werkstoffe können mit dem WRC-Diagramm abgeschätzt werden (vgl. Punkt 2.1).

Für das Bolzenschweißen im bauaufsichtlichen Bereich sind die Stähle gemäß der jeweils gültigen Zulassung „Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen“ zulässig, die in ihrer aktuellen Fassung als Sonderdruck SD 862 bei der Informationsstelle Edelstahl Rostfrei kostenfrei bestellt werden kann.

Die Schweißbedingungen sind bei den nichtrostenden Stählen sorgfältiger abzustimmen als bei den unlegierten Stählen, weil der Toleranzbereich der Schweißparameter enger ist. Auch die mögliche stärkere Blaskwirkung ist zu beachten. Das Schweißen unter Schutzgas (z.B. 82 % Ar und 18 % CO₂) erweitert den Toleranzbereich der Schweißparameter und ist besonders bei Bolzendurchmessern über 16 mm erforderlich.

Die umwandlungsfreien ferritischen Chromstähle haben einen Kohlenstoffgehalt unter 0,1 %, sind mit zunehmendem Cr-Gehalt (Cr 13 bis 24 %) weniger verformungsfähig und neigen zur Grobkornbildung. Sie werden beim Bolzenschweißen vorwiegend zur Kessel- und Feuerraumbestimmung an unlegierten warmfesten Stählen (z.B. 16Mo5, 13CrMo4-5) verwendet.

Bolzenschweißen von unlegiertem mit nichtrostendem Stahl

Bolzenschweißungen von unlegiertem mit austenitischen Cr-Ni-Stählen (Schwarz-Weiß-Verbindungen) führen durch die Vermischung von ferritischen mit austenitischen Werkstoffen zu einem spröden martensitischen Gefüge im Schweißgut. Sind die Anteile von Bolzen- und Grundwerkstoff im Schweißgut bekannt, kann im Diagramm das zu erwartende Gefüge ermittelt werden. Im Allgemeinen liegt der Bolzenanteil in der Schmelze bei 55 bis 60 %. Er ist abhängig vom Bolzendurchmesser, Blechdicke und Schweißbedingungen. Beim Kurzzeitbolzenschweißen mit Schutzgas liegt er bei 65 %. Durch Variation der Arbeitsbedingungen allein kann der

Martensitbereich der Schmelze nicht verlassen werden. Nur durch ein starkes Auflegieren der Bolzenspitze wäre dies möglich. Dazu kommt bei artfremden Schweißverbindungen eine Kohlenstoffdiffusion im Übergang vom kohlenstoffreichen (unlegierten) zum kohlenstoffarmen (legierten) Werkstoff bzw. Schmelzbad. Dabei entsteht immer eine sehr dünne (ca. 0,05 mm) kohlenstoffreiche Zone mit starker Aufhärtung. Die Verbindung von unlegierten Bolzen mit legiertem Werkstück ist dabei besonders ungünstig. Sie führt außerdem tiefer in den Martensitbereich als bei legierten Bolzen auf unlegiertem Werkstück.

Das Hubzündungsbolzenschweißen mit Keramikring und Schweißzeiten über 100 ms eignet sich für Bolzendurchmesser bis 12 mm. Bei größeren Bolzendurchmessern können meist keine Schweißungen ausreichender Festigkeit und Umformungsfähigkeit erzielt werden. Man kann dann auf reibgeschweißte Verbundbolzen ausweichen, die an der Bolzenspitze ein dem Werkstück entsprechendes Zwischenstück haben.

Schwarz-Weiß-Verbindungen im Bauwesen sind durch die Zulassung „Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen“ des DIBt geregelt. Danach darf nur die Kombination weißer Bolzen/schwarzer Grundwerkstoff verarbeitet werden. Der Bolzendurchmesser ist auf 12 mm begrenzt. Ein Korrosionsangriff des schwarzen Teils ist durch eine Beschichtung zu vermeiden. Weitere Einzelheiten können der Zulassung entnommen werden. Damit hat man z.B. die Möglichkeit, Glasfassaden durch Bolzenschweißen rationell zu erstellen, ohne dass nach kurzer Zeit hässliche Rostfahnen entstehen.

Beim Kurzzeitbolzenschweißen mit Hubzündung werden fast ausschließlich Bolzen mit angestauchtem Flansch verarbeitet. Damit kann eine ausreichende Verformungsfähigkeit auch bei Martensitanteilen in der Fügezone erreicht werden.

Beim Bolzenschweißen mit Kondensatorentladung sind durch die größere Schweißfläche mit Flansch und die sehr schmale Schmelzzone (ca. 0,1

mm) Bedingungen gegeben, die zu brauchbaren Schwarz-Weiß-Verbindungen führen.

4 Schweißzusätze

Für die in der Bauindustrie am häufigsten zum Einsatz kommenden austenitischen, ferritischen und austenitisch-ferritischen nichtrostenden Stähle (Tabelle 1) sind in der Tabelle 10 die empfohlenen Schweißzusätze aufgeführt.

