



Lasting Connections

Wissenshandbuch



Böhler Welding Wissenshandbuch

Lasting Connections

Als Pionier für innovative Schweißzusätze bietet Böhler Welding weltweit ein einzigartiges Produktportfolio für das Verbindungsschweißen. Die über 2.000 Produkte werden kontinuierlich an die aktuellen Industriespezifikationen und Kundenanforderungen angepasst, sind von renommierten Institutionen zertifiziert und somit für die anspruchsvollsten Schweißanwendungen zugelassen. „Lasting Connections“ ist die Markenphilosophie, sowohl beim Schweißen wie auf menschlicher Ebene – als zuverlässiger Partner für den Kunden.

Inhalt

Verfahrensorientierte Auswahl	6	Ferritische Chromstähle	62
Lichtbogenhandschweißung mit umhüllten Stabelektroden	6	Schweißen von ferritischen Cr-Stählen	62
Wolframinertgasschweißung (WIG-Verfahren)	9	Weichmartensitische Chrom-Nickel-Stähle	64
Metallschutzgasschweißung (MIG/MAG-Verfahren)	10	Schweißen von weichmartensitischen Cr-Ni-Stählen	65
Verbindungsschweißung mit Fülldrahtelektroden	14	Ferritbestimmung	66
Unterpulverschweißen mit Drahtelektroden	16	Grundlagen	66
Einteilung der Schutzgase nach EN ISO 14175	17	Ferritbestimmung	67
Schweißen von Fernrohrleitungen	18	Hitzebeständige Stähle	71
Schweißen mit zelluloseumhüllten Stabelektroden	18	Schweißen von hitzebeständigen Stählen	71
Schweißen mit basisch umhüllten Stabelektroden	20	Schweißen von Mischverbindungen	72
Schweißen mit basisch umhüllten Fallnahtelektroden	21	Schweißtechnologisch orientierte Aspekte	77
Schweißen mit Fülldrähten	22	Hinweise zur Vorwärmung von Werkstoffen	77
Schweißen bei niedrigen Außentemperaturen bzw. feuchter Witterung	23	Hinweise für Heftschweißungen	82
Keramische Schweißbadsicherungen	24	Hinweise zur Vermeidung von Schweißfehlern	83
Anwendungshinweise für den Praktiker	25	Wirtschaftlichkeit & Kalkulationshilfen	88
Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen	26	Abschätzung des Schweißzusatzbedarfs	88
Schweißen von hochfesten Stählen	30	Wirtschaftlichkeitsüberlegungen	96
Kaltzähe Stähle	32	Wasserstoffklasifizierung	98
Schweißen von kaltzähen Stählen	32	Härtevergleichstabelle	100
Schweißen von warmfesten Stählen	34	Schweißen von plattierten Erzeugnissen	102
Schweißtechnische Verarbeitung der warm- und hochwarmfesten Stähle	37	A. Plattierte Bleche/Werkstoffkombinationen	102
Schweißtechnologie	42	B. Anforderungen an die Verbindungsschweißung	102
Auswahl von Schweißzusätzen	43	C. Schweißzusätze	103
Mischverbindungen	46	D. Schweißprozesse	105
Nichtrostende Stähle	50	E. Wärmebehandlung	105
Hochlegierte Stähle und ihre typischen Eigenschaften	53	F. Fugenvorbereitung	106
Hochlegierte Stähle und ihre typischen Eigenschaften	57	G. Arbeitsfolge beim Schweißen beidseitig zugänglicher Nähte.	107
Austenitische Stähle und empfohlene Schweißzusätze	60		
Ferritische Stähle und empfohlene Schweißzusätze	61		
Duplex Stähle und empfohlene Schweißzusätze	61		
Martensitische und ausscheidungshärtende Stähle und empfohlene Schweißzusätze	61		

Verfahrensorientierte Auswahl

Ein wesentlicher Punkt in der Erstellung einer wirtschaftlichen Schweißverbindung ist die Auswahl des Schweißprozesses. Dieser Abschnitt versucht dazu, die verschiedenen Schweißverfahren kurz zu charakterisieren und die wesentlichen Vorteile und Nachteile herauszuarbeiten.

Lichtbogenhandschweißung mit umhüllten Stabelektroden

Beim Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden übernimmt die Umhüllung die Aufgabe, einerseits eine Schutzgasglocke und andererseits eine Schlacke zu bilden, um so den übergehenden Metalltropfen bzw. das Schweißgut vor Luftsauerstoffzutritt zu schützen. Hauptsächlich werden durch die Hülle die Schweißeigenschaften und die mechanischen Güterwerte des Schweißgutes vor allem bei Minustemperaturen beeinflusst. Weiterhin werden durch die Umhüllung die Positionsverschweißbarkeit, die Ausbringung und der Ausgleich des Abbrandes beeinflusst.

Es gibt drei Haupt-Umhüllungstypen: Rutil-, basisch- und zelluloseumhüllte Stabelektroden sowie ihre Mischtypen.

Rutilumhüllte Stabelektrode (R)

Dieser Umhüllungstyp ist der am häufigsten in der Praxis verwendete.

Der Grund liegt in einer Reihe von Vorteilen wie:

- Sehr stabiler Lichtbogen, dadurch leichte Handhabung für den Schweißer
- Gleich- und Wechselstrom schweißbar
- gute Zünd- und Wiedierzündeigenschaften
- geeignet für alle Schweißpositionen außer Fallnaht (PG) – in Abhängigkeit von der Umhüllungsdicke und vom Schweißguttyp (hochlegiert eingeschränkt in der Position steigend (PF) und überkopf (PD, PE))
- leichte Schlackenentfernbarkeit, feinschuppige und glatte Naht besonders bei dickumhüllten RR-Typen (bevorzugt für Kehlnähte und Decklagen)
- keine Rücktrocknung erforderlich (außer hochlegiert)

Die Nachteile der rutilumhüllten Stabelektroden sind:

- nicht einsetzbar für dickwandige und spannungsbehaftete Bauteile (über 20–25 mm)
- nicht ausreichende Kerbschlagzähigkeit bei Minustemperaturen
- höhere Wasserstoffgehalte (20 ml/100 g Schweißgut)
- nicht verwendbar für höhergekohlte Stähle ($C > 0,2 \%$)

Basisch umhüllte Stabelektrode (B)

Basisch umhüllte Stabelektroden zeichnen sich durch ihre exzellenten Zähigkeitseigenschaften, vor allem im Tieftemperaturbereich, aus.

Weitere Vorteile sind:

- extrem niedriger Wasserstoffgehalt ($< 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$).
- keine Einschränkung der Wanddicken
- Verwendbar für alle Schweißpositionen außer Fallnaht (PG), basische Fallnahtelektroden sind auch für diese Position geeignet
- auch für das Schweißen höhergekohlter Stähle ($C > 0,2 \%$) geeignet.

Nachteilig sind:

- Instabiler Lichtbogen, dadurch etwas schwierigere Handhabung für den Schweißer
- teilweise nur mit Gleichstrom verschweißbar
- ungünstigere Schlackenentfernbarkeit sowie grobschuppigere Nahtoberfläche
- Empfindlich gegenüber Feuchtigkeitsaufnahme, Basische Stabelektroden müssen vor dem Schweißen rückgetrocknet werden (außer hochlegiert). Vakuum- oder in Dosen verpackte Stabelektroden können ohne Rücktrocknung verschweißt werden, sollten aber nach dem Öffnen der Verpackung aus dem beheizten Köcher verschweißt werden.

Eine Sondervariante der basischen Stabelektrode ist die Doppelmantelektrode. Es handelt sich um eine Stabelektrode mit 2 Hüllen: die innere Hülle hat vorwiegend rutil Stoffe, die für einen feinen Tropfenübergang und einen sehr gut gerichteten Lichtbogen sorgen. Die äußere Hülle besteht vorwiegend aus basischen Stoffen, die eine gute (Kalt)-Zähigkeit und Rissicherheit des Schweißgutes gewährleisten.

Zelluloseumhüllte Stabelektrode (C)

Dieser Umhüllungstyp wurde speziell für die Fallnahtschweißung von Großrohrleitungen entwickelt. Durch den hohen Zelluloseanteil in der Umhüllung, entsteht ein Lichtbogen mit hoher Stabilität und Intensität. Dieser gewährleistet porenfreie Nähte, sowie eine sichere Wurzelersfassung auch bei hohen Schweißgeschwindigkeiten bzw. größeren Elektrodendurchmessern.

Die hohe Wirtschaftlichkeit ist auf die Verwendung von größeren Elektrodendurchmessern für die Wurzel-, Füll- und Decklagen zurückzuführen, die mit hohen Stromstärken und Schweißgeschwindigkeiten verarbeitet werden können. Wegen des hohen Wasserstoffgehaltes des Schweißgutes sind die Anwendungsmöglichkeiten hinsichtlich der Wanddicke und der erforderlichen Kerbschlagzähigkeit eingeschränkt.

Mischtypen (RC, RB)

Neben diesen drei wichtigen Grundtypen, gibt es eine große Anzahl sogenannter „Mischtypen“ wie z. B. RC- oder RB-Umhüllungen. Mit diesen versucht man, möglichst viele positive Eigenschaften in einer Stabelektrode zu vereinen. RB-Typen (Rutil mit basischen Anteilen) werden wegen ihrer guten Spaltüberbrückbarkeit und Zwangslageigenschaften gern für Wurzel- und Rohrschweißungen verwendet. RC-Typen sind universell und wegen ihrer Zellulose-Anteile in allen Schweißpositionen inklusiv Fallnaht (PG) verwendbar.

Umhüllte Stabelektroden sind universell an allen schweißgeeigneten Werkstoffen einsetzbar. Der Anlagenaufwand ist gering, allerdings ist aufgrund der geringen Abschmelzleistung die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens als niedrig einzustufen.

Wolframinertgasschweißung (WIG-Verfahren)

Beim WIG-Verfahren wird ein unter dem Schutz eines inerten Gases brennender Lichtbogen als Wärmequelle benutzt. Als Elektrode verwendet man reine Wolframstäbe oder legierte Wolframstäbe.

Das Schutzgas besteht aus Argon, Helium oder Argon-Helium-Gemischen. Das Schutzgas erfüllt hierbei mehrere Aufgaben. Es schützt die hocherhitzte Wolfram-Elektrode vor der Oxydation durch den Luftsauerstoff, kühlt dieselbe und ermöglicht die Bildung eines stabilen Lichtbogens. Gleichzeitig ist das flüssige Schmelzbad und der abschmelzende Zusatzdraht vor der Luftatmosphäre geschützt.

Der Schweißzusatz wird bei der WIG-Schweißung stromlos seitlich dem Schmelzbad zugeführt. Als Zusatzmaterial werden Stäbe von 1 m Länge für das Handschweißen und auf Rollen gespulte Drähte für das maschinelle WIG-Kaltdraht-Schweißen verwendet. Eine weitere Variante ist das WIG-Heißdraht-Schweißen, bei dem der zugeführte Zusatzdraht über eine elektrische Widerstandserwärmung zur Steigerung der Abschmelzleistung erhitzt wird.

Bei Stählen und Nickelbasislegierungen wird fast ausschließlich mit Gleichstrom, Minuspol an der Elektrode, geschweißt. Aus der nachfolgenden Tabelle ist zu ersehen, wie hoch die Wolfram-Elektroden, je nach Durchmesser, belastet werden können:

Elektroden Durchmesser [mm]	Schweißstrom [A]	
	Reine Wolframelektrode	Legierte Wolframelektrode
1,0	25–70	max. 80
1,6	50–110	15–150
2,4	80–160	50–220
3,2	120–220	80–320
4,0	150–300	120–400

Der Anwendungsbereich erstreckt sich auf das Schweißen von dünnen Blechen und hochwertige Wurzelschweißung an dickeren Blechen und Rohren.

Ein weiteres Einsatzgebiet ist das Schweißen von Nicht-Eisen-Metallen.

Metallschutzgasschweißung (MIG/MAG-Verfahren)

Das MIG/MAG-Verfahren ist eine maschinelle Schutzgasschweißung, bei der Lichtbogen zwischen der stromführenden Drahtelektrode und dem Werkstück unter Schutzgas brennt. Als Elektrode dient die maschinell von einer Rolle zugeführte Drahtelektrode, die im eigenen Lichtbogen abschmilzt.

Als Schutzgase werden beim MIG-Verfahren Argon, Helium oder Gemische aus diesen Gasen verwendet. Beim MAG-Verfahren kommen Schutzgase aus Argon mit Sauerstoffzusatz, Helium mit Sauerstoffzusatz, Kohlendioxid (CO₂) oder Gemische aus vorgenannten Gasen zur Anwendung. Das Schutzgas ermöglicht die Bildung eines stabilen Lichtbogens und schützt das flüssige Schmelzbad vor dem Zutritt der atmosphärischen Luft. Der Sauerstoffzusatz zu den Schutzgasen vermindert die Oberflächenspannung des Schmelzbades und führt zur Ausbildung einer flacheren Nahtoberfläche und guten Übergängen zu den Nahtflanken. Außerdem wird der Werkstoffübergang im Lichtbogen feintropfiger.

Die entstehenden Abbrände der Legierungsbestandteile werden durch entsprechende Überlegierung der Drahtelektroden ausgeglichen. Es ist unbedingt darauf zu achten, dass die Schweißstelle frei von Zugluft ist. Bei hohen Schweißgeschwindigkeiten und schnellem Pendeln muss man durch entsprechende Schutzgasmengen und Düsenformen für eine vollkommene Abschirmung des flüssigen Schmelzbades mit Schutzgas Sorge tragen. Als Stromquelle kommen nur Gleichstromumformer oder Gleichrichter in Betracht, wobei in der Regel der Pluspol an der Elektrode liegt.

Übersicht über die verschiedenen Lichtbogenarten beim MIG/MAG Schweißen

Lichtbogenart	Anwendung	Werkstoffübergang	Spritzerbildung	Bemerkungen
Kurzlichtbogen	Dünnblechbereich, Zwangslagen, Wurzelschweißungen	Im Kurzschluss, grobtropfig, Stromquelle	hoch, geringe Abschmelzleistung	Geringe Wärme-einbringung
Übergangslichtbogen	Mittlere Blechdicken, Zwangslagen	Werkstoffübergang z. T. im Kurzschluss	z. T. am Werkstück haftende Spritzer	Mittlere Leistung
Sprühlichtbogen	Mittlere und dicke Bleche in Position PA, PB	Feintropfiger Werkstoffübergang ohne Kurzschlüsse	Gering	Hohe Abschmelzleistung
Langlichtbogen (unter CO ₂ oder hohen Anteilen CO ₂ im Schutzgas)	Mittlere und dicke Bleche in Position PA, PB	Werkstoffübergang z. T. im Kurzschluss	z. T. am Werkstück haftende Spritzer	Hohe Abschmelzleistung
Impulslichtbogen	Großer Arbeitsbereich	Kurzschlussfrei, 1 Tropfen je Impuls	Sehr gering	Höhere Wärme-einbringung als im Kurzlichtbogen

Kurzlichtbogen

Das Schweißen mit dem Kurzlichtbogen erfolgt bevorzugt unter Verwendung von Drähten der Abmessung Ø 0,8–1,0 mm, zum Teil auch mit Ø 1,2 und 1,6 mm. Dieses Verfahren erfordert den Einsatz geeigneter Stromquellen mit veränderlicher Leerlaufspannung und zum Teil auch mit veränderlicher Kennlinie. Die Lichtbogenspannung liegt je nach Drahtdurchmesser zwischen 14 und 22 Volt bei Stromstärken von 60 bis 200 A.

Infolge des wesentlich kälteren Schweißbades lassen sich dünne Bleche ab 0,8 mm Dicke einwandfrei verschweißen. Wegen der ausgezeichneten Spaltüberbrückung und glatten Ausbildung der Wurzelrückseite findet dieses Verfahren auch für die Wurzelschweißung größerer Wanddicken und für die Zwangslagenschweißung Verwendung. Nachstehende Tabelle enthält Richtwerte für Stromstärken, Spannung, Drahtvorschub und Abschmelzleistung für den Kurzlichtbogen.

Drahtdurchmesser [mm]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Vorschub [m/min]	Abschmelzleistung [kg/h]
0,8	60–130	15–17	2,9–13,0	0,7–2,9
1,0	70–160	16–19	2,4–7,8	0,9–2,9
1,2	100–180	17–20	2,1–5,4	1,1–2,0

Übergangslichtbogen

Im Übergangslichtbogen erfolgt der Werkstoffübergang in unregelmäßiger Folge sowohl unter Kurzschlüssen als auch kurzschlussfrei. Dadurch erhöht sich die Neigung zu am Werkstück haftenden Spritzern. Aufgrund der höheren Leistung als beim Kurzlichtbogen wird der Übergangslichtbogen für die Füll- und Decklagen bei mittleren Blechdicken eingesetzt, teilweise auch zum Fallnahtschweißen. Nachstehende Tabelle enthält Richtwerte für Stromstärken, Spannung, Drahtvorschub und Abschmelzleistung für den Übergangslichtbogen.

Drahtdurchmesser [mm]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Vorschub [m/min]	Abschmelzleistung [kg/h]
0,8	110–140	18–22	6,0–9,0	1,3–1,9
1,0	130–180	18–24	5,0–7,5	1,7–2,5
1,2	170–240	19–26	5,0–7,5	2,4–3,6

Langlichtbogen

(nur unter CO₂ und Schutzgasen mit mehr als 20–25 % CO₂)

Als Langlichtbogen werden Tropfenübergänge bezeichnet, bei denen freie Übergänge mit Kurzschlussübergängen vermischt sind. Die Tropfen sind größer als beim Sprühlichtbogen. Ein Langlichtbogen entsteht beim Schweißen mit Kohlendioxid oder Argon-Mischgasen mit über 20 % Kohlendioxid. Da die Tropfenübergänge teils mit Kurzschlüssen übergehen, können größere Spritzverluste auftreten. Der Anwendungsbereich des Langlichtbogens ist im oberen Leistungsbereich mit dem Sprühlichtbogen vergleichbar. Im unteren bis mittleren Leistungsbereich kann er in vielen Fällen auch für Zwangspositionen eingesetzt werden. Vor allem mit dem CO₂-Lichtbogen können Fallnähte sicher geschweißt werden. Mit steigendem Kohlendioxidanteil im Schutzgas nimmt die Poren- und Einbrandsicherheit zu. Das Einsatzgebiet des Langlichtbogens beschränkt sich grundsätzlich auf das Schweißen von un- und niedriglegierten Stählen.