4.1 Schweißzusätze für austenitische Stähle

Während das Schweißen der Stähle mit den Werkstoff-Nrn. 1.4301 bis 1.4435 mit den artgleichen Schweißzusätzen mit Deltaferritanteil unproblematisch ist, sind beim Schweißen der stabil austenitischen Stähle besondere Maßnahmen zur Vermeidung von Heissrißanfälligkeit zu beachten (siehe Abschnitt 5). Die Schweißzusätze aus Massivdraht enthält DIN EN ISO 14343, diejenigen aus Fülldraht sind in DIN EN ISO 17633 enthalten.

4.2 Schweißzusätze für ferritisch-austenitische Stähle

Die ferritisch-austenitischen Stähle 1.4462, 1.4362, 1.4162 und 1.4062 sind schweißtechnisch wie die austenitischen Stähle mit Ferritanteil zu behandeln. Das Schweißen mit erhöhtem Wärmeeinbringen ist nicht erforderlich, weil die Gehalte an Stickstoff hoch genug sind, um die Bildung der Austenitphase in ausreichendem Maße zu gewährleisten.

4.3 Schweißzusätze für ferritische Stähle

Ferritische nichtrostende Stähle werden im Allgemeinen mit austenitischen Schweißzusätzen gefügt. Wenn eine Farbgleichheit zwingend gefordert ist, sind ferritische Schweißzusätze vom Typ X8CrTi18 zu verwenden; bei Mehrlagenschweißung nur für die Decklage (Hinweise zur Schweißausführung siehe Abschnitt 5).

5 Vorbereiten und Ausführen der Schweißarbeiten

5.1 Schweißnahtvorbereitung

Die Nahtvorbereitung ist in Abhängigkeit vom Schweißverfahren, von der Blechdicke und auch von der Schweißposition festzulegen. Die Wahl der Fugenformen kann in Anlehnung an die jeweiligen DIN-Normen oder nach sonstigen Vorschriften erfolgen.

Zur Nahtkantenvorbereitung werden mechanische oder thermische Trennverfahren angewendet. Die mechanische Bearbeitung erfolgt z.B. durch Scheren, Hobeln, Fräsen und Schleifen, Wasserstrahlschneiden. Als thermische Bearbeitungsverfahren kommen das Plasmaschneiden und das Laserstrahlschneiden in Betracht.

Bei den thermisch geschnittenen Nahtflanken ist es häufig notwendig, diese vor dem Schweißen leicht zu **überschleifen**, um noch vorhandene Oxidreste zu beseitigen. Zum Schleifen sind kunstharzgebundene Korundscheiben (Fe- und S-frei) mit feiner Körnung zu verwenden. Es ist zu beachten, dass die verwendeten Schleifmittel nicht vorher für die Bearbeitung un- und niedriglegierter Stähle benutzt wurden.

Bei allen nichtrostenden Stählen hängt das Schweißergebnis wesentlich von der Vorbereitung zum Schweißen ab. Eine der wichtigsten Voraussetzungen ist die Sauberkeit der Schweißnahtkanten. Diese müssen nicht nur metallisch blank, d.h. frei von Oxiden und Zunder sein, sondern dürfen auch keine Verunreinigungen durch Fette, Öle oder andere organische Stoffe aufweisen, die zu Aufkohlungen und Einschlüssen in den Schweißnähten führen können.

Bei der mechanischen Reinigung der Nahtkanten bzw. der Nahtumgebung dürfen nur Bürsten aus nichtrostendem Stahl verwendet werden. Für eine chemische Reinigung kommen zugelassene Lösemittel in Betracht.

5.2 Schweißausführung

Beim Schweißen austenitischer nichtrostender Stähle sind gegenüber den un- und niedriglegierten Stählen die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften zu beachten (Tabelle 1). Dies sind insbesondere:

- der höhere Wärmeausdehnungskoeffizient,
- die niedrigere Wärmeleitfähigkeit,
- der größere elektrische Widerstand.

Diese Unterschiede beeinflussen die Wahl des Schweißverfahrens und die Ausführung der Schweißarbeiten. Der relativ hohe Wärmeausdehnungskoeffizient und die niedrige Wärmeleitfähigkeit austenitischer Stähle wirken sich besonders auf den **Verzug** beim Schweißen aus.

Abhilfemaßnahmen sind:

- Wärmeabführung durch Kupferschiene,
- Schweißen mit niedriger Streckenenergie,
- Schweißen in Vorrichtungen,
- Heften in kürzeren Abständen.

Folgende Heftabstände werden empfohlen:

Blechdicke mm	Abstand zwischen Heftstellen (empfohlen) mm
1,0 – 1,5	20 – 40
2,0 – 3,0	50 – 70
4,0 – 6,0	70 – 100
> 6 mm	100 – 150

Tabelle 11: Heftabstände

Beim Heften und Schweißen wird davon abgeraten, die Elektrode außerhalb des Nahtbereichs zu zünden, da die entstehenden Zündstellen zur Rissbildung führen können und die Korrosionsbeständigkeit dort herabgesetzt werden kann. Bei den voll-austenitischen Stählen sollten die Heftstellen beschliffen und ggf. von Endkraterrissen befreit werden.

Beim Schweißen einseitig zugänglicher Nähte ist die Wurzellage vor Oxidation zu schützen. Dazu verwendet

man inerte (Ar/He), reaktionsträge (N) oder reduzierende (Ar+H₂, N+H₂) Schutzgase zur Gegenspülung.

In Abhängigkeit von Stahlorte und Wanddicke sind die Elektroden-/ Drahtdurchmesser und die entsprechenden Schweißparameter zu wählen. Die Zwischenlagentemperatur sollte auf max. 150 °C begrenzt werden.

Beim Schmelzschweißen der vollaustenitischen Stahlsorten wie 1.4439 und 1.4539 ist besonders beim Zusatzlosen Schweißen (dünne Wanddicken) die erhöhte Heißrisssgefahr zu beachten, d.h. Schweißen mit begrenztem Wärmeeinbringen und Einhalten der Zwischenlagen- und Arbeitstemperaturen. Eine Vorwärmung ist deshalb nicht zu empfehlen.

Die ferritisch-austenitischen nichtrostenden Duplex-Stähle sollten ähnlich wie die vollaustenitischen Stähle verschweißt werden. Der Wärmeeintrag ist zu begrenzen und die Schweißfolge ist so zu wählen, dass die Teile stets ausreichend Zeit haben, abzukühlen. Bei einer zu langsamen Abkühlung kann es passieren, dass sich intermetallische Phasen wie z.B. Sigma-Phase ausscheiden. Die Gefahr, dass sich durch ein zu schnelles Abkühlen nur eine ungenügende Menge Austenit ausscheidet, besteht bei den normalen Lichtbogenverfahren nicht. Die Wärmedehnung liegt zwischen den der Austenite und Ferrite, was bei der Spaltbreite beim Heften berücksichtigt werden sollte. Die Abstände zwischen den Heftstellen sollten wegen der hohen Festigkeit dieser Legierungen geringer gehalten werden.

Die ferritischen Stähle mit den Werkstoff-Nrn. 1.4003, 1.4016, 1.4511 und 1.4512 verhalten sich bezüglich der Wärmeausdehnung etwa wie un- und niedriglegierte Stähle. Im Vergleich zu den austenitischen Stählen sind sie jedoch bis auf den Stahl 1.4003 in der Wärmeeinflußzone wegen der Bildung von Grobkorn und Chromkarbidausscheidungen wesentlich kritischer zu verarbeiten. Deshalb sind die Schweißverbindungen mit kleinstmöglichen Schmelzbädern (kleine Elektrodendurchmesser, niedrige Streckenenergie) auszuführen.

ren. Meistens werden austenitische Schweißzusätze wegen der besseren Zähigkeitseigenschaften in der Schweißverbindung verwendet.

Vor Beginn der Schweißarbeiten ist es ratsam, die Verarbeitungsempfehlungen der Stahlhersteller und Schweißzusatzwerkstoffhersteller sowie die jeweiligen Normen und Regelwerke (siehe Abschnitt 11) zu beachten. Die DIN EN 1011-3 gibt Empfehlungen zum Schweißen und Nachbehandeln von nichtrostenden Stählen.

6 Nachbehandlung von Schweißverbindungen

Zur Erzielung bester Korrosionsbeständigkeit ist es erforderlich, die Schweißnähte und die beeinflussten Zonen grundsätzlich von Schlackenresten, Schweißspritzern, Anlauffarben oder anderen Oxidationsprodukten zu reinigen. Die Behandlung kann durch Bürsten, Schleifen, Polieren, Strahlen oder Beizen erfolgen. Je feiner und glatter die Oberfläche, desto größer ist die Korrosionsbeständigkeit.

6.1 Bürsten

Zum Bürsten sind handelsübliche nichtrostende Stahlbürsten zu benutzen, die vorher nicht zur Reinigung anderer Werkstoffe verwendet wurden. Das Bürsten kann ausreichend sein, wenn sich dadurch vorhandene Oxidschichten und Schlackenreste völlig beseitigen lassen und eine metallisch blanke, saubere Oberfläche erzielt wird.

Hohe Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit erfordern ein anschließendes Beizen und ggf. Passivieren.

6.2 Schleifen und Polieren

Beim Beschleifen von Schweißnähten ist zu beachten, dass die Schleifwerkzeuge eisenfrei sind (Fremdrostgefahr) und nur für die Bearbeitung nichtrostender Stähle eingesetzt wer-

den. Die verwendete Körnung richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall und sollte beim Fertigschliff üblicherweise bei 180 bis 240 (und feiner) liegen. Es darf nicht mit zu hohem Anpressdruck gearbeitet werden. Nach Beendigung der Schleifarbeiten dürfen keine Anlauffarben und grobe Schleifriefen zurückbleiben.

Besonders glatte Oberflächen werden durch mechanisches Polieren oder Elektropolieren erzielt. In Sonderfällen, z.B. bei Gefahr von Spannungsrisskorrosion in chloridhaltigen Medien, sollte nach dem Schleifen gebeizt werden.

6.3 Strahlen

Beim Strahlen werden als Strahlmittel nichtrostender Stahl, Quarzsand, Glasperlen oder andere eisenfreie synthetische oder mineralische Strahlmittel verwendet. Die entstehende metallisch blanke, angeraute Oberfläche sollte anschließend bei hohen Anforderungen an die Korrosionssicherheit gebeizt, ggf. passiviert werden.