Sprühlichtbogen

(nur unter argonreichen Schutzgasen mit mehr als 80 % Argon)

Die Schweißungen mit dem Sprühlichtbogen werden vorwiegend mit Drähten der Abmessung Ø 1,0 bis 1,6 mm, zum Teil auch mit Ø 0,8; 2,0 und 2,4 mm durchgeführt. Das Hauptanwendungsgebiet liegt bei normalen Verbindungsschweißungen von Werkstücken über 4 mm Dicke und auf dem Gebiet der Auftragschweißung.

Die kleineren Drahtdurchmesser bringen trotz des höheren Drahtpreises wirtschaftliche Vorteile, da sich infolge der höheren spezifischen Strombelastung der Drahtelektrode (bis zu 300 A/mm²) die Abschmelzleistung bei gleicher Stromstärke und Lichtbogen-spannung merklich erhöht. Mischgase bewirken allgemein feintropfigeren Materialübergang und dadurch verbesserte Stabilisierung des Lichtbogens sowie verringerte Spritzerbildung. Das Spritzen kann außerdem noch durch Einhaltung der unteren Grenzwerte für die Lichtbogenspannung verringert werden.

Nachstehende Tabelle enthält Richtwerte für Stromstärken, Drahtvorschub und Abschmelzleistung bei verschiedenen Drahtdurchmessern für Kohlenstoff- und niedriglegierte Stähle. Beim Handschweißen wählt man Mittelwerte, beim maschinellen Schweißen dagegen die höheren Werte. Bei austenitischen Drahtelektroden ist die Stromstärke 10–15 % niedriger einzustellen.

Drahtdurchmesser [mm]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Vorschub [m/min]	Abschmelzleistung [kg/h]
0,8	140–190	22–26	4,0–15,0	2,1–3,7
1,0	170–260	23–27	3,5–12,0	2,4–4,0
1,2	220–320	25–30	2,5–10,0	2,8–4,6
1,6	260–390	26–34	2,0–6,0	3,2–6,2
2,4	340–490	30–36	2,5–3,5	3,2–8,0
3,2	400–580	34–38	1,2–2,2	4,5–8,5

Eine Erweiterung der Anwendung beim Schweißen mit dem Sprühlichtbogen ist das Schweißen mit Zusatz von stromlosem Kaltdraht. Dem Lichtbogen wird ein zweiter stromloser Draht mit Ø 1,6 mm oder Ø 2,4 mm seitlich zugeführt. Die Abschmelzleistung wird bis zu 80 % erhöht, die Abbrandverluste und der Einbrand werden wesentlich verringert. Dies ist bei Auftragschweißungen von Vorteil. Auch beim Auffüllen großer Nahtquerschnitte hat sich dieses Verfahren bewährt.

Impulslichtbogen

Mit dem Impulslichtbogen kann eine kurzschlussfreie, spritzerarme Tropfenablösung von der Drahtelektrode erzielt werden. Das wird auch bei kleinen Lichtbogenleistungen erreicht, die sonst zu Kurzlichtbogen (evtl. auch Langlichtbogen) und somit zu Kurzschlüssen mit Spritzerbildung führen.

Der Schweißstrom hat einen impulsförmigen Verlauf, wobei folgende Vorgänge beim Schweißen ablaufen:

- Der Lichtbogen brennt bei kleiner Grundstromstärke und schmilzt Drahtelektrode und Grundwerkstoff an.
- Ein erhöhter Impulsstrom überlagert den Grundstrom und löst einen oder mehrere Tropfen ab, die kurzschlussfrei in das Schweißbad übergehen.
- Die Stromstärke fällt wieder auf Grundstromstärke ab, der Lichtbogen brennt bis zum nächsten Stromimpuls.
- Mit der Impulsfrequenz kann die Tropfenanzahl gezielt gesteuert werden.

Die Impulslichtbogentechnik ermöglicht den Einsatz dickerer und damit leichter förderbarer Drahtelektroden. Je nach Anwendungsfall – dünnere (ab 2 mm) oder dickere Bleche – Wurzel-, Füll- oder Decklagenschweißung – Zwangspositionen – können durch Änderung der Impulsfrequenz optimale Einstellparameter, bei spritzerfreiem Tropfenübergang, geschaffen werden.

Als Schutzgase sind argonreiche Mischgase mit maximal 18 % Kohlendioxidanteil einsetzbar. Die besonderen Vorzüge des Impulslichtbogens ergeben sich bei den Werkstoffen Aluminium, Nickel sowie bei korrosionsbeständigen Chrom- bzw. Chrom-Nickel (Molybdän)-Stählen. Aufgrund der gezielten Wärmeführung ist auch das Schweißen an hochfesten Feinkornbaustählen oder kaltzähnen Stählen vorteilhaft.

Nachstehende Tabelle enthält Richtwerte für Stromstärken, Spannung, Drahtvorschub und Abschmelzleistung für den Impulslichtbogen.

Drahtdurchmesser [mm]	Stromstärke [A]	Spannung [V]	Vorschub [m/min]	Abschmelzleistung [kg/h]
1,0	80–280	20–32	3,0–18,0	1,0–6,0
1,2	100–340	22–35	2,0–12,0	0,9–5,8

Schutzgase

Die Wahl der Schutzgase wird durch die Legierung der zu verschweißenden Werkstoffe und die Anforderungen, die man hinsichtlich Nahtgüte und Spritzerfreiheit stellt, bestimmt. Kohlendioxid (CO₂) wird vorwiegend für das Verschweißen unlegierter Baustähle und für Verschleißpanzerungen benutzt.

Mischgase werden bevorzugt für das Schweißen unlegierter und niedriglegierter Stähle, wie z. B. warmfester Stähle im Kessel- und Rohrleitungsbau verwendet. Die hohe Nahtgüte, guter gleichmäßiger Einbrand und weitgehende Spritzerfreiheit erfüllen die Anforderungen, die an hochwertige Schweißungen gestellt werden.

Argon mit Sauerstoffzusatz von 1–5 % oder CO₂-Anteile von 2–3 % werden vor allem für das Schweißen von hochlegierten ferritischen und austenitischen Schweißzusätzen eingesetzt. Im Vergleich zu Mischgasen und Kohlendioxid sind die Abbrandverluste der Legierungsbestandteile niedriger, der Werkstoffübergang ist sehr feintropfig und nahezu spritzerfrei.

Verbindungsschweißung mit Fülldrahtelektroden

Das Schweißen mit Fülldrahtelektroden ist ein Metall-Lichtbogenschweißprozess mit abschmelzender Drahtelektrode. Während Massivdrähte je nach Wahl der Schweißparameter stets ein ähnliches Abschmelzverhalten aufweisen, werden die Schweißeneigenschaften bzw. die Abschmelzleistung, Positionseignung sowie die mechanischen Güterwerte des Schweißgutes bei Anwendung von Fülldrahtelektroden stark von der Pulverfüllung und Herstellart beeinflusst.

Nach der Herstellungsart unterscheiden wir zwischen formgeschlossenen und vollverschlossenen Fülldrähten. Bei formgeschlossenen Fülldrähten wird der Mantel mechanisch im Überlapp- oder Stumpfstoß mechanisch geschlossen. Vollverschlossene Fülldrähte werden entweder durch das Füllen vorgefertigter Rohre oder durch Verschweißen nach dem Füllen hergestellt.

Die drei Varianten haben jeweils besondere Eigenschaften, die je nach Einsatzbedingungen und Anforderungen genutzt werden können.

Nach der Art des Gasschutzes unterscheidet man gasgeschützte Fülldrahtelektroden, die mit Schutzgas verschweißt werden und selbstschützende Fülldrahtelektroden, die durch den Lichtbogen ihr Schutzgas aus Elementen der Füllung selbst erzeugen.

Bei den gasgeschützten Fülldrahtelektroden unterscheiden wir: Metallpulverfülldrähte (133; 138) und rutil oder basische schlackeführende Fülldrahtelektroden (132; 136).

Das Portfolio an Fülldrahtelektroden deckt fast den gesamten Bereich schweißbarer Stähle und Nickellegierungen ab.

Fülldraht Schweißprozesse nach EN ISO 4063

132	Metall – Inertgasschweißen mit schweißpulvergefüllter Drahtelektrode
133	Metall – Inertgasschweißen mit metallpulvergefüllter Drahtelektrode
136	Metall – Aktivgasschweißen mit schweißpulvergefüllter Drahtelektrode
138	Metall – Aktivgasschweißen mit metallpulvergefüllter Drahtelektrode
114	Metall – Lichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode ohne Gasschutz

Die Füllung der Metallpulver-Fülldrahtelektroden besteht im Wesentlichen aus Metall-Legierungen, Eisenpulver und lichtbogenstabilisierenden Elementen. Die Oberfläche der Schweißnaht ist schlackefrei, vereinzelte Silikat- und Oxidinseln sind in Abhängigkeit vom Schutzgas und dem Grundwerkstoff möglich. Der Werkstoffübergang ist feintropfig und spritzerarm. Die Strombelastbarkeit und die Abschmelzleistung sind hoch. Der Lichtbogen ist breit und stabil und hat eine sehr gute Spaltüberbrückbarkeit. Metallpulverfülldrähte können mit allen Lichtbogenarten, wie Kurz-, Sprüh- oder Pulslichtbogen verarbeitet werden. Sie eignen sich gut für alle MSG-Hochleistungsprozesse. Die bevorzugten Schweißpositionen sind PA, PB und PC.

Die Füllung der schlackeführenden Fülldrahtelektroden besteht aus schlackebildenden Stoffen, Metall-Legierungen, Eisenpulver und lichtbogenstabilisierenden Elementen.

Bei den rutilen Fülldrahtelektroden unterscheiden wir 2 Typen nach dem Erstarrungsverhalten der Schlacke:

- schnell erstarrend – P-Typ für alle Positionen außer Fallnaht
- langsam erstarrend – R-Typ für die Positionen PA, PB und PC; (nach EN ISO 17632-A)

Der Lichtbogen der rutilen Fülldrahtelektroden ist weich und sehr stabil, der Werkstoffübergang ist feintropfig und spritzerarm. Für hochlegierte rutilen Fülldrahtelektroden kann als Schutzgas auch M21 verwendet werden. Wegen der Schutzwirkung der Schlacke beim Tropfenübergang besteht kein Risiko zur Aufkohlung des Schweißguts. Rutilen Fülldrahtelektroden schweißen nur im Sprühlichtbogenbereich, eine Wurzelschweißung ist nur mit Badsicherung möglich. Die schnell erstarrende Schlacke der P-Typen hat eine Stützwirkung für das Schmelzbad. Dadurch ist die Verwendung hoher Stromstärken auch in Steig- und Überkoppositionen möglich.

Basische Fülldrahtelektroden können ebenfalls in allen Positionen verschweißt werden, allerdings ist keine Stützwirkung der dünnflüssigen Schlacke vorhanden, so dass Zwangslagen (PF, PD, PD) nur eingeschränkt mit reduzierter Stromstärke möglich sind. Der Werkstoffübergang ist fein- bis mitteltropfig, Wurzelschweißungen sind mit und ohne Badsicherung möglich. Der hauptsächliche Vorteil dieser Fülldrahtelektroden liegt in dem rissicheren und zähen Schweißgut, auch bei niedrigen Betriebstemperaturen. Dadurch sind unbegrenzte Wanddicken verschweißbar.

Unterpulverschweißen mit Drahtelektroden

Bei der UP-Schweißung wird ein Schweißzusatz (Draht, Band oder Fülldraht) und ein nichtmetallischer Hilfsstoff, das Schweißpulver, benötigt. Es prägt über das Schmelzverhalten und verschiedene physikalische Eigenschaften wie Viskosität, Oberflächenspannung, Dichte, thermische Ausdehnung und elektrische Leitfähigkeit das Nahtaussehen, die Schlackenentfernbarkeit und durch metallurgische Reaktionen die mechanisch technologischen Eigenschaften des Schweißguts.

Nach Art der Herstellung unterscheidet man zwischen erschmolzenen und agglomerierten Pulvern. Erschmolzene Pulver, Kennbuchstabe F (fused, werden durch Erschmelzen im Lichtbogenofen und anschließendes Abschrecken hergestellt. Sie sind homogen, feuchtigkeitsunempfindlich, abriebfest. Sie werden charakterisiert durch eine beschränkte metallurgische Reaktionsfähigkeit, hohes Schüttgewicht und schlechtere Schlackenentfernbarkeit.

Agglomerierte Pulver, Kennbuchstabe A (agglomerated), werden durch Agglomerieren und anschließendes Trocknen im Drehrohrföfen produziert. Sie haben eine sehr gute metallurgische Reaktionsfähigkeit, geringes Schüttgewicht und gute Schlackenentfernbarkeit. Sie bieten sehr gute Zulegerungsmöglichkeiten, sind aber empfindlicher gegenüber Feuchtigkeitsaufnahme und Abrieb. Geeignete Inhaltsstoffe können Risiken dieser Eigenschaften aber auf ein Minimum reduzieren.

Nach dem Basizitätsgrad werden die Schweißpulver in saure, neutrale und basische Schweißpulver eingeteilt. Der Basizitätsgrad B errechnet sich (nach Boniszewski) aus dem Verhältnis der basischen Bestandteile (CaO, CaF₂, MgO, MnO) zu den sauren Bestandteilen (SiO₂, TiO₂, ZrO₂) des Pulvers.

Ist B < 1 spricht man von einem sauren Schweißpulver (saure Bestandteile überwiegen), bei einem Wert zwischen 1 und 1,2 ist es ein neutrales, darüber ein basisches Schweißpulver und für B > 2 ein hochbasisches Schweißpulver.

Nach den überwiegenden Hauptbestandteilen gibt es folgende Pulvertypen:

- Mangansilikat-Typen (MS), überwiegend MnO und SiO₂
- Calziumsilikat-Typen (CS), überwiegend CaO, MgO und SiO₂
- Aluminat-Rutil-Typen (AR), überwiegend Al₂O₃ und TiO₂
- Aluminat-basisch (AB), überwiegend Al₂O₃, CaO und MgO
- Fluorid-basisch (FB), überwiegend CaO, MgO, MnO und CaF₂

Darüber hinaus sind in der EN ISO 14174 noch weitere Pulvertypen definiert. Jeder Pulvertyp hat verschiedene spezifische Eigenschaften, die bei der Auswahl für den praktischen Einsatz entsprechend zu berücksichtigen sind. Schnellschweißpulver, Tieftemperaturpulver, Pulver mit hoher Strombelastbarkeit, Mehrdrahteignung, Lage/Gegenlageeignung usw. sind nur einige Stichworte. Die charakteristischen Eigenschaften eines Pulvers und die typischen Einsatzbereiche der Draht/Pulver- und Fülldraht/Pulver-Kombinationen sind in den Produkt Datenblättern detailliert beschrieben.

Einteilung der Schutzgase nach EN ISO 14175

Symbol	Komponenten in Vol.-%							Übliche Anwendung	Bemerkungen
	Untergruppe	oxidierend		inert		reduzierend	reaktionsträge		
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂		
I	1			100				MIG, WIG, Plasmaschweißen Wurzelschutz	inert
	2				100				
	3			Rest ^a	0,5–95				
M1	1	0,5–5		Rest ^a		0,5–5		MAG	schwach reduzierend
	2	0,5–5		Rest ^a					
	3		0,5–3	Rest ^a					
	4	0,5–5	0,5–3	Rest ^a					
M2	0	5–15		Rest ^a					
	1	15–25		Rest ^a					
	2		3–10	Rest ^a					
	3	0,5–5	3–10	Rest ^a					
	4	5–15	0,5–3	Rest ^a					
	5	5–15	3–10	Rest ^a					
	6	15–25	0,5–3	Rest ^a					
7	15–25	3–10	Rest ^a						
M3	1	25–50		Rest ^a					
	2		10–15	Rest ^a					
	3	25–50	2–10	Rest ^a					
	4	5–25	10–15	Rest ^a					
	5	25–50	10–15	Rest ^a					
C	1	100						stark oxidierend	
	2	Rest	0,5–30						
R	1			Rest ^a		0,5–5		WIG, Plasmaschweißen Plasmaschneiden, Wurzelschutz	reduzierend
	2			Rest ^a		15–50			
N	1						1,0	Plasmaschneiden Wurzelschutz	reduzierend reaktionsträge
	2			Rest ^a			0,5–5		
	3			Rest ^a			5–50		
	4			Rest ^a		0,5–10	0,5–5		
	5					0,5–50	Rest		
O	1		100					Plasmaschneiden	stark oxidierend
Z	Mischgase mit Komponenten, die nicht in der Tabelle aufgeführt sind oder Mischgase mit einer Zusammensetzung außerhalb der angegebenen Bereiche. ^b								

^a Für diese Einteilung darf Argon teilweise oder vollständig durch Helium ersetzt werden.

^b Zwei Mischgase mit derselben Z-Einteilung dürfen nicht gegeneinander ausgetauscht werden.

Schweißen von Fernrohrleitungen

Erdöl und Erdgas sind derzeit noch immer die wichtigsten Energieträger. Weltweit bestehen bereits unzählige Transportleitungen oder befinden sich im Projektierungsstadium. Die Entwicklung neuer höherfester Rohrstähle stellt dabei immer größere Anforderungen an die Schweißtechnologie. Dank unserer speziell entwickelten Schweißzusatzwerkstoffe, die auf die einzelnen Rohrwerkstoffe bestens abgestimmt sind, können wir diesen erhöhten Anforderungen sowie den strengen Sicherheitsbestimmungen voll entsprechen.