6.4 Beizen

Vor dem Beizen sind grobe Verunreinigungen sowie Fett und Ölreste vollständig zu entfernen. Das Beizen kann durch Tauchbeizen, Sprühbeizen oder Beizen mit Beizpaste oder Beizgel erfolgen. Im Einzelnen sind die Empfehlungen der Beizmittellieferanten zu beachten.

Nach dem Beizen ist eine sorgfältige Spülung mit Wasser vorzunehmen. Es ist darauf zu achten, dass keine Beizmittelrückstände z.B. in Spalten verbleiben, da diese Korrosionsschäden auslösen können.

Damit das mit Beize kontaminierte Spülwasser nicht ungeklärt in die Kanalisation gelangt, kann die gebeizte Schweißnaht mit einer Neutralisationspaste behandelt werden. Nachdem sich in dem aufgefangenen Spülwasser die Rückstände abgesetzt haben, kann das geklärte Wasser in die Kanalisation abfließen. Die Rückstände müssen (als Sondermüll) separat entsorgt werden.

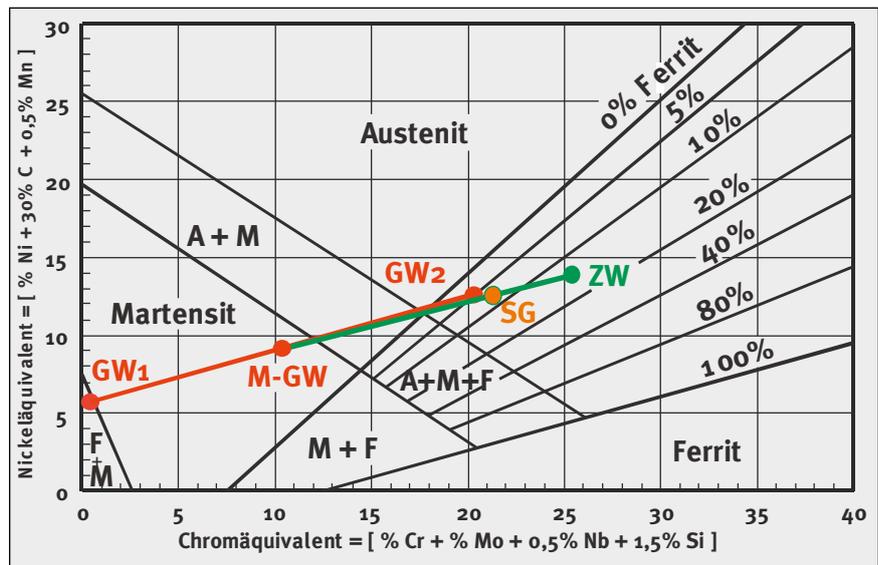


Bild 20: Schaefflerdiagramm mit den Äquivalenten der zu verschweißenden Grundwerkstoffe GW1 und GW 2 und dem Zusatzwerkstoff ZW, es wird ein Vermischungsgrad von 25% GW zu 75% Schweißzusatz angenommen

Bei hohen Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit kommt als Endbehandlung eine Passivierung in ca. 20%iger Salpetersäure in Betracht. Auch nach dem Passivieren ist eine sorgfältige Reinigung mit Wasser notwendig.

7 Artverschiedene Schweißverbindungen

Für Schmelzschweißverbindungen zwischen artverschiedenen Grundwerkstoffen wird der Schweißzusatz so ausgewählt, dass die Schweißnaht die an die Grundwerkstoffe gestellten Anforderungen erfüllt. Als Schweißprozesse werden hierfür vorwiegend das Lichtbogenhand- und Schutzgasschweißen eingesetzt.

Sind zwei unterschiedliche austenitische nichtrostende Stähle durch Schmelzschweißen miteinander zu verbinden (z.B. 1.4301 mit 1.4401), dann genügt im Allgemeinen der für den weniger hoch legierten Grundwerkstoff geeignete artgleiche Schweißzusatz.

Verbindungen zwischen einem austenitischen Stahl und dem ferritisch-austenitischen Stahl 1.4462 können mit den Schweißzusatztypen 22 9 3 NL oder 19 12 3 L ausgeführt werden.

Für Verbindungen von austenitischem Stahl mit ferritischem Chromstahl oder mit un- und niedriglegiertem Stahl mit nichtrostenden Stählen – letztere auch als „Schwarz-Weiß-Verbindungen“ bezeichnet – ist es wichtig, schweißbedingte Gefahren, wie z.B. Heißrisse oder Aufhärtungsrisse zu vermeiden. Eine Hilfestellung zur Auswahl eines geeigneten Schweißzusatzes bietet auch hier das Schaeffler-Diagramm.

Ein Beispiel soll die Vorgehensweise zur Bestimmung des geeigneten Schweißzusatzes verdeutlichen (Tabelle 13). Ein Baustahl der Qualität S355J2 soll mit einem austenitischen Stahl 1.4301 (X5CrNi18-10) verschweißt werden. Als Zusatz könnte eine Stabelektrode vom Typ E 23 12 L dienen.

Aus den vorhandenen Prüfbescheinigungen, empfohlen wird ein Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach DIN EN 10204, alternativ nach der mittleren Zusammensetzung nach der jeweiligen Norm wird entsprechend den Gewichtungsfaktoren (Multiplikator) das jeweilige Chrom- und Nickeläquivalent berechnet und in das Diagramm (Bild 20) eingetragen.

Wenn ohne Zusatzwerkstoff geschweißt wird, ergibt sich ein Schweißgut, das in etwa aus gleichen Anteilen der beiden Grundwerkstoffe besteht, Punkt mit M-GW. Dieser

Schweißzusatztyp	Stabelektrode DIN EN ISO 3581	Drahtelektrode, Schweißstab DIN EN ISO 14343	Fülldrahtelektrode DIN EN ISO 17633
Für geringen Aufmischungsgrad			
20 10 3 18 8 Mn	E 20 10 3 L E 18 8 Mn	G 19 12 3 G 18 8 Mn	T 18 8 Mn
Für höheren Aufmischungsgrad			
23 13 2 18 12 L	E 23 12 2 E 23 12 L	G 23 12 2 G 23 12 L	T 23 12L

Tabelle 12: Schweißzusätze für artverschiedene Verbindungen (Schwarz-Weiß-Verbindungen)

Werkstoff		Ferritbildner				Austenitbildner			Schaeffler	
Legierungselement		% Cr	% Mo	% Si	% Nb	% Ni	% C	% Mn	Cr _{eq}	Ni _{eq}
Multiplikator		X 1,0	X 1,0	X 1,5	X 0,5	X 1,0	X 30	X 0,5		
GW1	S355J2	–	–	0,31	–	–	0,22	1,30	0,47	7,25
GW2	1.4301	19,2	–	0,62	–	9,54	0,06	1,57	20,13	12,13
ZW	E 23 12 L	23,70	0,30	0,96	–	11,80	0,03	2,38	25,44	13,89

Tabelle 13: Ermittlung der Chrom- und Nickeläquivalente der zu verbindenden Grundwerkstoffe und eines zur Verfügung stehenden Zusatzwerkstoffes

Punkt liegt in dem Bereich mit einer Härterissgefahr (Martensit). Ein zu verwendender Zusatzwerkstoff soll das entstehende Schweißgut wieder in Bereiche zurückholen, in dem keine Gefahr droht, also in den Bereich des GW2. Der zur Verfügung stehende Zusatzwerkstoff weist hohe Chrom- und Nickeläquivalente auf. Geht man davon aus, dass das entstehende Schweißgut zu etwa 75 % aus Zusatzwerkstoff und zu 25 % aus der Grundwerkstoffmischung besteht, zeichnet man die Verbindungslinie zwischen den Punkten M-GW und ZW. Zur Ermittlung des resultierenden Schweißgutes wird diese Verbindungslinie M-GW - ZW entsprechend dem Hebelgesetz aufgeteilt. Es ergibt sich ein Gesamtschweißgut SG, das frei von den Gefahren der Heißrissbildung, der Härterissbildung und der Sigmaphasenbildung ist. Es steht eine Reihe von Zusatzstoffen zur Verfügung, die zusätzlich zu Nickel auch Mangan enthalten. Mangan wirkt in diesen Fällen sowohl als Austenitbildner als auch als Element zur stabilen Abbindung von Schwefel zu Mangan-Sulfid. Damit kann der Gefahr der Heißrissbildung noch zusätzlich entgegenge wirkt werden.

In der Praxis haben sich die in **Tabelle 12** aufgeführten Schweißzusätze bewährt. Für Verbindungen zwischen den ferritisch-austenitischen Stählen und un- bzw. niedriglegierten Stählen sind sowohl die Schweißzusätze

nach **Tabelle 12** als auch der Duplexschweißzusatz 22 9 3 N L geeignet.

Die Schweißzusätze sind in ihren Legierungsgehalten so abgestimmt, dass kein rissempfindliches Gefüge in der Naht entsteht, wenn das Verhältnis der aufgeschmolzenen Grundwerkstoffanteile zu dem abgeschmolzenen Schweißzusatz (Aufschmelzgrad) entsprechend begrenzt wird.

Für artverschiedene Verbindungen im bauaufsichtlichen Bereich dürfen Schweißzusätze und Schweißhilfsstoffe (z.B. Schutzgas, Schweißpulver) nur dann verwendet werden, wenn sie von einer hierfür bestimmten Stelle, z.B. vom Bundesbahn-Zentralamt Minden, zugelassen wurden.

8 Schweißen auf der Baustelle

Neben der Fertigung von Bauteilen, Behältern und Anlagen in der Werkstatt ist es erforderlich, Schweißarbeiten auf der Baustelle unter erschwerten Bedingungen auszuführen. In großem Umfang sind Baustellenschweißungen im Rohrleitungsbau – überwiegend an unlegierten Stählen – üblich und erforderlich. Nichtrostende Stähle

werden beim Bau von Chemieanlagen und Raffinerien auf der Baustelle geschweißt, ebenso im Stahlbau, z.B. bei der Errichtung von Großbehältern. Vorwiegend wird auf der Baustelle mit der Elektrodenhandschweißung gefügt, aber auch Schutzgasverfahren, wie WIG und MAG (siehe Abschnitt 3.1.2) werden eingesetzt.