Sehr oft werden die Rohrrundnähte mit zelluloseumhüllten Stabelektroden in fallender Schweißposition ausgeführt. Diese Methode ermöglicht das Schweißen mit größerem Elektrodendurchmesser, höheren Stromstärken sowie höheren Schweißgeschwindigkeiten. Dadurch ergeben sich wesentliche wirtschaftliche Vorteile im Vergleich zur sonst gebräuchlichen Steignachtschweißung mit Rutil- oder basisch umhüllten Stabelektroden. Für eine einwandfreie Durchführung einer Rohrschweißung mit Zelluloseelektroden sind jedoch speziell ausgebildete Schweißer notwendig, da sich diese Schweißmethode wesentlich von der Steignachtschweißung unterscheidet. Des Weiteren sind Schweißmaschinen zu verwenden die für die Fallnahtschweißung geeignet sind.

Das Schweißen mit basisch umhüllten Stabelektroden wird sowohl für die steigende als auch fallende Schweißposition im Anschluss an den Abschnitt „Schweißen mit zelluloseumhüllten Stabelektroden“ behandelt.

voestalpine Böhler Welding verfügt auch über ein komplettes Programm von Qualitäten für ausgesprochene Tieftemperaturbeanspruchung.

Bei Drähten für die Schutzgas- und UP- Schweißung bitten wir um gesonderte Anfrage.

Schweißen mit zelluloseumhüllten Stabelektroden

Bezeichnung	AWS A5.1 AWS A5.5	Verwendung für Pipelinestähle nach API Spec. 5 L
BÖHLER FOX CEL	E6010	A, B, X 42, X 46, X 52, X 56, (X 60, X 65, X 70, X 80*)
BÖHLER FOX CEL +	E6010	A, B, X 42, X 46, X 52, X 56, (X 60, X 65, X 70, X 80*)
BÖHLER FOX CEL 70-P	E7010-P1	X 52, X 56, X 60
BÖHLER FOX CEL 75	E7010-P1	X 52, X 56, X 60
BÖHLER FOX CEL Mo	E7010-A1	X 52, X 56, X 60
BÖHLER FOX CEL 80-P	E8010-P1	X 56, X 60, X 65, X 70
BÖHLER FOX CEL 85	E8010-P1	X 56, X 60, X 65, X 70
BÖHLER FOX CEL 90	E9010-P1	X 65, X 70, X 80

*Nur für die Wurzelschweißung

Auf die besondere Eignung der Elektroden BÖHLER FOX CEL für die Wurzelschweißung auch bei höherfesten Rohrstählen sei besonders hingewiesen. Die von voestalpine Böhler Welding ausgearbeitete Schweißtechnologie, durch Verwendung der BÖHLER FOX CEL für die Wurzel unabhängig vom Rohrwerkstoff, sowie für die weiteren Lagen dem Rohrwerkstoff angepassten Festigkeitsklassen der Zusatzwerkstoffe, der sogenannten „Kombinationsmethode“ gibt höchste Sicherheit gegen Risse.

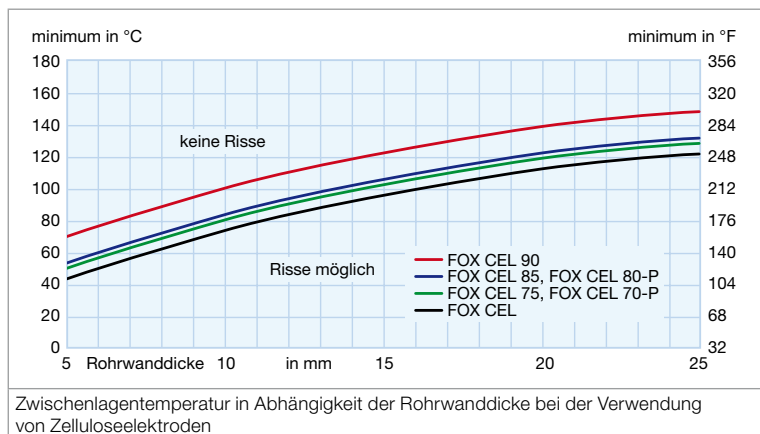
Eine sorgfältige Nahtvorbereitung ist zur Erzielung einwandfreier Schweißverbindungen von großer Bedeutung. Mit brenngeschnittenen Kanten können Toleranzen meist nicht eingehalten werden. In der Praxis werden die Rohrenden im Allgemeinen durch spanabhebende Bearbeitung vorbereitet. Zur Vermeidung von Poren und Bindefehlern müssen die Nahtflanken frei von Fremdmaterial, wie Öl, Schmiermittel, Zunder und Schmutz sein. Ebenso stören Riefen und Kerben die Handhabung der Elektroden, im Besonderen bei der Wurzelschweißung. Für Rohre mit kleinerem Durchmesser (bis zu 250 mm) wird die Elektrode BÖHLER FOX CEL Ø 2,5 oder Ø 3,2 mm für die Wurzelschweißung empfohlen.

Vorwärmen und Zwischenlagentemperatur

Durch die Vorwärmung und der Einhaltung einer entsprechenden Zwischenlagentemperatur wird die Effusion von Wasserstoff begünstigt bzw. beschleunigt und dadurch einer möglichen Bildung von wasserstoffinduzierten Unternahrissen oder Querrissen entgegengewirkt. Wasserstoffinduzierte Unternahrisse können primär in der WEZ der Wurzellage auftreten.

Eine erhöhte Gefahr besteht beim Schweißen von aufhärtungsempfindlichen Stählen. Die Rohrenden sind dementsprechend vorzuwärmen. Beim Einsatz von TM- Stählen treten Unternahrisse jedoch nur sehr selten auf. Wasserstoffinduzierte Querrisse können primär im Schweißgut unsachgemäß verarbeiteter hochfester CEL- Elektroden auftreten. Die Einhaltung einer entsprechenden Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur ist unumgänglich um die Rissbildung zu vermeiden. Weiters kann in Abhängigkeit von der Höhe der Temperatur und der chemischen Zusammensetzung des Stahles die Aufhärtung in der wärmebeeinflussten Zone verringert werden.

Die Zwischenlagentemperatur beeinflusst auch die metallurgischen Prozesse, die während der Erstarrung und Abkühlung ablaufen und hat damit einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Schweißguts. Es wird empfohlen, die Zwischenlagentemperatur auch bei der Verwendung von basisch umhüllten Stabelektroden während des Schweißens auf mindestens 80 °C zu halten sofern nicht für den Grundwerkstoff sowieso eine höhere Temperatur notwendig ist.



Schweißen mit basisch umhüllten Stabelektroden

In einigen Ländern wird im Pipelinebau aus verschiedenen Gesichtspunkten die Verwendung von basisch umhüllten Stabelektroden jener von zelluloseumhüllten vorgezogen. Für das Schweißen von sehr dicken, aufhärtungsempfindlichen Stählen über 25 mm wird allgemein der Einsatz von basischen Elektroden empfohlen. Der Grund dafür ist der sehr niedrige Wasserstoffgehalt dieser Elektrodentypen.

Die hohe Wärmeableitung bei größeren Wanddicken und dem gleichzeitigen Vorhandensein höherer Wasserstoffgehalte verstärkt bei zelluloseumhüllten Stabelektroden die Gefahr der Bildung von Rissen.

Steignachtschweißung. In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung bzw. der Aufhärtungsneigung des Rohrwerkstoffes ist bei dicken Rohren auch bei der Verwendung von basisch umhüllten Stabelektroden eine Vorwärmung von 150–200 °C vorzunehmen.

Es kommen bevorzugt basisch umhüllte Stabelektroden der Typen FOX EV 50 (E7018-1), FOX EV 60 (E8018-C3), FOX EV 65 (E8018-G), FOX EV 70 (E9018-G), und vor allem die speziell für die Rohrschweißung optimierten FOX EV Pipe (E7016-1), FOX EV 60 Pipe (E8016-G) und FOX EV 70 Pipe (E9016-G) zum Einsatz.

Es ist darauf zu achten, dass die Elektroden vor Feuchtigkeit geschützt werden. In Dosen verpackte Elektroden können nach Öffnen der Dosen innerhalb von 8 Stunden ohne Rücktrocknung verarbeitet werden. Elektroden von bereits geöffneten Schachteln müssen den Vorschriften entsprechend vor der Verwendung 2 Stunden bei 300–350 °C rückgetrocknet werden.

Die Wurzellage wird in der Regel mit Elektroden der Abmessung Ø 2,5 mm, bzw. bei Anwendung der FOX EV Pipe Serie mit Ø 3,2 mm eingebracht um eine einwandfreie Durchschweißung zu erreichen. Geschweißt wird in steigender Position bei einem Wurzelspalt von 2–3 mm und einer Steghöhe von 2–2,5 mm. Das Schweißen der Füll- und Decklagen wird meist mit Elektroden der Abmessung Ø 3,2 und 4 mm durchgeführt, wobei zur Vermeidung von Poren die Schweißstelle vor Wind, Regen etc. geschützt werden muss.

Bei der Steignachtschweißung mit basisch umhüllten Stabelektroden ist der Zeitaufwand gegenüber der Fallnahtschweißung relativ hoch. Damit ist natürlich auch eine gewisse Wirtschaftlichkeitseinbuße verbunden. Es wurden deshalb basisch umhüllte Fallnahtelektroden für die Füll- und Decklagenschweißung entwickelt.

Schweißen mit basisch umhüllten Fallnahtelektroden

Bezeichnung	AWS A5.5	Verwendung für Pipelinestähle nach API Spec. 5 LX
BÖHLER FOX BVD 85	E8045-P2	A, B, X 42 – X 65
BÖHLER FOX BVD 90	E9045-P2(mod.)	X 70, X 80
BÖHLER FOX BVD 100	E10045-P2(mod.)	X 80
BÖHLER FOX BVD 110	E11018-G	X 100
BÖHLER FOX BVD 120	E12018-G	X 110

Die voestalpine Böhler Welding hat Mitte der 70er Jahre mit der Entwicklung basischer Fallnahtelektroden (BVD = basic- vertical -down) begonnen. Auslösend dafür war der Wunsch, höherfeste TM- Rohrstähle mit relativ hoher Zähigkeit (z. B. X80), einzusetzen. Die Anforderung an die Kaltrissicherheit und Zähigkeitseigenschaften des Schweißgutes waren mit Zelluloseelektroden nur bedingt oder zum Teil nicht mehr zu erfüllen.

Die Wirtschaftlichkeit wird im hohen Masse durch die erzielbare Abschmelzleistung und durch die möglichen Schweißgeschwindigkeiten geprägt. Die mit basischen Fallnahtelektroden erreichbare Schweißgeschwindigkeit ist im Allgemeinen höher als bei Zelluloseelektroden. Im Vergleich zu basischen Steignahtelektroden sind eklatante Zeitvorteile von 40–50 % bei der Verwendung von basischen Fallnahtelektroden für die Füll- und Decklagen erreichbar.

Schweißen mit Fülldrähten

Die Verwendung von Fülldrähten für Füll- und Decklagen erlangt bei der Schweißung von Rohrleitungen aus wirtschaftlichen Gründen immer mehr an Bedeutung.

Grundsätzlich sind diese Fülldrähte in zwei Gruppen zu unterteilen.

Gasgeschützte Rutile Fülldrähte für die halb- oder vollautomatische Pipelineschweißung in der Steignahtposition.

Bezeichnung	AWS A5.36	Verwendung für Pipelinestähle nach API Spec. 5 L
BÖHLER Ti 52 T-FD	E71T1-M21A4-CS1-DH8	X 42 – X 65
BÖHLER Ti 60 T-FD	E81T1-M21A8-Ni1-H4	X 42 – X 70
BÖHLER Ti 70 Pipe T-FD	E91T1-M21A6-K2-H4	X 52 – X 80
BÖHLER Ti 75 T-FD	E101T1-M21A4-K2-H4	X 70, X 80
BÖHLER Ti 80 T-FD	E111T1-M21A8-GH4	X 80, X 100

Ein großer Vorteil dieser Typen liegt darin, dass man mit einer Parametereinstellung in allen Positionen schweißen kann. Bei der vollautomatisierten Schweißung sind nur einfache Vorschubgeräte mit Pendelvorrichtung notwendig. Durch die Stützwirkung der schnell erstarrenden Schlacke ist die Verwendung von relativ hohen Stromstärken möglich und somit können hohe Abschmelzleistungen erreicht werden.

Selbstschützende Fülldrähte für die manuelle Schweißung in der Fallnahtposition.

Bezeichnung	AWS A5.36	Verwendung für Pipelinestähle nach API Spec. 5 L
BÖHLER Pipeshield 71T8-FD	E71T8-A4-K6	X 42 – X 60 (X 65, X 70)
BÖHLER Pipeshield 71.1T8-FD	E71T8-A4-Ni1	X 42 – X 70
BÖHLER Pipeshield 81T8-FD	E81T8-A4-Ni2	X 65 – X 70
BÖHLER Pipeshield 91T8-FD	E91T8-A4-G	X 80

Vom Namen abgeleitet wird diese Art von Fülldrähten ohne externes Schutzgas verschweißt. Der entsprechende Schutz des Schmelzbades gegen äußere Einflüsse erfolgt über die Füllung. Der Drahtdurchmesser beträgt 2,0 mm. Diese Fülldrähte werden am Gleichstrom – Pol verschweißt, entsprechende Stromquellen bzw. Schlauchpakete sind zu verwenden.

Schweißen bei niedrigen Außentemperaturen bzw. feuchter Witterung

Bei ungünstigen Witterungsverhältnissen, insbesondere bei Lufttemperaturen unter 0 °C, dürfen Schweißarbeiten an Rohrleitungen nur ausgeführt werden, wenn die Schweiß- und Arbeitsbedingungen eine einwandfreie Nahtaufführung ermöglichen.

Im Besonderen ist auf eine entsprechende Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur zu achten. Zügiges Schweißen, gegebenenfalls sind mehrere Schweißer für eine Naht einzusetzen. Der Schweißer selbst muss genügend gegen Kälte geschützt sein. Zelte, Windschutz oder Infrarotstrahler vorsehen.

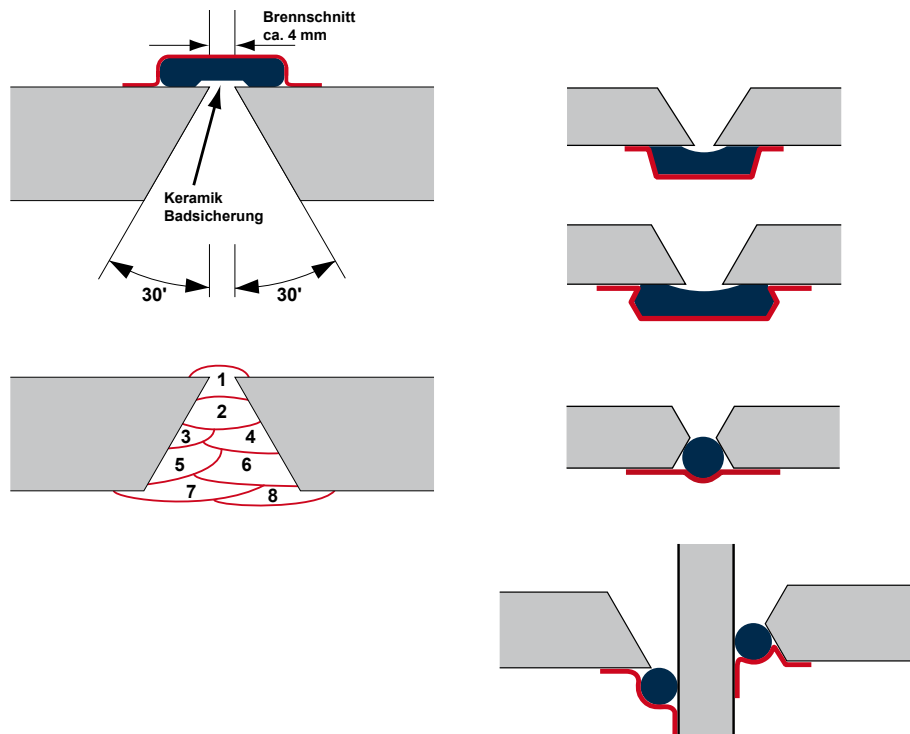
Bezüglich der Ausführung von Schweißarbeiten bei Regen oder an nassen Werkstücken gibt es keine allgemein gültigen Regeln oder einschränkenden Vorschriften. Trotzdem ist es selbstverständlich, dass die Schweißstelle gegen Regen und andere Witterungseinflüsse abzuschirmen ist. Die Schweißstelle muss auf jeden Fall frei von Wasser sein.

Keramische Schweißbadsicherungen

Keramische Schweißbadsicherungen bestehen aus einer dichten, hoch temperaturbeständigen Keramik, aus verschiedenen Mischungen von Mineralien (z. B. Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2). Sie ergeben beim Schmelzen eine glasartige Schlacke, wodurch die Schweißnaht-Unterseite geformt sowie vor Luftzutritt geschützt wird. Sie verhalten sich chemisch neutral zum flüssigen Schweißbad. Keramische Schweißbadsicherungen gibt es als Keramik-Segmente (~2 cm lang) auf einer flexiblen Aluminiumfolie mit klebfähigem Rand, die von der Schweißnahtunterseite an das Werkstück geklebt werden, sowie als einzelne keramische Segmente (~10–15 cm lang) zum Einlegen in metallische Schienen, die dann mittels Haftmagneten oder anderen Vorrichtungen am Bauteil befestigt werden.

Besondere wirtschaftliche Vorteile bieten Keramik-Schweißbadsicherungen beim UP-Schweißen sowie beim MAG-Hochleistungsschweißen mit Massivdrähten und Metallpulver-Fülldrähten in waagerechter Schweißposition sowie beim MAG-Schweißen in Zwangspositionen mittels Rutil-Fülldrahtelektroden mit schnell erstarrender Schlacke.

Beispiele für die Anwendung von Schweißbadsicherungen



Keramische Schweißbadsicherungen

Einsatzmöglichkeiten

Der Einsatz von Keramik-Schweißbadsicherungen erfolgte deshalb bisher vorwiegend in Industriesegmente, die unter hohem Kostendruck standen, wie dem Schiffbau, jedoch werden sie heute mehr und mehr auch im Druckbehälter-, Apparate-, Stahl-, Tank-, Brücken- und Anlagenbau eingesetzt.

Anwendungshinweise für den Praktiker

- Ideal für das mechanisierte Einseiten-Schweißen mit hohen Stromstärken und für manuelles Schweißen von Wurzellagen mit erhöhten Schweißparametern (MAG-Massivdraht und MAG-Fülldraht).
- Wurzellagen lassen sich in solchen Dicken herstellen, dass Fülllagen ab der zweiten Lage bereits mit sehr hohen Stromstärken und Abschmelzleistungen geschweißt werden können ohne Gefahr des Durchbrennens.
- geeignet um Abweichungen der Fugenform ohne wesentliche Anpassung der Schweißparameter zu kompensieren und somit eine hohe Nahtgüte sicherzustellen. Ungleichmässige Wurzelspalte können ohne zeitaufwändiges Ausrichten geschweißt werden.
- Bei Lage-Gegenlage-Schweißungen kann auf das kostenintensive Gegenschleifen i. d. R. komplett verzichtet werden.
- In Wurzellagen ist mit weniger Gefahr von ungenügender Durchschweißung, Einbrandkerben, Poren- bzw. Schlackeneinschlüssen und Ansatzfehlern zu rechnen.
- Beim Einseiten-Schweißen mit Keramik erhöhte Fertigungssicherheit wenn kerbfreie Wurzellagen gefordert sind z.B. bei schwingender oder korrosiver Beanspruchung.
- Wegen der Feuchtigkeitsunempfindlichkeit eignen sich keramische Schweißbadsicherungen auch für Schweißarbeiten im Freien. Hierbei kann bei Einseiten-Schweißungen auf der Baustelle die Schweißung oft ins Innere des Bauteils verlegt werden, wo Witterungseinflüsse keine Rolle spielen.
- Dichte Keramiken mit sehr niedrigem Feuchtigkeitsgehalt eignen sich ausgezeichnet für Schweißarbeiten an hochfesten Feinkornbaustählen, die Schweißgüter mit sehr niedrigen Wasserstoffgehalten erfordern.

Keramische Schweißbadsicherungen

Schweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen

Nach Art der Verarbeitung wird beim Aluminium zwischen Knet- und Gusslegierungen unterschieden. Alle Aluminiumwerkstoffe werden meist mit einen oder mehreren Elementen legiert. Je nach dem um welche Legierungselemente es sich dabei handelt, werden Aluminium Knetlegierungen in folgende Gruppen unterteilt (Bezeichnung nach EN 573-1).

EN AW-	Legierung
1xxx	Reinaluminium mit mindestens 99 Gew.-% Anteil an Aluminium
2xxx	Aluminium-Kupfer Legierungen
3xxx	Aluminium-Mangan Legierungen
4xxx	Aluminium-Silizium Legierungen
5xxx	Aluminium-Magnesium Legierungen
6xxx	Aluminium-Magnesium-Silizium Legierungen
7xxx	Aluminium-Zink Legierungen
8xxx	Andere Aluminiumlegierungen, wie bspw. Aluminium-Lithium Legierungen

Die Bezeichnung AW bezieht sich auf die Knetlegierung (engl. aluminium wrought), die erste Zahl bezeichnet das Hauptlegierungselement. Die folgenden drei Ziffern haben keine besondere Bedeutung, eine Ausnahme dafür sind die Reinaluminium Legierungen. Bei den Reinaluminiumlegierungen bezeichnen die letzten zwei Ziffern den Gewichtsanteil an Aluminium in Prozenten (z. B. bedeutet AW 1098–99,98 % Al, AW 1090–99,90 % Al), und die zweite Ziffer ist ein Indikator für die Reinheit. Alternativ können die Aluminium Knetlegierungen mit chemischen Symbolen bezeichnet werden (nach EN 573-2).

Die Aluminium Gusslegierungen werden, ähnlich wie die Knetlegierungen, nach den Hauptlegierungselementen unterteilt (nach Aluminium Association):

EN AC-	Legierung
1xx.x	Reinaluminium mit mindestens 99 Gew.-% Anteil an Aluminium
2xx.x	Aluminium- Kupfer Legierungen
3xx.x	Aluminium-Silizium Legierungen mit 5–17 % Silizium und Kupfer und/oder Magnesium
4xx.x	Aluminium-Silizium Legierungen mit 5–12 % Silizium
5xx.x	Aluminium-Magnesium Legierungen
7xx.x	Aluminium-Zink Legierungen
8xx.x	Aluminium-Blei Legierungen
9xx.x	Andere Aluminiumlegierungen

In der Reinaluminiumgruppe der Aluminium Gusslegierungen AC (engl. aluminium cast) sind die zweite und dritte Zahl die Indikation über den Aluminiumanteil in der Legierung (bspw. AC 120.1–99,2 % Al), bei allen anderen Legierungen bezeichnen diese Zahlen die verschiedenen Legierungselemente. Die letzte Zahl, nach dem Punkt, kann entweder eine 0 sein (Guss) oder 1 bzw. 2 (Ingot). Die Aluminium Gusslegierungen können auch nach der EN 1780-1 (fünfstellige numerische Bezeichnung) oder EN 1780-2 (Bezeichnung mit chemischen Symbolen) bezeichnet werden.

Der Unterschied zwischen Knet- und Gusslegierungen besteht in der Verarbeitungstemperatur. Die Knetlegierungen werden im festen oder teigigen Zustand verarbeitet, die Gusslegierungen hingegen werden in flüssigen Zustand gegossen.

Die Aluminiumlegieren unterscheiden sich als aushärtbare und nicht aushärtbare Legierungen. Die AlCu-Legierungen (2xxx), AlMgSi-Legierungen (6xxx) und AlZn-Legierungen (7xxx) sind aushärtbar; die Reinaluminium (1xxx), AlMn-Legierungen (3xxx), AlSi-Legierungen (4xxx) und AlMg-Legierungen (5xxx) sind nicht aushärtbar. Bei den nicht aushärtbaren Legierungen, auch naturharte Legierungen genannt, kann eine Festigkeitssteigerung durch Umformen bei Raumtemperatur (Kaltverfestigung) erreicht werden. Um die Festigkeit bei aushärtbaren Aluminiumlegierungen zu steigern, muss ein Aushärtungsprozess durchgeführt werden, welcher sich aus Lösungsglügen bei 450–550 °C (Legierungsabhängig), Abschrecken und Auslagern zusammensetzt. Das Auslagern kann entweder bei Temperaturen unter 50 °C (Kaltauslagern) über mehrere Tage oder bei Temperaturen zwischen 140 °C und 200 °C (Warmauslagern) im Stundenbereich erfolgen. Die erreichte Festigkeitssteigerung wird, nach EN 515, durch den H-Zustand bei nicht aushärtbare Legierungen und durch den T-Zustand bei aushärtbare Legierungen angegeben.

Vorzugsweise wird beim Schweißen von Aluminiumlegierungen der WIG und MIG Prozess verwendet. Andere Lichtbogenschweißprozesse, wie bspw. Lichtbogenhandschweißen oder Gasschweißen, sollten soweit möglich vermieden werden. Beim Schweißen von Aluminium und seinen Legierungen besteht, im Vergleich zum Schweißen von Stahl, eine höhere Gefahr der Porenbildung. Grund dafür ist, hauptsächlich, die geringe Löslichkeit von Wasserstoff im festen Aluminium. Um die Porenbildung beim Schweißen zu vermeiden ist es besonders wichtig die Wasserstoffquellen (wie bspw. verschmutzte oder kondensierte Schweißzusatz- oder Grundwerkstoffoberfläche, Verwendung von für Aluminium ungeeigneten Schweißzubehör, unreinen oder unedlen Schutzgasen, u.ä.) aufzuspüren und deren Zufluss zu unterbinden.

Um das Ausgasen des Wasserstoffs zu erleichtern sind Schweißpositionen PA, PB und PF zu bevorzugen; ungünstig erweist sich PC, die Positionen PD, PE und PG sollte man so gut wie möglich vermeiden. Werden reinem Aluminium weitere Elemente zulegiert, wird das Erstarrungsintervall der Legierung breiter, was die Bildung von Heißrissen begünstigt. Vor allem Aluminium-Kupfer Legierungen (2xxx), sowie sonstige Aluminium Legierungen die mit Kupfer zulegiert werden, wie bspw. 7075 (EN AW-AlZn5,5MgCu), sind davon betroffen. Mit höherer Wärmeeinbringung steigt die Rissgefahr, deswegen müssen die Schweißparameter so eingestellt werden, dass die Wärmeeinbringung

1,5 KJ/mm nicht übersteigt. Dabei sollte eine Zwischenlagentemperatur von 120 °C nicht überschritten werden. Einen weiteren bedeutenden Einfluss auf das Schweißergebnis hat die Aluminiumoxidschicht. Damit eine bestmögliche Schweißnahtqualität erreicht wird, sollte die Oxidschichtdicke vor Beginn der Schweißarbeiten so dünn wie möglich sein, darf aber nicht ganz entfernt werden um die Lichtbogenstabilität zu gewährleisten. Der Lichtbogen muss dabei möglichst kurz und konzentriert gehalten werden, um die Oxidschicht während des Schweißens zu zerstören (auf die Polung der Schweißzusätze ist zu achten).

Um Oxideinschlüsse in der Schweißnaht zu vermeiden wird bei Aluminiumschweißen grundsätzlich leicht stechend geschweißt. Bei schleppender Brennerstellung werden die Oxide in das Schweißbad gefördert und verbleiben als qualitätsmindernde Oxideinschlüsse – äußere Anzeichen dafür sind dunkle Beläge auf der Nahtoberfläche. Als Schutzgase werden inerte Schutzgase verwendet, grundsätzlich 100 % Argon; bei stärkeren Wanddicken ist eine Zugabe vom Helium empfehlenswert, die Gasdurchflussmenge muss dabei angepasst werden. Durch den Zusatz von Stickstoff kann eine weitere Steigerung der Wärmeeinbringung und Schweißgeschwindigkeit erreicht werden. Die Wirkung von Zusätzen an Sauerstoff zum inerten Gas ist umstritten, auf der einen Seite wird der Einbrand wesentlich verbessert, allerdings kann je nach Sauerstoffgehalt ein erhöhter Magnesiumabbrand auftreten und sich ein schwarzer Belag auf der Nahtoberfläche bilden.

Um eine anwendungsgerechte Auswahl des Aluminiumschweißzusatzes durchzuführen, sollten die Anforderungen der Anwendung gut durchdacht werden. Als eine Abhilfe dafür kann die voestalpine Böhler Welding Aluminium Schweißzusatz Auswahltable herangezogen werden. Einflussgrößen wie relative Rissicherheit (W), Festigkeit im geschweißten Zustand (S), Duktilität (D), Korrosionsbeständigkeit (C), Betriebstemperatur (T) und Farbübereinstimmung nach Anodisieren (M) müssen dabei für die Anwendung in Betracht gezogen werden. In dieser Auswahltable ist jede der genannten Einflussgrößen, je nach Werkstoffkombination, mit den Noten A (sehr gut geeignet) bis D (wenig geeignet) benotet. Wird keine Benotung angegeben, so ist der zutreffende Schweißzusatz für diese Anwendung grundsätzlich nicht empfohlen.

Die am häufigsten benutzten Aluminiumschweißzusätze sind AlMg5 (5356) und AlSi5 (4043). Einen Überblick der wichtigsten Eigenschaften dieser Schweißzusätze sind in folgender Tabelle angegeben:

4043 (Union AlSi5, BÖHLER S-AlSi5)	5356 (Union AlMg5, BÖHLER S-AlMg5)
Glatte Nahtoberfläche, gute Benetzbarkeit	Schmauchspuren, Schuppige Nahtoberfläche
Niedrigere Knickfestigkeit	Beste Förderbarkeit
Größerer Einbrand	Verminderter Einbrand
Niedrigere Duktilität	Höhere Duktilität
Niedrigere Zugfestigkeit	Höhere Zugfestigkeit
Mehr Porenempfindlich	Weniger Porenempfindlich
Färbt sich grau nach Eloxieren	Gute Farbübereinstimmung nach Eloxieren
Viel niedrigere Scherfestigkeit	Höhere Scherfestigkeit
Weniger Rissempfindlich	Mehr Rissempfindlich
Engerer Erstarrungsbereich	Breiterer Erstarrungsbereich

In nachstehender Tabelle sind beispielhaft verschiedene voestalpine Böhler Welding Schweißzusätze für die Schweißung von Aluminiumlegierungen angeführt:

EN AW-	vaBW Marke
1xxx	Union Al99.5, Union Al99.7, Union AlSi5, Böhler S-Al4043
2xxx	Union AlCu6Mn, Union AlSi5, Union AlSi10Cu4
3xxx	Union AlSi5, Union AlSi12, Union AlMg5, Union AlMg4,5Mn, Böhler S-Al5356, Böhler S Al5183, Böhler S-Al4043
5xxx	Union AlMg5, Union AlMg5Mn, Union AlMg4,5Mn, Böhler S-Al5356, Böhler S Al5183
6xxx	Union AlSi5, Union AlSi12, Union AlMg5, Union AlMg4,5Mn, Union AlMg2,7Mn, Böhler S-Al5356, Böhler S Al5183, Böhler S-Al4043
7xxx	Union AlSi5, Union AlSi12, Union AlMg4,5Mn, Union AlMg4,5MnZr, Union AlMg5, Böhler S-Al5356, Böhler S Al5183, Böhler S-Al4043

Schweißen von hochfesten Stählen

Entsprechend ihrer Herstellung lassen sich die mikrolegierten Stähle in drei Hauptgruppen einteilen

1. normalgeglühte Feinkornbaustähle
2. flüssigkeitsvergütete Feinkornbaustähle
3. thermomechanisch behandelte Feinkornbaustähle

Bei den konventionell gewalzten normalgeglühten Feinkornbaustählen erreicht man im wesentlichen durch die Ausscheidung von feindispersen Karbonitriden sowie Karbiden während der Luftabkühlung aus dem Austenitgebiet eine feinkörniges Ferrit-Perlit-Gefüge. Auf diese Weise werden Feinkornbaustähle mit Streckgrenzen bis 550 N/mm² hergestellt.

Feinstes Korn wird bei den flüssigkeitsvergüteten Feinkornbaustählen durch eine Wasservergütung erzielt, wobei Mikrolegierungselemente, wie B, V, Nb und Ti sowie teilweise auch die Legierungselemente Cr und Ni von entscheidender Bedeutung sind. Mit der Wasservergütung erreicht man Streckgrenzen zwischen 450 und 1300 N/mm². Die besonderen Eigenschaften der beiden erstgenannten Stahlgruppen werden durch eine nach dem Walzen durchgeführte Wärmebehandlung erreicht. Bei den thermomechanisch behandelten Stählen wird eine gezielte Wärmebehandlung in den Walzvorgang miteinbezogen, wodurch hochfeste Stähle mit sehr niedrigen Kohlenstoffgehalten (<0,1 %) hergestellt werden können. Mit Hilfe der Mikrolegierungselemente und geeigneter Fertigungsmethoden konnten die mechanischen Eigenschaften von Baustählen sowie deren Schweißbeignung wesentlich verbessert werden. Beim Schweißen von Feinkornbaustählen ist Allgemein zu beachten, dass mit steigenden Mindestwerten der Streckgrenze und zunehmender Wanddicke erhöhte Sorgfalt bei der Verarbeitung erforderlich ist bzw. eine schweiß- und beanspruchungsgerechte Konstruktion eine wesentliche Voraussetzung darstellt. Die Gefahr der Heißrissbildung ist bei diesen Stählen gering. Andererseits sollte der Möglichkeit von Terrassenbrüchen durch konstruktive und/oder schweißtechnische Maßnahmen entgegengewirkt werden (Spannung verringern). Gleichzeitig ist der Vermeidung von Kaltrissen besondere Aufmerksamkeit zu schenken (keine übermäßige Aufhärtung, niedrige Wasserstoffgehalte). Die Vorwärmtemperatur für das Verbindungs- und Heftschiessen liegt zwischen 80 und 250 °C. Sie richtet sich nach der Werkstückdicke und der chemischen Zusammensetzung von Grundwerkstoff und Schweißgut, der Streckenergie beim Schweißen sowie den zu erwartenden Eigenspannungen. Mit steigender Dicke ist der obere Temperaturbereich anzustreben.

Von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften hochfester Schweißverbindungen ist der Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen. Dieser wird besonders beeinflusst von der Blechdicke, der Nahtform, der Streckenergie und Vorwärmtemperatur sowie vom Lagenaufbau. Zur Kennzeichnung des Temperatur-Zeit Verlaufes beim Schweißen wählt man im Allgemeinen die Abkühlzeit t_{8/5}. D.h. die Zeit, in der bei Abkühlung einer Schweißraupe der Temperturbereich von 800 bis 500 °C

durchlaufen wird. Mit zunehmender Akühlzeit t_{8/5} nimmt die Härte der Wärmeeinflußzone ab. Andererseits sind damit eine Verringerung der Kerbschlagarbeit und ein Anstieg der Übergangstemperatur der Kerbschlagarbeit verbunden. Wenn daher für einen bestimmten Stahl eine vorgegebene Höchst Härte nicht überschritten bzw. ein vorgegebener Mindestwert der Kerbschlagarbeit nicht unterschritten werden darf, so müssen die Schweißbedingungen so gewählt werden, dass ein bestimmter Bereich der Abkühlzeit t_{8/5} weder über- noch unterschritten wird. Die Aussagen lassen die große Bedeutung einer sachgemäßen Schweißtechnologie im Sinne der Einhaltbarkeit der Gesamtheit der Anforderungen an die jeweilige Schweißverbindung erkennen. Einen qualitätsbestimmenden Faktor stellt naturgemäß auch die Auswahl eines geeigneten Schweißzusatzes dar.