Die Baustellenbedingungen, insbesondere die Wetterverhältnisse, können das Schweißen schwieriger gestalten als die eigentlichen Fügearbeiten an nichtrostenden Stählen. Dies gilt für alle Verfahren, besonders aber für das Schutzgasschweißen. Baustellenschweißungen verlangen auch häufiger als in der Werkstatt das Schweißen in Zwangspositionen (waagrecht an senkrechter Wand, Fallnähte, Steignähte, Überkopfnähte).

Es ist dafür zu sorgen, dass der Schweißer einen sicheren und festen Standplatz hat und die Schweißstelle weitgehend vor Zugluft und Nässe geschützt wird. Bei der Elektrodenhandschweißung müssen die umhüllten Elektroden trocken verschweißt werden, um Porenbildung durch Feuchtigkeit zu vermeiden. Zugluft beeinträchtigt vor allem das Schutzgasschweißen.

Die vorbereiteten Nahtstellen sind vor Schweißbeginn auf Sauberkeit

und metallisch blanke Oberfläche zu prüfen und gegebenenfalls mit Schleifmitteln, Bürsten und dergleichen nachzureinigen. Auch ein erneutes Entfetten kann notwendig sein. Nach dem Schweißen sind Anlauffarben auf und neben der Naht zu entfernen; hierfür kommen die gleichen Hilfsmittel in Frage. Alle diese Arbeiten muss der Schweißer vor Ort ausführen und dafür die geeigneten Arbeitsmittel griffbereit haben. An seine Zuverlässigkeit werden erhöhte Anforderungen gestellt. Wenn diese Vorsichtsmaßnahmen beachtet werden, lassen sich nichtrostende Stähle auf der Baustelle einwandfrei schweißen.

9 Betriebliche Voraussetzungen für das Schweißen nichtrostender Stähle (Herstellerqualifikationen)

Für den Bereich des Maschinenbaus gibt es keine gesetzlichen oder verpflichtenden normativen Regeln, wer schweißen darf. Zur Rechtssicherheit sollten aber auch diese Unternehmen die Regeln beachten, die für den „geregelten Bereich“ gelten. Dies sind insbesondere das Bauwesen und die Druckbehälter, geregelt sind aber auch der gesamte Bereich des Schienenfahrzeugbaus und des Schiffbaus einschließlich der Off-Shore-Bauwerke.

Im Mai 2017 und mit Aktualisierung im März 2018 wurde der Zulassungsbescheid des DIBt für das Schweißen im bauaufsichtlichen Bereich für fünf Jahre verlängert. In diesem Bescheid sind klare Regeln zum Schweißen von nichtrostenden Stählen festgelegt. Hierzu gehören Regularien für

die Unternehmen, für die zugelassenen Werkstoffe einschließlich der Zusatzwerkstoffe und Hinweise zur Bemessung.

9.1 Gütesicherung der Schweißarbeiten, Anforderungen an die Betriebe

Schweißarbeiten an tragenden Bauprodukten aus nichtrostenden Stählen dürfen nur von Betrieben ausgeführt werden, die über ein auf den Anwendungsbereich der nichtrostenden Stähle erweitertes Schweißzertifikat nach DIN EN 1090-1 in Verbindung mit DIN EN 1090-2 für die Ausführungsklasse (EXC) verfügen, die sich aus der Art der Bauteile, ihre Gefährdungseinstufung (Ausführungsklasse EXC) und dem Schweißprozess ergibt. Das Schweißzertifikat (nach DIN EN 1090-1:2012-02) gibt die Zuordnung der Bauteile zu den Ausführungsklassen EXC 1 bis EXC 4 entsprechend DIN EN 1993-1-1/NA an, sofern nichts anderes festgelegt ist.

Schweißarbeiten in der Ausführungsklasse EXC 1:

Nur Verbindungen der jeweils glei-



Bild 21: WIG-Schweißen auf der Baustelle

chen nichtrostenden Stähle miteinander sind zugelassen, und die Verwendung ist eingeschränkt auf Stähle mit den Werkstoffnummern 1.4301, 1.4307, 1.4541, 1.4401, 1.4404 und 1.4571 in der Festigkeitsklasse S235. Dies sind Stähle mit geringen Delta-Ferritanteilen und somit nicht anfällig für die Heißrissbildung.

Schweißarbeiten in der Ausführungsklasse ECX 2:

Mischverbindungen der nichtrostenden Stähle untereinander, unter Beachtung der Festigkeitsstufen und Schwarz-Weiß-Verbindungen aus unlegierten Baustählen bis einschließlich der Festigkeitsklasse S355 mit den nichtrostenden Stählen sind zulässig, wobei die Verwendung eingeschränkt ist auf nichtrostende Stähle mit den Werkstoffnummern 1.4301, 1.4307, 1.4541, 1.4401, 1.4404 und 1.4571 in der Festigkeitsklasse bis einschließlich S355.

Schweißarbeiten in den Ausführungsklassen EXC 3 oder EXC 4:

Verbindungen mit allen im bauaufsichtlichen Bereich zugelassenen Werkstoffen dürfen ausgeführt werden.

Alle Ausführungsklassen sind beschränkt auf die genannten Werkstoffkombinationen auf statische und quasistatische (vorwiegend ruhende) Beanspruchungen der Bauteile.