Schweißtechnologie

- Bei der Schweißzusatzwahl ist zu beachten, dass das Schweißgut trotz Aufmischung mit dem Grundwerkstoff dessen mechanische Eigenschaften erreichen muss. Es sind nur rückgetrocknete, basische Stabelektroden zu verwenden. Beim Schutzgasschweißen mit Massivdrahtelektroden existiert die Problematik von wasserstoffinduzierten Rissen normalerweise nicht.
- Die Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur liegt zwischen 80 und 250 °C. Sie richtet sich nach der Wanddicke, der chem. Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes, der Streckenergie und dem vorhandenen Eigenspannungszustandes.
- Die Grenzdicke für das Vorwärmen in Abhängigkeit von der Streckgrenze des Grundwerkstoffes ist zu berücksichtigen. Mit steigender Dicke ist der obere Temperaturbereich anzustreben.
- Der Temperatur-Zeit-Verlauf (t_{8/5}) ist für die mechanischen Eigenschaften der Wärmeeinflußzone von großer Bedeutung. Die Empfehlungen des Grundwerkstoffherstellers auch hinsichtlich der Streckenergie sind unbedingt zu berücksichtigen.

Durch die stark diversifizierte Grundwerkstoffherstellung (Vergütungsstahl vs. Thermomechanisch gewalzter Stahl) speziell im Segment der hochfesten Stähle ist eine generelle Grundwerkstoff-Zusatzwerkstoff- Kombinationempfehlung für eine bestimmte Festigkeitsklasse immer schwieriger möglich. Eine Ausnahme stellt das „alform welding system“ dar. Hier wurden innerhalb der voestalpine Gruppe eine gemeinsame Entwicklung von Grundwerkstoff und Schweißzusatzwerkstoff durchgeführt, um optimierte, abgestimmte Kombinationen zu ermöglichen, die eine volle Ausschöpfung der Werkstoffpotentiale erreichen. Dabei wurden thermomechanisch gewalzte Stähle mit eigenen Schweißzusatzwerkstoffen konzipiert, entwickelt und gewährleisten ein Erreichen der Anforderungen bei einem erweiterten Schweißbereich (Toleranz der t_{8/5}-Zeit). Die geprüften Systemlösungen bieten damit eine leichtere Handhabung, reduzierte Fehlerraten und Kostenvorteile durch den erweiterten Schweißbereich. Gerne beraten erfahrene Schweißtechnologien über die Schweißzusatzauswahl für den jeweiligen Anwendungsfall.

Kaltzähe Stähle

Die großtechnische Anwendung von Sauerstoff in der Stahlindustrie, von Stickstoff in der chemischen Industrie und von den natürlichen Erdgasen in der Industrierversorgung wie auch in der chemischen Industrie hat in den letzten Jahren sehr an Bedeutung gewonnen. Mit der Zunahme des Einsatzes dieser Gase wurden ihr wirtschaftlicher Transport und ihre wirtschaftliche Lagerung immer wichtiger. Man macht sich dabei das Verhalten der Gase zunutze, bei Abkühlung auf tiefe Temperaturen in den flüssigen Zustand überzugehen, wobei sich ihr Volumen wesentlich verkleinert.

Dieses Verhalten der Gase kann nur dann genutzt werden, wenn für den Bau der erforderlichen Transport- und Lagerbehälter geeignete Grundwerkstoffe und Schweißzusätze zur Verfügung stehen, die bei den tiefen Temperaturen der flüssigen Gase ausreichende mechanische Eigenschaften und genügend Zähigkeit besitzen.

Unlegierte, niedrig- oder hochlegierte Stähle, die bei tiefen Temperaturen (etwa unter $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) noch zäh sind, nennt man kaltzähe Stähle. Für Temperaturen bis $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ lassen sich in allen Fällen un- und niedriglegierte Stähle verwenden, sofern sie beruhigt vergossen sind.

Grundsätzlich lassen sich die Stahlgruppen für den kaltzähen (kryogenischen) Einsatz unterscheiden in:

1. Un- bzw. niedriglegierte Tieftemperatur- und Feinkorn-Stähle für Betriebstemperaturen bis etwa $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in normalgeglühten und bis etwa $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ im vergüteten Zustand.
2. Nickellegierte Vergütungsstähle mit 1,5 bis 9 % Nickel für Betriebstemperaturen von $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis etwa $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Austenitische Chrom-Nickel-Stähle für Betriebstemperaturen bis etwa $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Schweißen von kaltzähen Stählen

Kennzeichnende Eigenschaften von Schweißzusätzen für die Schweißung kaltzäher Werkstoffe ist ihr Formänderungsvermögen bei tiefen Temperaturen, das in der Regel mit dem Kerbschlag-Biegeversuch geprüft wird. Aus dem Wert der Kerbschlagarbeit werden Rückschlüsse auf die Sprödbrechneigung und die Einsatzmöglichkeit bis zu einer bestimmten Temperatur gezogen. Eine bemerkenswerte Einflußgröße auf die Versuchsergebnisse ist die Kerbform der Kerbschlagproben. Rundkerben nach DVM ergeben höhere Kerbschlagarbeit und tiefere Gebrauchstemperaturen als die Spitzkerbprobe nach ISO, bekannter unter Charpy-V-Probe.

Als Mindestwert der Kerbschlagarbeit bei der jeweiligen tiefsten Gebrauchstemperatur wird häufig der Wert 27 Joule mit der Charpy-V-Probe genommen.

Beim Schweißen der Tieftemperatur- und Feinkornbaustähle muss auf kontrollierte Wärmezufuhr geachtet werden, um die Wärmeeinflußzone möglichst schmal zu halten und trotzdem Härtespitzen zu vermeiden. Als Stabelektroden dienen un- bzw. niedriglegierte basisch umhüllte Typen nach EN ISO 2560. Auf möglichst geringe Wasserstoffgehalte in der Schweißverbindung ist zur Vermeidung von Kaltrissen zu achten, d. h. es empfiehlt sich eine Rücktrocknung der Elektroden direkt vor der Verschweißung vorzunehmen. Diese Aussage trifft auch auf das Schweißpulver bei der UP-Schweißung zu. Bei der Schutzgasschweißung existiert das Problem von hoher Wasserstoffgehalte normalerweise nicht. Bei der Auswahl von Draht-Pulver-Kombinationen bzw. Draht-Schutzgas-Kombinationen ist die geforderte Kaltzähigkeit sowie Festigkeit besonders zu berücksichtigen.

Beim Schweißen der nickellegierten Vergütungsstähle werden artgleiche bzw. artähnliche Schweißzusätze mit 2,0 bis 3,5 % Ni eingesetzt. Artgleiche Schweißzusätze sind zu bevorzugen, wenn neben der geforderten Mindesttemperatur auch die mechanisch-technologischen (Festigkeit, Zähigkeit) und physikalischen (Wärmeausdehnungskoeffizient) Eigenschaften des Grundwerkstoffes im Schweißgut gewährleistet werden müssen.

Schweißzusätze mit höheren Nickelgehalten neigen zu verstärkter Heißrissbildung. Aus diesem Grund wird der 5%ige Nickelstahl bevorzugt mit austenitischen Schweißzusätzen auf der Basis „A 7/Thermanit X“ oder „ASN 5“ bzw. Nickelbasis-Typen geschweißt. Eine Wärmebehandlung der Schweißverbindung muss dann mit Rücksicht auf das austenitische Schweißgut (Versprödung, Kohlenstoffdiffusion) unterbleiben.

Der 9%ige Ni-Stahl wird vorwiegend mit hochnickelhaltigen vollaustenitischen Schweißzusätzen oder mit Nickelbasiszusätzen des Typs „NIBAS 70/20“ verbunden. Dieser Nickelbasis-Typ besitzt Vorteile gegenüber herkömmlichen Austeniten. Durch eine höhere Streckgrenze und die Möglichkeit einer Wärmebehandlung von Schweißverbindungen. Er kann auch für Stähle mit niedrigem Nickelgehalt verwendet werden. Bei limitierter Aufmischung mit dem Grundwerkstoff ist Rissicherheit und ausreichende Kaltzähigkeit bis $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegeben.

Die austenitischen Chrom-Nickel-Stähle werden artgleich geschweißt. Das unstabilisierte Schweißgut ist dem stabilisierten in der Kerbschlagarbeit bei tiefen Temperaturen leicht überlegen. Für austenitische Schweißzusätze werden auch spezielle Produkte mit eingeschränkten Ferritgehalt angeboten, um das volle Werkstoffpotential für diese Legierungsart auszuschöpfen.

Schweißen von warmfesten Stählen

Die Effizienz thermischer Kraftwerke wird im Wesentlichen über die Prozessparameter Dampfdruck und Dampftemperatur definiert. Je höher diese Prozessparameter realisiert werden, desto höher ist die Effizienz bzw. der Wirkungsgrad. Moderne Kraftwerke arbeiten mit einem Dampfdruck von 300 bar und einer Sattdampftemperatur von 600 °C. Unter diesen Prozessbedingungen werden heute Wirkungsgrade von über 45 % realisiert, was mehr als eine Verdoppelung im Vergleich zu den Kohlekraftwerken der ersten Generation darstellt. Die Erhöhung der Prozessparameter ist jedoch nur durch die Bereitstellung und Verarbeitung von Werkstoffen möglich, die den enorm gesteigerten Anforderungen hinsichtlich mechanischer und chemischer Beanspruchung (Oxidation und Korrosion) genügen.

Unter dem Begriff warmfeste Stähle versteht man im Allgemeinen Stähle, die für den dauerhaften Einsatz bei erhöhten Temperaturen geeignet sind. Eine Verschärfung der Anforderungsbedingungen wird durch den Begriff hochwarmfest betont und wird üblicherweise in Verbindung mit austenitischen Stählen und Nickellegierungen verwendet. Die warmfesten Stähle lassen sich entsprechend ihrer Mikrostruktur in drei Gruppen unterteilen. Die ferritisch-perlitischen Stähle wie z. B. die Werkstoffe P295GH,

P355GH und 16Mo3, die ferritisch-bainitischen Stähle wie z. B. 13CrMo4-5, 10CrMo9-10, T/P23 und T/P24 sowie die ferritisch-martensitischen Stähle wie z. B. T/P91, T/P92, X20 und VM12-SHC). Des Weiteren finden im modernen Kraftwerksbau hochwarmfeste austenitische Stähle wie z. B. 347HFG, 304HCu und 310N sowie Nickellegierungen wie z. B. Alloy 617B, Alloy C 263 und Alloy 740H Anwendung bzw. sind für die fossilen Kraftwerke der nächsten Generation in Ertüchtigung. Einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten von warmfesten und hochwarmfesten Stählen und Nickellegierungen ist in Tabelle 1 gegeben.

Die für die Bauteildimensionierung relevanten Festigkeitskenngrößen Streckgrenze und Zugfestigkeit nehmen mit zunehmender Betriebstemperatur erfahrungsgemäß ab. Ab einer werkstoffspezifischen Grenztemperatur werden die Festigkeitskenngrößen aller metallischen Werkstoffe darüber hinaus zeitabhängig (Abbildung 1). Dieses, als Kriechen bekannte Phänomen bewirkt, dass ein Bauteil oder eine Komponente unter Belastung bei erhöhter Temperatur sich kontinuierlich plastisch verformt und schließlich unter Ausbildung eines Kriechbruchs versagt.

Die Bauteildimensionierung von warmgehenden Komponenten muss deshalb unter Berücksichtigung des jeweiligen Kriech- oder Zeitstandverhalten der Werkstoffe erfolgen.

Die sogenannte Zeitstandfestigkeit beschreibt die Spannung, die nach einer bestimmten Zeit und bei konstanter Temperatur zum Bruch führt. Zur Bauteildimensionierung sind im Kraftwerksbau üblicherweise Zeitstandfestigkeiten für 100.000 oder 200.000 h bei Auslegungstemperatur erforderlich. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Schweißverbindungen i. d. R. ein vom Grundwerkstoff abweichendes Zeitstandverhalten aufweisen, da im Langzeitbereich ein Bruchlagenwechsel vom Grundwerkstoff in die wärmebeeinflusste Zone beobachtet wird, was in Abbildung 2 dargestellt ist.

Tabelle 1: Einsatzgebiete modernen warmfester und hochwarmfester Stähle und Nickellegierungen im Kraftwerksbau

	16M003 (T/P1)	13CrMo4-5 (T/P12)	15CrMoV5-10	14MoV6-3	15NiCuMoNb5 (WB36)	10CrMo9-10 (T/P22)	7CrWVMoNb9-6 (T/P23)	7CrMoVTiB10-10 (T/P24)	X10CrMoVNb9-1 (T/P91)	X10CrWMoVnb9-2(T/P92)	X11CrMoVNb9-1-1 (T/P911)	X12CrCoWVnb11-2-2 (VM 12-SHC)	X20CrMoV11-1	304HCu (Super 304H)	310N (HR3C)	347HFG	Sanciro 25	HR6W	alloy 263	alloy 617B	alloy 740H	
Speisewasservorwärmer	x				x	x	x															
Membranwand	x	x					x	x	(x)	(x)		(x)										
Tragrohre							x	x														
Speisewasserleitung					x																	
Überhitzer		x				x	x	x	x	x		x		x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
Zwischenüberhitzer	x	x				x			x	x			x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
Sammler	x	x	x	x	x	x			x	x	x		x								(x)	
Dampfleitung									x	x	x		x						(x)	(x)	(x)	(x)
Abschneider									x	x												

(x) = Kandidaten für 700 °C Technologie

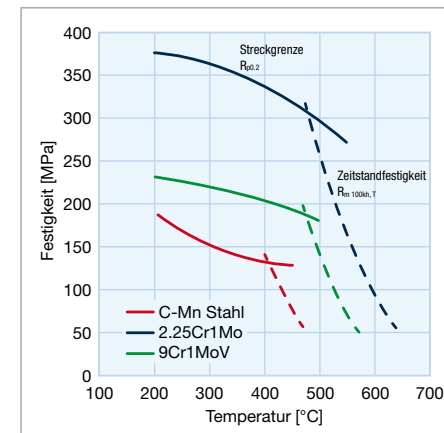


Abbildung 1: Temperaturabhängigkeit der Streckgrenze und Zeitstandfestigkeit einiger warmfester Stähle

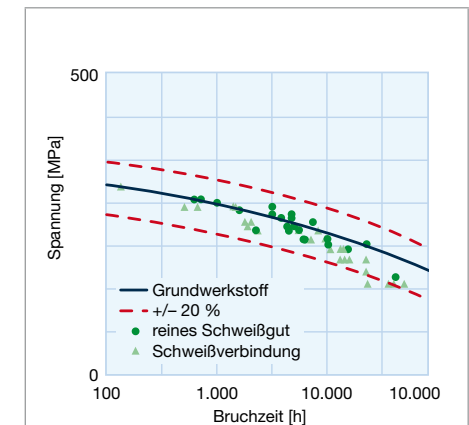


Abbildung 2: Zeitstandfestigkeit von Schweißgut und Schweißverbindung eines modifizierten 9Cr-1Mo Stahls

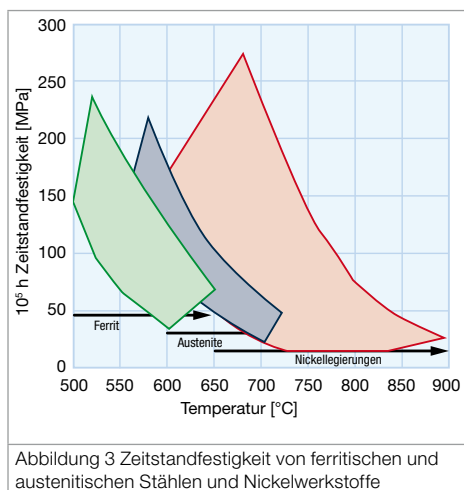
Die Zeitstandfestigkeiten der Grundwerkstoffe sind in den entsprechenden Produktnormen hinterlegt. Die Zeitstandfestigkeiten der Schweißzusatzwerkstoffe und ggf. der Schweißverbindung muss im Rahmen der VdTÜV Zulassung im Rahmen der PED vom Schweißzusatzwerkstoffhersteller nachgewiesen werden.

Molybdän hat sich als ein Schlüsselement zur Erhöhung der Warmfestigkeit von Werkstoffen erwiesen, was z. B. bei der Entwicklung der Qualität 16Mo3 als klassischer Vertreter der warmfesten Stähle bereits Anfang des letzten Jahrhunderts berücksichtigt wurde. Neben Molybdän werden die Elemente Chrom, Wolfram, Kobalt, Vanadium, Niob und Bor zur Steigerung der Warm- und Zeitstandfestigkeit hinzulegiert. Vanadium und Niob erhöhen durch die Bildung von Karbiden bzw. Nitriden die Zeitstandfestigkeit in Stählen und finden sich in allen modernen ferritisch-bainitischen (T/P23, T/P24) und ferritisch-martensitischen Stählen (T/P91, T/P92, VM12-SHC) wieder. Zugaben von Bor im ppm Bereich stabilisieren die Chromkarbide, wodurch das Mikrogefüge (Subkornstruktur) über lange Zeiträume hinweg stabilisiert wird und in einer zusätzlichen Steigerung der Zeitstandfestigkeit resultiert.

Neben der rein mechanischen Belastung hervorgerufen durch den Dampfdruck und zusätzlich zu berücksichtigenden Lasten wie z. B. Eigengewicht etc. müssen die Werkstoffe gegenüber den chemischen Einwirkungen, Wasserdampfoxidation auf der Rohinnenwandfläche und Hochtemperaturkorrosion aufgrund der Rauchgasströme entlang der Rohraußenwand beständig sein. Die Beständigkeit gegenüber Wasserdampf-oxidation und Hochtemperaturkorrosion lässt sich im Wesentlichen über das Element Chrom steuern. In den angelassenen martensitischen Chromstählen lassen sich bis zu 12 Gew.-% Chrom hinzulegiert. Höhere Chromgehalte würden den Austenitbereich derart einzuschnüren, dass im vergüteten Zustand höhere Anteile an versprödhend wirkenden Deltaferrit neben dem angelassenen Martensit im Gefüge vorliegen.

Die maximale Einsatztemperatur der im Kraftwerksbau eingesetzten Stähle ist daher von der Warmstreckgrenze bzw. Zeitstandfestigkeit und von der Beständigkeit gegenüber Oxidation und Korrosion abhängig.

Unlegierte Baustähle sind daher nur bis 350 °C technisch sinnvoll einsetzbar, die Gruppe der ferritisch-bainitischen Stähle bis ca. 550 °C und die Gruppe der 9–12 % Chromstähle lässt sich bis ca. 630 °C einsetzen. Für höhere Prozesstemperaturen eignen sich nur noch hochwarmfeste austenitische Stähle und Nickellegierungen wie in Abbildung 3 verdeutlicht ist.

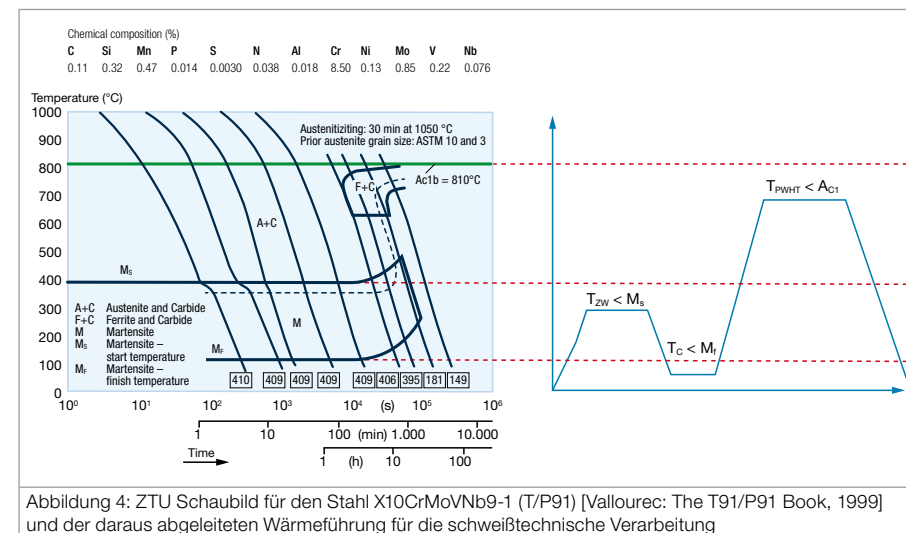


Schweißtechnische Verarbeitung der warm- und hochwarmfesten Stähle

Die zunehmend komplexer werdenden Legierungskonzepte der modernen warm- und hochwarmfesten Stähle erfordern hinsichtlich der Verarbeitung eine zunehmende Sorgfalt hinsichtlich der Ansprüche an die Qualität der Grund- und Schweißzusatzwerkstoffe sowie der schweißtechnischen Ausführung. Wärmeführung, Schweißparameter und Lagenaufbau müssen jeweils an die individuellen Werkstoffe angepasst werden. Insbesondere die Neigung zur Aufhärtung in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ), Wasserstoffunterstützter Rissbildung, Anfälligkeit gegenüber Spannungsrisskorrosion und die Empfindlichkeit zur Bildung von Heißrissen müssen abhängig von der Mikrostruktur und dem Legierungskonzept individuell bewertet werden, um eine technisch einwandfreie und wirtschaftlich tragbare Verarbeitung zu gewährleisten.

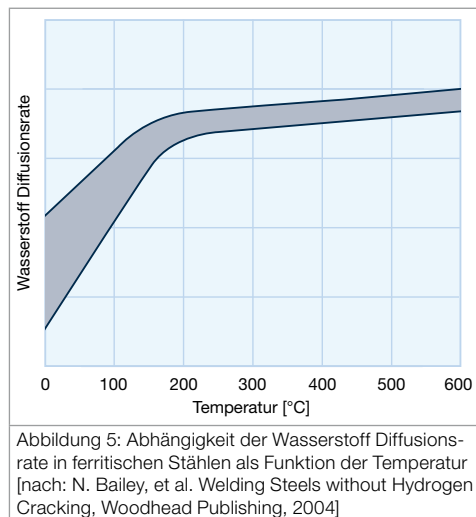
Wärmeführung

Ein wesentliches Element zur sicheren Verarbeitung der warmfesten Stähle ist die Wärmeführung vor, während und nach dem Schweißen und muss auf die jeweiligen zu verschweißenden Grundwerkstoffe und/oder Schweißzusatzwerkstoffe abgestimmt werden. Die Wärmeführung lässt sich mit hinreichender Genauigkeit anhand der entsprechenden Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder (ZTU) der Grundwerkstoffe ableiten. Die wesentlichen Größen sind hierbei die Martensit-Starttemperatur M_s , wodurch die maximal zulässige Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur festgelegt ist, die Martensit-Finistemperatur M_f , die die notwendige Abkühlendtemperatur definiert, sowie die Ferrit/Austenit Umwandlungstemperatur A_c1 , die die Temperaturobergrenze für die Wärmenachbehandlung darstellt.



Vorwärmen

Das Vorwärmen dient zum einen dazu, Restfeuchte von der Werkstoffoberfläche zu entfernen. Zum anderen wird die Abkühlgeschwindigkeit nach dem Schweißen durch die Vorwärmung reduziert. Das hilft, empfindliche Mikrostrukturen und übermäßige Aufhärtung im Bereich der WEZ zu vermeiden und so die Empfindlichkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Rissbildung zu verringern. Ein weiterer Aspekt ist die Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff im Grundwerkstoff bzw. Schweißgut. Erst ab einer Temperatur von 150 °C besitzt Wasserstoff die ausreichende Mobilität, um aus dem Werkstoff zu diffundieren (Abbildung 5).



Die entsprechende Vorwärmtemperatur muss im Bereich der Schweißnaht vor Beginn der Schweißung vorliegen. Die Messpunkte liegen dabei 75 mm von der Nahtmitte entfernt. Bei einigen ferritisch-perlitischen und ferritisch-bainitischen Stählen kann in Abhängigkeit von der Wandstärke ggf. auf ein Vorwärmen verzichtet werden. Eine Vorwärmung bei den ferritisch-martensitischen Stählen auf 150–200 °C ist zwingend vorgeschrieben, um die Anfälligkeit gegenüber Härterissen und wasserstoffinduzierter Rissbildung zu minimieren.

Bei den hochwarmfesten austenitischen Stählen und Nickellegierungen beschränkt sich die Vorwärmtemperatur aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegenüber Heißrissen auf die Entfernung der Restfeuchte.

Zwischenlagentemperatur

Die Zwischenlagentemperatur ist als die Temperatur definiert, die bei der Mehrlagenschweißung im Bereich der Schweißnahtoberfläche, d.h. auf der Raupe vor Beginn der Schweißung der nächsten Lage gemessen wird. Zur Messung der Zwischenlagentemperatur empfehlen sich Messinstrumente, welche die Temperatur direkt auf der Schweißnaht messen können, wie z.B. Pyrometer, Thermolemente, etc.

Die Zwischenlagentemperatur ist bei den ferritischen Werkstoffen nach oben hin durch die Martensitstarttemperatur begrenzt. Das gewährleistet, dass das Schweißgut und die WEZ martensitisch umwandeln und durch den Wärmeeintrag der folgenden Raupe teilweise angelassen wird. Hierdurch lässt sich die Zähigkeit des Schweißguts und der WEZ, die bei den immer komplexer werden Legierungen per se niedrig ausfallen, positiv beeinflussen.

Das in der Vergangenheit für den angelassenen martensitischen 12 % Chromstahl X20 angewendete austenitische Schweißen (Zwischenlagentemperatur oberhalb Ms) findet heute kaum noch Anwendung.

Die Gefahr der wasserstoffunterstützten Rissbildung ist bei den hochwarmfesten austenitischen Stählen und Nickellegierungen so nicht gegeben. Die Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur ist aber aufgrund der gegebenen Empfindlichkeit dieser Werkstoffe gegenüber Heißrissen auf maximal 150 °C zu begrenzen.

Abkühlen nach dem Schweißen

Die ferritisch-martensitischen Stähle müssen nach Beendigung des Schweißvorgangs unterhalb der Mf-temperatur abgekühlt werden. Nur so ist sichergestellt, dass das Schweißgut und die WEZ vollständig in Martensit umwandeln, der dann durch die WBH in die gewünschte Mikrostruktur (ferritisches Subkorngefüge mit Karbid/Nitridausscheidungen an den Grenzflächen) überführt wird. Vorhandener Restaustenit würde während der WBH in weichen Ferrit umwandeln. Das dadurch entstehende Mischgefüge aus angelassenen Martensit und Ausscheidungsfreien Ferrit wäre hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften kritisch zu bewerten. Die ferritisch-martensitischen Stähle weisen eine hohe Anfälligkeit gegenüber wasserstoffunterstützter Rissbildung auf, ist es daher zu empfehlen, dass Bauteile hoher Wandstärken und/oder komplexer Geometrien mit einem hohem Niveau an Schweißspannungen, eine Wasserstoffarmglühung direkt aus der Schweißhitze bei 300–350 °C für mindestens 3 h erfahren.

Die ferritisch-bainitischen und ferritisch-perlitischen Stählen können nach dem Schweißen direkt wärmebehandelt werden. Ein Abkühlen unterhalb der Mf-temperatur ist aufgrund der bainitischen bzw. ferritisch-perlitischen Mikrostruktur nicht erforderlich

Wärmenachbehandlung

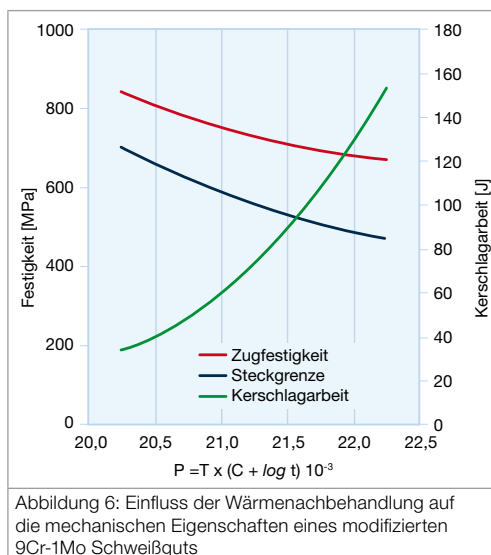
Die Wärmenachbehandlung (WBH) führt dazu, dass Schweißspannungen und Aufhärtungen durch Erholungsprozesse abgebaut werden, womit die Anfälligkeit gegenüber wasserstoffinduzierter Rissbildung sowie Spannungsrisskorrosion reduziert wird. Bei den ferritisch-bainitischen (T/P 23 und T/P 24) und ferritisch martensitischen Stählen (T/P 91, T/P 92, VM12-SHC), die über die Karbid- und Nitridbildung verstärkt sind, führt erst die WBH zur Erzielung der gewünschten Zeitstandeigenschaften notwendigen Ausscheidungsreaktionen.

Ein weiterer Aspekt ist, dass durch die mikrostrukturellen Erholungsprozesse sowie der Abbau der Versetzungsdichte die Zähigkeit des Schweißguts sowie der Wärmebeeinflussten Zone erhöht wird. Der Einfluss der Wärmebehandlungstemperatur (T in K) und -zeit (t in h) lässt sich mittels eines Zeit-Temperaturparameters

$$P = T \times (20 + \log t)$$

zusammenfassen. Abbildung 6 zeigt exemplarisch für einen modifizierten 9Cr-1Mo Schweißzusatz-werkstoff (reines Schweißgut) den Einfluss der Wärmenachbehandlung auch die mechanischen Eigenschaften Zähigkeit und Härte. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Wärmebehandlungsdauer bzw. -temperatur die Zähigkeit ansteigt und die Festigkeit abnimmt. Zum Erreichen einer bestimmten Mindestkerbschlagzähigkeit kann es daher erforderlich sein, die Haltedauer bei gegebener Glühetemperatur zu verlängern. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass die Festigkeit mit zunehmender Wärmebehandlungsdauer bzw. -temperatur abnimmt. Wichtig ist dieser Zusammenhang insbesondere für die Auslegung von Mehrfachwärmebehandlungen, die bei der Fertigung und Reparaturen auftreten können. Hier besteht bei zu langen Glühzeiten und/oder -temperaturen die Gefahr, dass in der Schweißnaht die Mindestanforderungen an die mechanischen Güterwerte nicht mehr erfüllt werden.

Eine WBH austenitischer Schweißverbindungen ist i. d. R nicht erforderlich, kann aber hinsichtlich der Minimierung der Relaxationsrissanfälligkeit bei Einsatztemperaturen um 700 °C, durchgeführt werden. Zu den Relaxationsrissempfindlichen austenitischen Stählen gehören u. a. 304H, 316H, 321H, 347H und Alloy 800H. Bei Nickellegierungen kann außerdem abhängig vom Legierungskonzept eine WBH zur Erzielung der erforderlichen Zeitstandeigenschaften notwendig sein. Zu den sogenannten ausscheidungshärtenden Nickellegierungen gehören u.a. Alloy C 263 und Alloy 740H. Für diese Werkstoffe ist eine WBH bei 800 °C für 3 h erforderlich.



Eine Übersicht der Vormwärm und Zwischenlagentemperaturen und Wärmenachbehandlung einiger im Kraftwerksbau eingesetzten Stähle und Nickellegierungen ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Empfehlungen zur Temperaturführung vor, während und nach dem Schweißen von warmfesten und hochwarmfesten Stählen und Nickellegierungen

Werkstoff	Wandstärke [mm]	Vorwärmtemperatur [°C]	Zwischenlagentemperatur [°C]	Wärmenachbehandlung [°C / h]
P265GH, P355GH	>30	150	400	520–580
16Mo3	>30	150	250	530–580
15NiCuMoNb5-6-4	alle	150	250	530–620
14MoV6-3	alle	200	300	690–730
15CrMoV5-10	alle	200	300	710–740
13CrMo4-5	>8	200	350	600–700
10CrMo9-10	>8	250	350	650–750
7CrWMoNb9-6	>8	150	280	730–750
7CrMoVTiB10-10	>8	150	280	730–750
X10CrMoVNb9-1	alle	180	350	740–770
X10CrWMoVNb9-2	alle	180	350	740–770
X10CrMoWVNb9-1-1	alle	180	350	740–770
X20CrWMo12-1	alle	250	300	720–780
VM12-SHC	alle	180	280	760–780
austenitische Stähle	alle	–	< 150	keine
Alloy 617	alle	–	< 120	980 °C / 3 h
Alloy C 263	alle	–	< 120	800 °C / 8 h

Schweißtechnologie

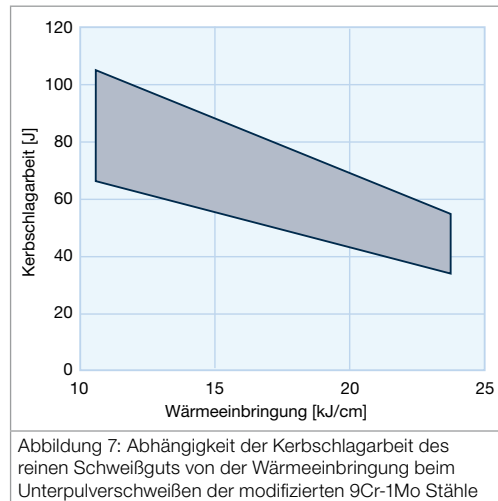
Verarbeitung ferritischer Schweißverbindungen

Die Wärme, die über den Schweißprozess in den Werkstoff eingebracht wird, hat einen direkten Einfluss auf die Mikrostruktur und somit auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißverbindung (Abbildung 6). Die Wärmeeinbringung ergibt sich aus dem thermischen Wirkungsgrad η , der Schweißspannung U , der Schweißstromstärke I und der Schweißgeschwindigkeit nach:

$$E = \eta \times (U \times I) / v$$

Mit zunehmender Wärmeeinbringung werden die Zähigkeitseigenschaften warmfesten Schweißguts generell negativ beeinträchtigt wie Abbildung 7 anhand eines modifizierten 9Cr-1Mo Schweißguts demonstriert. Darüber hinaus besteht bei den ferritisch-martensitischen Stählen sowie bei den austenitischen Stählen und Nickellegierungen die Gefahr der Bildung von Heißrissen. Die Wärmeeinbringung ist daher auf ein Maximum zu begrenzen. In der Praxis hat sich hier eine Wärmeeinbringung im Bereich 10 bis 20 kJ/cm bewährt.

Die erzielbaren Zähigkeitseigenschaften in ferritischem Schweißgut werden im Wesentlichen auch vom Lagenaufbau bestimmt. Empfehlenswert ist der Einsatz der Viellagentechnik, d. h. geringe Lagendicke empfehlenswert, um einen hohen Anteil an vergütetem Schweißgutgefüge und damit ein verbessertes Zähigkeitsniveau zu erreichen.



Verarbeitung austenitischer Schweißzusatzwerkstoffe und Nickellegierungen

Die schweißtechnische Verarbeitung austenitischer und Nickelbasis Schweißzusatzwerkstoffe erfordert höchste Ansprüche an die Sauberkeit. Alle möglichen Quellen für Verunreinigen müssen eliminiert werden, um der tendenziellen Heißrissneigung dieser Schweißgüter Rechnung zu tragen.

Auswahl von Schweißzusätzen

Im Wesentlichen werden artgleich zum Grundwerkstoff legierte Typen verwendet. Aufgrund der typischen Einsatzbedingungen unter Zeitstandsbeanspruchung dürfen im Kraftwerksbau ausschließlich Schweißzusatzwerkstoffe verarbeitet werden, die hinsichtlich des Einsatzes im Langzeitbereich zugelassen sind.

Im Kraftwerksbau werden Stabelektroden mit basischer oder rutiler Umhüllung eingesetzt, wobei letztere aufgrund schlechterer mechanischer Güterwerte und des höheren Wasserstoffangebots nur bedingt Einsatz finden. Stabelektroden werden klassischer Weise bei der Montage auf der Baustelle und für Fertigungs- und Reparaturschweißungen von Gusskomponenten verwendet. Mit Ausnahme von Stabelektroden aus Vakuumverpackung dürfen bei der Verarbeitung nur rückgetrocknete Stabelektroden eingesetzt werden. Rückgetrocknete Stabelektroden müssen zur Vermeidung einer erneuten Feuchtigkeitsaufnahme aufgrund der hygroskopisch wirkenden Umhüllung bis zur Verarbeitung in einem geheizten Köcher aufbewahrt werden.