In einer Reihe von Anwendungen im Bauwesen werden auch nichtrostende Betonstähle verschweißt. In diesen Fällen müssen vom Betrieb die Normen DIN EN ISO 17660 in den Teilen 1 (tragende Schweißverbindungen) und 2 (nichttragende Schweißverbindungen) beachtet werden. Die Schweißaufsicht muss eine Zusatzqualifikation (siehe DVS Richtlinie 1708) erlangen. Die Schweißer müssen zusätzliche Prüfstücke mit Betonstahl schweißen, die in der Norm festgelegt sind.

9.2 Voraussetzungen für das Schweißen nichtrostender Stähle

Betriebseinrichtungen

Der Betrieb muss mit den für die Schweißarbeiten notwendigen Ein-

richtungen und Geräten nach DIN EN 3834-3:2006-3, Abschnitt 9, ausgestattet sein.

Angewandte Schweißprozesse

Für die geplanten Schweißarbeiten müssen die erforderlichen Gutachten vorliegen. Für das Lichtbogenschweißen müssen mit Ausnahme der Delta-Ferrithaltigen Stähle Verfahrensprüfungen nach DIN EN ISO 15614 vorhanden sein. Für die Verfahren des Widerstandspunktschweißen, Abtrennstumpfschweißen, Bolzenschweißen, Reibschweißen und die Strahlschweißverfahren mit dem Laser- oder Elektronenstrahl müssen immer Verfahrensprüfungen erbracht werden.

Schweißaufsichtspersonen

Die erforderliche Stufe der technischen Kenntnisse der Schweißaufsichtsperson ergibt sich nach Tabelle 15 von DIN EN 1090-2:2011-10. Die Schweißaufsichtsperson muss zusätzlich in einem Fachgespräch gegenüber einer notifizierten Stelle die erforderlichen Kenntnisse über das Schweißen und Verarbeiten von Bauteilen und Konstruktionen einschließlich der Schwarz-Weißverbindungen nachgewiesen haben. Die Erkenntnisse können als ausreichend angesehen werden, wenn die Schweißaufsichtsperson eine Ausbildung zum Schweißfachmann (grundlegende Kenntnisse), Schweißtechniker (spezielle Kenntnisse) resp. Schweißfachingenieur (vertiefte Kenntnisse) nach den Ausbildungsregeln des IIW absolviert hat.

9.3 Schweißerprüfung für nichtrostende Stähle

Mit der Ausführung von Schweißarbeiten dürfen nur entsprechend ausgebildete und geprüfte Schweißer und Bediener eingesetzt werden. Die Ausbildung richtet sich nach DIN EN ISO 9606-1 für Schweißer und DIN EN ISO 14732 für Bediener. Je nach Schweißaufgabe sind die Verbindungsarten (Stumpf- oder Kehlnaht) als einlagig oder mehrlagig in den erforderlichen Dickenbereichen zu schweißen. Die verwendeten Zusatzwerkstoffe legen fest, welche Grundwerkstoffe geschweißt werden dürfen. Die Einteilung der Grundwerk-

stoffe erfolgt nach ISO/TR 15608. Es sollte darauf geachtet werden, dass Grund- und Zusatzstoffe auch in der Kombination von praktischer Bedeutung sind. So macht es Sinn, mit einem austenitischen Zusatzwerkstoff (FM 5 – Schweißzusätze für nichtrostende und hitzebeständige Stähle) auch einen austenitischen Stahl oder ihre Kombination zu verschweißen.

10 Schrifttum

E. Folkhard

Welding Metallurgy of Stainless Steels

Springer Verlag, Wien 1988

Welding Handbook

Outokumpu Oyj, 2010

H. Orinig u. M. Richter

WRC-1992-Diagramm löst DeLong-Diagramm ab

Schweißen und Schneiden (1997), S.467-469

F.W. Strassburg u. H. Wehner

Schweißen nichtrostender Stähle

Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 67

DVS-Verlag, Düsseldorf, 4. Auflage, 2009

Die nachstehend aufgeführten **Richtlinien und Merkblätter des DVS** können in der jeweils gültigen Ausgabe von DVS-Mitgliedern kostenlos über das Internet bezogen werden. Die gedruckte Version ist zu beziehen über den Verlag:

DVS Media GmbH

Aachener Straße 172

40223 Düsseldorf

Tel.: 0211/1591-159

Fax: 0211/1591-150

Internet: www.dvs-media.info

DVS-Merkblatt 0901 (Dez. 1998)

Bolzenschweißprozesse für Metalle – Übersicht

DVS-Merkblatt 0917 (Okt. 2006)

Unterpulverschweißen austenitischer Stähle

DVS-Merkblatt 0920 (Juli 2004)

Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) - Allgemeine Übersicht

DVS-Merkblatt 0928 (Okt. 2006)
Unterpulverschweißen von Austenit-
Ferrit-Verbindungen

DVS-Merkblatt 0946 (Feb. 2004)
Empfehlungen zum Schweißen von
nicht rostenden austenitisch-ferriti-
schen Duplex- und Superduplex-
stählen

DVS-Merkblatt 0957 (Juli 2005)
Umgang mit umhüllten Stabelek-
troden – Transport, Lagerung und
Rücktrocknung