Dickwandige Komponenten werden aufgrund der hohen Abschmelzung und der guten Beherrschbarkeit des Schweißprozesses üblicherweise mit dem Unterpulver Schweißverfahren verarbeitet. Hierbei werden überwiegend flourid-basische Pulver hoher Basizität verwendet, die auch bei hohen Wandstärken von bis zu 400 mm ein einwandfreies Schweißergebnis abliefern. Dagegen werden zur Schweißung der Kehlnähte bei der Fertigung von Flossenwänden aluminat-rutile Pulver verwendet, die eine ausreichend hohe Schweißgeschwindigkeit ermöglichen. Wie bei der Verarbeitung von Stabelektroden muss das Schweißpulver vor der Verarbeitung rückgetrocknet werden. Es empfiehlt sich ebenfalls, das Pulver warmzuhalten, um die Feuchtigkeitsaufnahme zu verhindern.

Das WIG-Verfahren wird üblicherweise für die Wurzellagen bei der Rohrschweißung sowie für das Verbinden dünnwandiger Rohre eingesetzt. Im Vergleich zu den Schlackeführenden Schweißverfahren ist das WIG-Schweißgut durch wesentlich höhere Zähigkeitseigenschaften charakterisiert. Somit lassen sich die z. T. sehr hohen Schweißspannungen im Bereich der Wurzel besser aufnehmen.

Auch die MAG Massiv- und Fülldraht-Verfahren gewinnen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere die nahtlosen Fülldrähte stellen aufgrund der hervorragenden Verarbeitungseigenschaften wie geringe Spritzerbildung, großes Verarbeitungsfenster, hohe Abschmelzleistung, und den sehr niedrigen Wasserstoffgehalt eine wirtschaftliche und technische Alternative zu den üblichen Schweißverfahren dar. Im Bereich der Fertigungs- und Reparaturschweißung von Gusskomponenten findet das Fülldrahtverfahren neben der Stabelektrode häufig Anwendung. Weitere Anwendungsbereiche sind in der Verbindungsschweißung von Rohrleitungen oder als UP-Metallpulverdraht auch bei der Herstellung von Flossenwänden zu finden.

Tabelle 3: Übersicht der für ausgewählte warmfeste und hochwarmfeste Stähle und Nickellegierungen geeigneten und zugelassenen Schweißzusatzwerkstoffe

Grundwerkstoff	Schweißprozess	Schweißzusatz	VdTÜV
P265GH SA106A,B,C	Stabelektrode	BÖHLER FOX EV 50	✓
	WIG	BÖHLER EMK 6	✓
	MAG	BÖHLER EMK 6	✓
	Fülldraht	BÖHLER Ti 52 Ti-FD / BÖHLER Ti 52 T-FD	✓
	Unterpulver	Union S 2 / UV 420TT(R)	✓
16Mo 3 T/P 1	Stabelektrode	BÖHLER FOX DMO Kb	✓
	WIG	BÖHLER DMO-IG	✓
	MAG	BÖHLER DMO-IG	✓
	Fülldraht	BÖHLER DMO Ti-FD / BÖHLER DMO Kb T-FD	✓
	Unterpulver	Union S 2 Mo / UV 420TT(R) / UV 305	✓
14MoV 6-3	Stabelektrode	BÖHLER FOX DMV 83 kb	✓
	WIG	BÖHLER FOX DMV 83-IG	✓
	MAG	BÖHLER FOX DMV 83-IG	✓
G17CrMoV 5-10	Stabelektrode	BÖHLER FOX DCMV	✓
	Fülldraht	BÖHLER DCMV Kb T-FD	✓
13CrMo 4-5 T/P 11	Stabelektrode	BÖHLER FOX DCMS Kb	✓
	WIG	BÖHLER DCMS-IG	✓
	MAG	BÖHLER DCMS-IG	✓
	Fülldraht	BÖHLER DCMS Ti-FD / BÖHLER DCMS Kb T-FD	✓
	Unterpulver	Union S 2 CrMo / UV 420TT(R) / UV 305	✓
10CrMo 9-10 T/P 22	Stabelektrode	BÖHLER FOX CM 2 Kb	✓
	WIG	BÖHLER CM 2-IG	✓
	MAG	BÖHLER CM 2-IG	✓
	Fülldraht	BÖHLER CM 2 Ti-FD	✓
	Unterpulver	Union S 1 CrMo 2 / UV 420TT(R) / UV 305	✓
7CrWVMoNb 9-6 T/P23	Stabelektrode	Thermanit P 23	✓
	WIG	Union I P 23	✓
	Unterpulver	Union S P23 / UV P 23 / UV 305	✓
7CrMoVTiB 10-10 T24	Stabelektrode	Thermanit P 24	✓
	WIG	Thermanit P 24	✓
	Unterpulver	Union S P 24 / UV 305	✓

Grundwerkstoff	Schweißprozess	Schweißzusatz	VdTÜV
X10CrMoVNb 9-1 P91	Stabelektrode	Thermanit MTS 3	✓
	WIG	Thermanit MTS 3	✓
	Unterpulver	Thermanit MTS 3 / Marathon 543	✓
	Fülldraht	BÖHLER C 9 MV Ti-FD	
X10CrWMoVNb 9-2 P92	Stabelektrode	Thermanit MTS 616	✓
	WIG	Thermanit MTS 616	✓
	Unterpulver	Thermanit MTS 616 / Marathon 543	✓
	Fülldraht	BÖHLER P92 Ti-FD	
CB2 / FB2	Stabelektrode	Thermanit MTS 5 Co 1	✓
	Fülldraht	BÖHLER CB2 Ti-FD	✓
X12CrCoWVNb 11-2-2 VM12-SHC	Stabelektrode	Thermanit MTS 5 CoT	✓
	WIG	Thermanit MTS 5 CoT	✓
X6CrNi 18-10 304H	Stabelektrode	Thermanit ATS 4	✓
	WIG	Thermanit ATS 4	✓
	MAG	Thermanit ATS 4	✓
	Unterpulver	Thermanit ATS 4 / Marathon 104	✓
X3CrNiMoBN 17-13-3	Stabelektrode	BÖHLER FOX CN 16-13	
	WIG	BÖHLER CN 16-13-IG	
X8CrNiNb 16-13 347H	Stabelektrode	BÖHLER FOX CN 16-13	✓
	WIG	BÖHLER CN 16-13-IG	✓
X8CrNi 19-11 347H FG	Stabelektrode	Thermanit 617 (D)	
	WIG	Thermanit 617	
X10CrNiCu Nb 18-9-3 Super 304H / DMV 304 HCu	Stabelektrode	Thermanit 304 HCu	
	WIG	Thermanit 304 HCu	✓
X6CrNiNbN 25-20 HR3C / DMV 310N	Stabelektrode	Thermanit 617 (D)	
	WIG	Thermanit 617	✓
Sanicro 25	Stabelektrode	Thermanit 617 (D)	
	WIG	Thermanit 617	
HR6W	Stabelektrode	Thermanit 617 (D)	
	WIG	Thermanit 617	
Alloy 617 (B)	Stabelektrode	Thermanit 617 (D)	✓
	WIG	Thermanit 617	✓
Alloy C 263	Stabelektrode	Thermanit 263	
	WIG	Thermanit 263	
Alloy 740 H	Stabelektrode	Thermanit 263	

Mischverbindungen

Im Kraftwerksbau müssen eine Vielzahl unterschiedlicher Mischverbindungen aus ferritischen, austenitischen und Nickelwerkstoffen sowohl bei der Komponentenfertigung in der Werkstatt als auch bei der Errichtung vor Ort hergestellt werden.

Die Herstellung von Mischverbindungen bedingt bei der Auswahl von geeigneten Schweißzusatzwerkstoffen die metallurgischen (Auf- bzw. Ablegieren des Schweißguts, Heißbrissanfälligkeit, Bildung spröder Phasen, etc.) und physikalischen Eigenschaften (Wärmeausdehnung, Wärmeleitfähigkeit) der jeweiligen zu verschweißenden Werkstoffe. Eine korrekte Herstellung der Mischverbindung erfordert die Wärmeführung (Vorwärmtemperatur, Zwischenlagentemperatur und Wärmenachbehandlung) auf die zu verbindenden Partner abzustimmen. Die Wärmeführung stellt meist einen Kompromiss dar, da man bei der Verarbeitung von den optimalen Bedingungen der jeweiligen Werkstoffpartner abweichen muss.

Die Auswahl des Schweißsatzwerkstoffes für eine Verbindung unterschiedlicher ferritischer Stähle untereinander orientiert sich an dem niedriger legierten Partner. Zum einen wird die Festigkeit der Verbindung i. d. R. von dem niedriger Legierten Partner bestimmt und zum anderen verfügt das niedriger legierte Schweißgut i. d. R. auch über höhere Zähigkeitseigenschaften. Hinsichtlich der Wärmeführung ist darauf zu achten, dass die Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur auf den kritischeren Partner abgestimmt ist. Die Festlegung der Wärmenachbehandlung muss die Erfordernisse der jeweiligen zu verbindenden Partner und des geeigneten Schweißzusatzwerkstoffes berücksichtigen, und stellt in den meisten Fällen einen Kompromiss dar. Bei der Verbindung von unlegierten Stählen mit legierten Stählen kommt erschwerend hinzu, dass Kohlenstoff in Richtung des höherlegierten Stahls abwandern kann. Dieser Effekt tritt wegen der hohen Affinität von Kohlenstoff zur Bildung von Chromkarbiden besonders dann auf, wenn Werkstoffe mit deutlich unterschiedlichen Chromgehalten verbunden werden. Dies resultiert in der Bildung von harten, aufgekohlten Zonen entlang der Fusionslinie des höher Legierten Werkstoffs bzw. zu weicher, entkohlter Zonen entlang der Fusionslinie des niedriger legierten Werkstoffs. Die folgende Abbildung 8 und 9 zeigen die Mikrostruktur sowie das Kohlenstoff- und Chromprofil entlang der Schweißverbindung einer 10CrMo9-10 / X10CrMoVNb9-1 Verbindung.

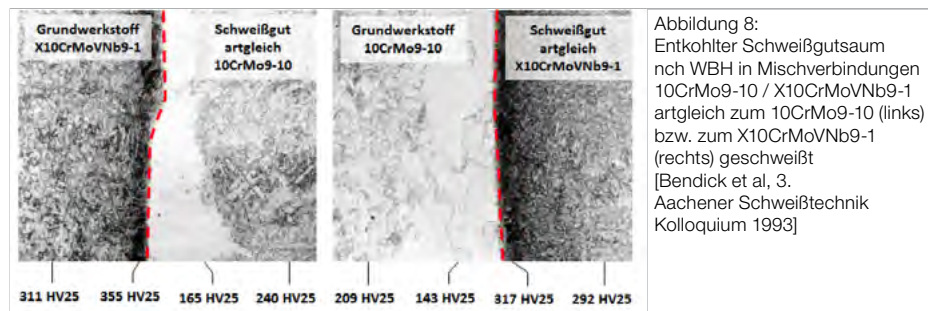


Abbildung 8: Entkohlter Schweißgutsaum nach WBH in Mischverbindungen 10CrMo9-10 / X10CrMoVNb9-1 artgleich zum 10CrMo9-10 (links) bzw. zum X10CrMoVNb9-1 (rechts) geschweißt [Bendick et al., 3. Aachener Schweißtechnik Kolloquium 1993]

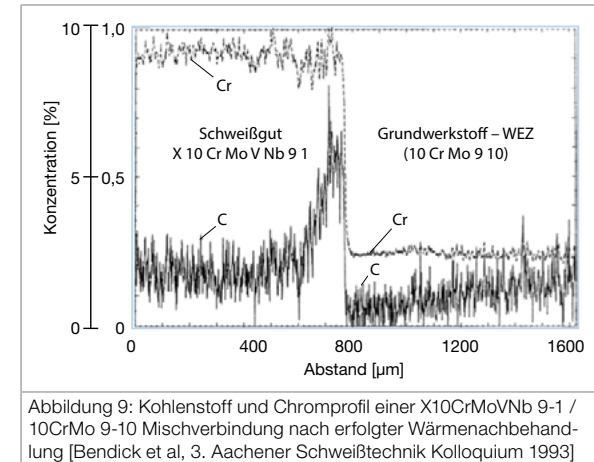


Abbildung 9: Kohlenstoff und Chromprofil einer X10CrMoVNb 9-1 / 10CrMo 9-10 Mischverbindung nach erfolgter Wärmenachbehandlung [Bendick et al., 3. Aachener Schweißtechnik Kolloquium 1993]

Der Effekt der Kohlenstoffmigration kann zwar nicht unterbunden werden, lässt sich aber minimieren. Unter Berücksichtigung der temperatur-, und zeitabhängigen Diffusionsprozesse - sind Wärmenachbehandlungstemperatur und -zeit eher im unteren Bereich der zugelassenen Temperaturspanne anzusetzen. Aus dieser Abhängigkeit leitet sich zur Auswahl des Schweißzusatzes die Forderung ab, sich artgleich zum niedriger legierten Werkstoff zu orientieren. Die höherlegierte Variante würde wegen der niedrigeren WB Temperatur für diese Mischverbindung keinen ausreichende Zähigkeit erwarten lassen. Eine weitere Möglichkeit die Kohlenstoffmigration zu minimieren ist es, einen Schweißzusatzwerkstoff auszuwählen, der mit Sonderkarbidbildner wie z. B. Vanadium, Niob, Titan legiert ist (z. B. Schweißzusatz artgleich zum 7CrMoV-TiB10-10), da die Triebkraft zur Bildung der Sonderkarbide größer ist als diejenige zur Bildung der Chromkarbide.

Sofern es keine Überlappung der Zulässigen WBH-Temperatur gibt (z. B. bei der Verbindung eines 13CrMo4-5 mit X10CrMoVNb9-1) empfiehlt es sich, ein Verbindungsstück einzusetzen, das sowohl zum höher- als auch zum niedriger legierten Werkstoffpartner eine Überlappung in der WBH-temperatur aufweist. Dies bedeutet für die Verbindung 13CrMo4-5 (WBH: 600–700 °C) mit X10CrMoVNb9-1 (WBH: 740–770 °C) ein Verbindungsstück aus 10CrMo9-10 (WBH: 650–750 °C). Alternativ lässt sich eine solche Verbindung mit einer sogenannten Puffertechnik herstellen. Der X10CrMoVNb9-1 wird mit einem 10CrMo9-10 Schweißgut gepuffert und anschließend mit der für den X10CrMoVNb9-1 notwendigen Temperatur wärmebehandelt. Im nächsten Schritt wird die Verbindung des gepufferten X10CrMoVNb9-1 zum 13CrMo4-5 unter Einsatz des zum 10CrMo9-10 artgleichen Schweißzusatzes geschweißt. Die Finale WBH orientiert sich dann am 13CrMo4-5.

Im Falle einer Verbindung von ferritischen warmfesten Stählen mit austenitischen Stählen ist zu beachten, dass austenitische Stähle i. d. R. mit niedrigerer Wärmeeinbringung und niedrigerer Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur geschweißt werden. Eine WBH ist wegen der Möglichkeit zur Bildung spröder Phasen und Herabsetzung der Korrosionsbeständigkeit ebenfalls nicht möglich. Hinsichtlich der Auswahl geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe sind für warmgehende Komponenten ausschließlich Schweißzusätze auf Nickelbasis einzusetzen. Diese haben den Vorteil, dass die Wärmeausdehnung zwischen derjenigen der Ferrite und Austenite liegt. Vorteile ergeben sich so bei der schweißtechnischen Verarbeitung (Verringerung der Schweißeigen- spannungen) und beim Betriebsverhalten (Abmilderung der metallurgischen Kerbwirkung).

Ein weiterer Vorteil für Mischverbindungen geeigneter Nickelbasis Schweißzusätze liegt darin, dass das betreffende Schweißgut wärmebehandelbar ist. Bei der Auswahl eines geeigneten Schweißzusatzwerkstoffs sind die Zeitstandeigenschaften sowie ggf.

Versprödungs- und Aufhärtungsneigung bei Betriebs- bzw. Auslegungstemperatur zu berücksichtigen. Sofern der ferritische Werkstoffpartner eine WBH benötigt, wird wie oben beschrieben, mit der Puffertechnik gearbeitet. Der ferritische Grundwerkstoff wird mit dem Nickelbasis Schweißzusatz gepuffert und anschließend wärmebehandelt. Zu beachten sind hier die Verarbeitungsrichtlinien für Nickelbasis Schweißzusätze i. d. R. mit niedriger Wärmeeinbringung und bei maximal 150 °C Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur. Danach wird die Verbindung zum Austenit mit demselben Schweißzusatz ohne WBH fertiggestellt.

Die Verbindung der Nickelwerkstoffe mit ferritischen oder austenitischen Stählen erfordert ebenfalls Nickelbasis Schweißzusatzwerkstoffe. Die Zeitstandeigenschaften und Versprödungs- sowie Aufhärtungsneigung des Schweißgutes müssen bei der Auswahl eines geeigneten Schweißzusatzwerkstoffs Berücksichtigung finden. Eine Auswahl geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe für verschiedene Mischverbindungen findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Auswahlhilfe für Schweißzusatzwerkstoffe (Böhler, Union, Thermanit) zur Herstellung von Mischverbindungen für Betriebstemperaturen >300 °C.