DVS-Merkblatt 2901-3 (Juni 2016)
Abtrennstumpf- und Pressstumpfs-
schweißen – Anwendungsbeispiele

DVS-Merkblatt 2903 (Okt. 1998)
Elektroden für das Widerstands-
schweißen

DVS-Merkblatt 2905 (Mai 2001)
Buckelschweißen von Stählen

DVS-Merkblatt 2916-ff
Prüfen von Widerstandspres-
schweißverbindungen
Teil 1: Zerstörende Prüfung, quasi-
statisch (März 2014)
Teil 2: Schwingfestigkeitsprüfung
(April 2009)
Teil 3: Zerstörende Prüfung, schlag-
artig (Jan. 2013)
Teil 4: Metallografische Prüfung
(Dez. 2006)
Teil 5: Zerstörungsfreie Prüfung von
Punktschweißverbindungen (Sept.
2017)

DVS-Merkblatt 1708 (Sept. 2009)
Voraussetzungen und Verfahren für
die Erteilung der Herstellerqualifi-
kation zum Schweißen von Betonstahl
nach DIN EN ISO 17660-1:2006-12
oder DIN EN ISO 17660-2:2006-12

11 Normen und Regelwerke

Die nachstehend aufgeführten Nor-
men können in der jeweils aktuell
gültigen Ausgabe bezogen werden bei:

Beuth-Verlag GmbH
Saatwinkler Damm 42/43
13627 Berlin

Tel.: +49 30 / 2601-1331
Fax : +49 30 / 2601-1260
E-Mail: kundenservice@beuth.de
Internet: www.beuth.de

DIN EN ISO 9606-1:2017-12
Prüfung von Schweißern – Schmelz-
schweißen
Teil 1: Stähle

prEN ISO 14174:2018-05
Schweißzusätze – Pulver zum Unter-
pulverschweißen und Elektroschla-
ckeschweißen – Einteilung

DIN EN ISO 14175:2008-6
Schweißzusätze – Gase und Misch-
gase für das Lichtbogenschweißen
und verwandte Prozesse

DIN 1910-100:2008-2
Schweißen und verwandte Prozesse
– Begriffe
Teil 100: Metallschweißprozesse mit
Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005

prEN 1011-3:2017-05
Schweißen – Empfehlungen zum
Schweißen metallischer Werkstoffe
Teil 3: Lichtbogenschweißen von
nichtrostenden Stählen

DIN EN ISO 3581:2018-03
Schweißzusätze –
Umhüllte Stabelektroden zum Licht-
bogenhandschweißen von nicht-
rostenden und hitzebeständigen
Stählen

DIN EN ISO 5182:2016-11
Widerstandsschweißen –
Werkstoffe für Elektroden und Hilfs-
einrichtungen

DIN EN ISO 5821:2010-4
Widerstandsschweißen –
Punktschweiß-Elektrodenkappen

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 korrosions-
beständigen Stählen für allgemeine
Anwendung

DIN EN 10088-3:2014-12
Nichtrostende Stähle –

Teil 3: Technische Lieferbedingungen
für Halbzeuge, Stäbe, Walzdraht,
gezogenen Draht, Profile und Blank-
stahlerzeugnisse aus korrosionsbe-
ständigen Stählen für allgemeine
Verwendung

DIN EN 10088-4:2010-01
Nichtrostende Stähle –
Teil 4: Technische Lieferbedingungen
für Blech und Band aus korrosions-
beständigen Stählen für das Bauwe-
sen

DIN EN 10088-5:2009-07
Nichtrostende Stähle –
Teil 5: Technische Lieferbedingungen
für Stäbe, Walzdraht, gezogenen
Draht, Profile und Blankerzeugnisse
aus korrosionsbeständigen Stählen
für das Bauwesen

DIN EN ISO 14343:2017-08
Schweißzusätze – Drahtelektroden,
Bandeletroden, Drähte und Stäbe
zum Lichtbogenschweißen von nicht-
rostenden und hitzebeständigen
Stählen – Einteilung

DIN CEN ISO/TR 15608:2013-8
Schweißen – Richtlinien für eine
Gruppeneinteilung von metallischen
Werkstoffen

DIN EN ISO 17633:2018-05
Schweißzusätze – Fülldrahtelektro-
den und Füllstäbe zum Metall-
Lichtbogenschweißen mit und ohne
Gasschutz von nichtrostenden und
hitzebeständigen Stählen – Einteilung

prEN ISO 17660-1:2017-11
Schweißen – Schweißen von Beton-
stahl – Teil 1: Tragende Schweißver-
bindungen

prEN ISO 17660-2:2017-11
Schweißen – Schweißen von
Betonstahl – Teil 2: Nichttragende
Schweißverbindungen

DIN EN 1090-2:2018-09
Ausführung von Stahltragwerken
und Aluminiumtragwerken – Teil 2:
Technische Regeln für die Ausfüh-
rung von Stahltragwerken

DIN EN ISO 14732:2013-12
Schweißpersonal-Prüfung von Bedie-
nern und Einrichtern zum mechani-
schen und automatischen Schwei-
ßen von metallischen Werkstoffen



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 102205
40013 Düsseldorf
www.edelstahl-rostfrei.de