	P265GH (Grade A)	16Mo 3 (T/P1)	13CrMo 4-5 (T/P11)	10CrMo 9-10 (T/P22)		7CrMoVTiB 10-10 (T/P24)	X10CrMoVNB 9-1 (T/P91)	X10CrWMoVNB 9-2 (T/P92)	X12CrMoWVNB 11-2-2 (VM12-SHC)	X6CrNi 18-10 (304 H)	X10CrNiCuNb 18-9-3 (304 Hcu)	Alloy 617 (B)
P265GH (Grade A)	EMK 6	DMO	DMO	-		-	-	-	-	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82
16Mo 3 (T/P1)	DMO	DMO	DMO	DMO		-	-	-	-	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82
13CrMo 4-5 (T/P11)	DMO	DMO	DCMS	DCMS		-	-	-	-	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82
10CrMo 9-10 (T/P22)	-	DMO	DCMS	CM 2		P 24	P 24	P 24	P 24	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82
7CrMoVTiB 10-10 (T/P24)	-	-	-	P 24		P 24	P 24	P 24	P 24	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82
X10CrMoVNB 9-1 (T/P91)	-	-	-	P 24		P 24	MTS 3	MTS 3	MTS 3	Nicro 82	617	617
X10CrWMoVNB 9-2 (T/P92)	-	-	-	P 24		P 24	MTS 3	MTS 616	MTS 616	Nicro 82	617	617
X12CrMoWVNB 11-2-2 (VM12-SHC)	-	-	-	P 24		P 24	MTS 3	MTS 616	MTS 5 CoT	Nicro 82	617	617
X6CrNi 18-10 (304 H)	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82		Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82	ATS 4	ATS 4	617
X10CrNiCuNb 18-9-3 (304 Hcu)	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82		Nicro 82	617	617	617	ATS 4	304 Hcu	617
Alloy 617 (B)	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82	Nicro 82		Nicro 82	617	617	617	617	617	617

Nichtrostende Stähle

Die Gruppe der nichtrostenden Stähle beinhaltet eine große Anzahl sehr unterschiedlicher Legierungsvarianten, deren gemeinsames Merkmal ein Chromgehalt von mindestens 12 % darstellt. Damit ist gewährleistet, dass sich unter oxidierenden Bedingungen an der Stahloberfläche eine dünne, stabile Oxidschicht bildet und der Stahl vom aktiven (löslichen) in den passiven (unlöslichen) Zustand übergeht. Im passiven Zustand ist eine erhöhte Beständigkeit gegen oxidierende Medien vorhanden.

In reduzierender Umgebung, d.h. bei verringertem Sauerstoffangebot, kann der ehemals passive Stahl in den aktiven Zustand übergehen. Der für eine gewisse chemische Beständigkeit des Stahles erforderliche Chromgehalt von mindestens 12 % wird sehr häufig als „Resistenzgrenze“ bezeichnet.

Das Legierungselement Chrom und in weiterer Folge Nickel stellen die Basiselemente für nichtrostende Stähle dar. Ihre Wirkung im Sinne der Gefügeausbildung im Stahl ist jedoch sehr unterschiedlich. Während Chrom mit steigenden Gehalten das Gamma-Gebiet abschirmt und ab etwa 12 % von Erstarrungs- bis Raumtemperatur nur noch Ferrit (= kubisch raumzentrierter Mischkristall) vorherrscht, wird mit steigendem Nickelgehalt das Gamma-Gebiet erweitert. Ab einem bestimmten Nickelgehalt besteht das Gefüge von Erstarrungs- bis Raumtemperatur nur noch aus Austenit (= kubisch flächenzentrierter Mischkristall).

Alle weiteren Legierungselemente, die dem Stahl zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften zugegeben werden, lassen sich in ihrer Wirkung auf die Gefügeausbildung entweder dem Chrom oder dem Nickel zuordnen. Dies bedeutet, dass man in der Lage ist, zwischen ferritbildenden und austenitbildenden Elementen zu unterscheiden.

Ferritbildende Elemente	Austenitbildende Elemente
Chrom	Nickel
Silizium	Mangan
Aluminium	Kohlenstoff
Molybdän	Kobalt
Niob	Kupfer
Titan	Stickstoff
Wolfram	
Vanadium	

Legiert man einer ferritischen Eisen-Chrom-Legierung ausreichende Mengen an Nickel zu, so geht diese in den austenitischen Zustand über. In nachstehender Tabelle sind die wesentlichsten nichtrostenden Stahlgruppen nach ihrer Gefügestruktur angeführt.

Gefügestruktur	Werkstofftypen
perlitisch-martensitisch	X30Cr13
halbferritisch-ferritisch	X8Cr17
weichmartensitisch	X5CrNi13-4
ferritisch-austenitisch	X2CrNiMoN22-5
Austenit mit Ferrit	X5CrNi18-9
Austenit ohne Ferrit	X8CrNiNb16-13

Diese Stahlgruppen unterscheiden sich sowohl in metallurgischer als auch physikalischer Hinsicht voneinander und es muss den jeweiligen Besonderheiten durch geeignete Maßnahmen bei der schweißtechnischen Verarbeitung Rechnung getragen werden.

Hochlegierte Stähle und ihre typischen Eigenschaften

	Bezeichnung		Name	Chem. Analyse Typische Werte in Gew.-%							Mechanische Gütewerte Typische Werte, Raumtemperatur			
	EN	ASTM/UNS		C	N	Cr	Ni	Mo	Others	Product	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	
Nasskorrosion und allgemeine Anwendungen	Ferritisch	1.4003	S40977	410L	0,02	–	11,5	0,5	–	–	P	360	570	28
		1.4003	S40977	410L	0,02	–	11,5	0,5	–	–	P	360	570	28
		1.4000	S41008	410S	0,03	0,01	12,5	–	–	–	P	270	490	30
		1.4016	S43000	430	0,04	–	16,5	–	–	–	C	380	520	25
		1.4509	S43932	441	0,02	–	18	–	–	Nb, Ti	C	360	520	30
		1.4510	S43035	439	0,02	–	17	–	–	Ti	C	300	460	31
		1.4511	430 Cb	430 Cb	0,02	–	16,2	–	–	Nb	C	320	475	30
		1.4512	S40910	409	0,02	–	11,5	0,2	–	Ti	C	370	530	28
		1.4521	444	441	0,02	0,01	18	–	2,1	Ti	P	360	540	26
		1.4622	S44330	443	0,02	0,02	21	–	–	Cu, Ti, Nb	C	360	470	22
	Martensitisch	1.4006	S41000	410	0,12	0,04	12	–	–	–	P ⁵	300	560	30
		1.4021	S42000	420	0,20	–	13	–	–	–	P ⁴	500	650	20
		1.4024	S42000	420	0,16	–	13,2	–	–	–	C	–	550	20
		1.4057	S43100	431	0,18	–	15,6	1,7	–	–	C ⁵	520	915	18
		1.4313	S41500	415	0,03	0,04	12,5	4,1	0,6	–	P ⁵	700	850	20
		1.4548	630 / S17480	17-4 PH	0,05	0,07	15,5	4,2	–	Mn	R	850	1100	22
		1.4418	–	248 SV	0,03	–	16	5	1	–	P ⁵	750	915	18
	Duplex	1.4162	S32101	LDX 2101 [®]	0,03	0,22	21,5	1,5	0,3	5Mn	P	480	700	38
		1.4062	S32202	2202	0,03	0,20	22	2	0,3	2Mn	P	450	650	30
		1.4362	S32304	2304	0,02	0,10	23	4,8	0,3	–	P	450	670	40
		1.4662	S82441	LDX 2404 [®]	0,20	0,27	24	3,6	1,6	3Mn, Cu	P	520	750	33
		1.4462	S32205 ¹	2205	0,02	0,17	22	5,7	3,1	–	P	510	750	35
		1.4501	S32760	Zeron 100 [®]	0,02	0,27	25,4	6,9	3,8	W	P	507	805	35
		1.4410	S32750	2507	0,02	0,27	25	7	4	–	P	560	830	35
	Austenitisch	1.4310	S30100	301	0,10	–	17	7	–	–	C	300	800	50
		1.4318	S30153	301LN	0,02	0,14	17,7	6,5	–	–	C	360	765	47
		1.4372	S20100	201	0,05	0,20	17	4	–	7Mn	C	390	720	45
		1.4301	S30400	304	0,04	–	18,1	8,1	–	–	P	290	600	55
		1.4307	S30403	304L	0,02	–	18,1	8,1	–	–	P	280	580	55
		1.4311	S30453	304LN	0,02	0,14	18,5	9,2	–	–	P	320	640	55
1.4541		S32100	321	0,04	–	17,3	9,1	–	Ti	P	250	570	55	
1.4550		S34700	347	0,05	0,04	17,5	9,5	–	Nb	P	260	595	45	
1.4306		30403	304L	0,02	–	18,2	10,1	–	–	P	280	580	55	

¹⁾ auch als S31803, ²⁾ 724L ist eine Modifikation von 4435 für Urea Anwendungen, ⁴⁾ gegläht,

⁵⁾ abgeschreckt; P = Warmwalzblech, C = Kaltwalzblech

Hochlegierte Stähle und ihre typischen Eigenschaften

	Bezeichnung		Name	Chem. Analyse Typische Werte in Gew.-%							Mechanische Gütewerte Typische Werte, Raumtemperatur			
	EN	ASTM/UNS		C	N	Cr	Ni	Mo	Others	Product	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	
Nasskorrosion und allgemeine Anwendungen	Austenitisch	1.4401	S31600	316	0,04	–	17,2	10,1	2,1	–	P	280	570	55
		1.4404	S31603	316L	0,02	–	17,2	10,1	2,1	–	P	280	570	55
		1.4436	S31600	316	0,04	–	16,9	10,7	2,6	–	P	300	590	50
		1.4432	S31603	316L	0,02	–	16,9	10,7	2,6	–	P	280	570	50
		1.4406	S31653	316LN	0,02	0,14	17,2	10,3	2,1	–	P	320	620	50
		1.4429	S31653	316LN	0,02	0,14	17,3	12,5	2,6	–	P	350	670	45
		1.4571	S31635	316Ti	0,04	–	16,8	10,9	2,1	Ti	P	270	570	50
		1.4435 ²	S31603	316L	0,02	–	17,3	12,6	2,6	–	P	270	570	55
		1.4438	S31703	317L	0,02	–	18,2	13,7	3,1	–	P	300	610	50
		1.4434	S31753	317LN	0,02	0,15	18,2	13	3,1	–	P	290	590	40
		1.4439	S31726	317LMN	0,02	0,14	17,3	13,7	4,1	–	P	310	640	50
		1.4466	S31050	725LN	0,01	0,12	25	22,3	2,1	–	P	290	630	55
		1.3964	S20910	Nitronic 50	0,02	0,27	20,5	15,4	3,2	Mn, Nb	P	460	800	40
		1.4539	N08904	904L	0,01	–	20	25	4,3	1.5Cu	P	260	600	50
		1.4529	N08926	1925Mo	0,01	0,20	20,5	24,8	6,5	Cu	P	360	750	55
		1.4547	S31254	254 SMO [®]	0,01	0,20	20	18	6,1	Cu	P	340	680	50
1.4565	S34565	Alloy 24	0,02	0,45	24	17	4,5	5.5Mn	P	440	825	55		
1.4652	S32654	654 SMO [®]	0,02	0,45	23	21	7	2Mn, Cu	P	450	830	60		
Temperatur-/Kriechfestigkeit	Ferritisch	1.4713	–	1.4713	0,07	0,02	6,5	–	–	0.7Al	P	320	475	30
		1.4724	S40500	405	0,08	0,02	12,3	–	–	0.8Al	P	340	515	30
		1.4742	S40910	442	0,08	0,02	17,5	–	–	1Al	P	375	535	25
		1.4762	S44600	446	0,08	0,02	23,4	–	–	1.4Al	P	405	555	30
	Austenitisch	1.4948	S30409	304H	0,05	–	18,1	8,3	–	–	P	290	600	55
		1.4878	S32109	321H	0,05	–	17,3	9,1	–	Ti	P	250	570	55
		1.4818	S30415	153MA [™]	0,05	0,15	18,5	9,5	–	1.3Si, Ce	P	340	660	55
		1.4833	S30908	309S	0,06	–	22,3	12,6	–	–	P	300	620	50
		1.4828	S30700	309	0,04	–	20	12	–	2Si	P	270	610	55
		1.4835	S30815	253MA [®]	0,09	0,17	21	11	–	1.6Si, Ce	P	370	700	50
1.4845	S31008	310S	0,05	–	25	20	–	–	P	270	600	50		
1.4841	S31400	310	0,07	0,05	24,5	19,5	–	2Si	P	275	595	55		

¹⁾ auch als S31803, ²⁾ 724L ist eine Modifikation von 4435 für Urea Anwendungen, ⁴⁾ gegläht,

⁵⁾ abgeschreckt; P = Warmwalzblech, C = Kaltwalzblech

Hochlegierte Stähle und ihre typischen Eigenschaften

Name	Physikalische Eigenschaften					Fabrication	
	Elastizitätsmodul, E GPa, RT	Thermischer Ausdehnungskoeffizient 20°C ¹ and T, 10–6/°C, 100°C	Thermische Leitfähigkeit λ^2 , J/Kg °C, RT	Spezifische Wärmekapazität ³	Electric resistivity ⁴ $\mu\Omega\text{m}$	Temperatur Wärme- ⁵ nachbehandlung, °C	Schweißzusätze
410L	220	10,4	25	430–460	0,60	A 730 ± 30	13, 19 9 L, 18 8 Mn / 410, 308L, 307
410S	220	10,5	30	430–460	0,60	A 780 ± 30	13, 19 9 L / 410, 308L
430	220	10,0	25	430–460	0,60	A 800 ± 30	19 9 L, 23 12 L, 18 Nb L / 308L, 309L, 430
441	220	10,0	25	430–460	0,60	A 900 ± 30	19 9 L, 23 12 L, 18 Nb L / 308L, 309L, 430
439	220	10,0	25	430–460	0,60	A 800 ± 30	19 9 L, 17 Nb L, 18 Ti L, 17 Ti / 308L, 439Nb, 439, 430
430 Cb	220	10,5	25	430–460	0,60	A 820 ± 30	19 9 L, 18 Nb L / 308L, 430
409	220	10,5	25	430–460	0,60	A 800 ± 30	19 9 L, 23 12 L, 13 Nb L, 18 Nb L / 308L, 309L, 409Nb, 430
441	220	10,4	23	430–460	0,60	A 850 ± 30	19 12 3 L, 23 12 2 L / 316L, 309LMo
443	220	10,0	21	430–460	0,65	A 920 ± 30	19 12 3 L / 316L
410	215	10,5	30	450	0,80	A 780 ± 30	13, 13 Nb L, 19 9, 19 9 Nb, 23 12 / 410, 409Nb, 308, 347, 309
420	215	10,5	30	450	0,80	T 740 ± 40	13, 13 Nb L, 19 9, 19 9 Nb, 23 12 / 410, 409Nb, 308, 347, 309
420	216	10,5	30	460	0,60	A 775 ± 25	13, 13 Nb L, 19 9 Nb / 410, 409Nb, 347
431	216	10,5	25	460	0,70	T 700 ± 50	17, 19 13 2 L, 18 8 Mn / 430, 316L, 307
415	200	10,5	25	450	0,80	T 600 ± 40	13 4, 16 6 Mo, 17 6 / 410NiMo, 630
17–4 PH	200	10,9	16	500	0,71	A 1040 ± 15	17 6 16 6 Mo, 16 5 1 / 630
248 SV	200	10,3	15	450	0,80	T 610 ± 40	17 4 Cu, 19 9 L / 630, 308L
LDX 2101®	200	13,0	15	500	0,80	A 1050 ± 30	23 7 N L, 22 9 3N L / 2307, 2209
2202	200	13,0	15	500	0,80	A 1050 ± 30	23 7 N L, 22 9 3N L / 2307, 2209
2304	200	13,0	15	500	0,80	A 1000 ± 50	23 7 N L, 22 9 3N L / 2307, 2209
LDX 2404®	200	13,0	15	500	0,80	A 1100 ± 20	25 9 4 N L, 22 9 3 N L / 2594 / 2209
2205	200	13,0	15	500	0,80	A 1060 ± 40	22 9 3 N L, 25 9 4 N L / 2209, 2594
Zeron 100®	200	13,0	15	500	0,80	A 1080 ± 40	25 9 4 N L / 2594
2507	200	13,0	15	500	0,80	A 1080 ± 40	25 9 4 N L / 2594
301	200	16,0	15	500	0,73	A 1050 ± 40	19 9 L / 308L
301LN	200	16,0	15	500	0,73	A 1060 ± 40	19 9 L / 308L
201	200		15			A 1050 ± 50	18 8 Mn, 23 12 L / 307, 309
304	200	16,0	15	500	0,73	A 1050 ± 50	19 9, 19 9 / 308L, 308L
304L	200	16,0	15	500	0,73	A 1050 ± 50	19 9 L / 308L
304LN	200	16,0	15	500	0,73	A 1050 ± 50	19 9 L / 308L
321	200	16,0	15	500	0,73	A 1050 ± 50	19 9 Nb, 19 9 L / 347, 308L
347	200	16,0	15	500	0,73	A 1070 ± 50	19 9 Nb, 19 9 L / 347, 308L
304L	200	16,0	15	500	0,73	A 1050 ± 50	19 9 L / 308L

Unlegierter Stahl: ¹12.0, ²55, ³460, ⁴0.18; ⁵A = glühen, T = anlassen

Hochlegierte Stähle und ihre typischen Eigenschaften

Name	Physikalische Eigenschaften					Electric resistivity ⁴ μΩm	Fabrication	
	Elastizitätsmodul, E GPa, RT	Thermischer Ausdehnungskoeffizient 20°C ¹ and T, 10–6/°C, 100°C	Thermische Leitfähigkeit λ ² , J/Kg °C, RT	Spezifische Wärmekapazität ³			Temperatur Wärme- ⁵ nachbehandlung, °C	Schweißzusätze
316	200	16,0	15	500		0,75	A 1070 ± 40	19 12 3, 19 12 3L / 316, 316L
316L	200	16,0	15	500		0,75	A 1070 ± 40	19 12 3 L / 316L
316	200	16,0	15	500		0,75	A 1070 ± 40	19 12 3 L / 316L
316L	200	16,0	15	500		0,75	A 1070 ± 40	19 12 3 L / 316L
316LN	200	16,0	15	500		0,75	A 1070 ± 40	19 12 3 L / 316L
316LN	200	16,0	15	500		0,75	A 1070 ± 40	19 12 3 L / 316L
316Ti	200	16,5	15				A 1070 ± 40	19 12 3 Nb, 19 12 3L / 318, 316L
316L	200	16,0	15	500		0,75	A 1070 ± 40	19 12 3 L / 316L
317L	200	16,0	14	450–500		0,80–1,00	A 1110 ± 40	19 13 4 L / 317L
317LN	200	16,0	14	450–500		0,80–1,00	A 1125 ± 25	19 13 4 L / 317L
317LMN	200	16,0	14	450–500		0,80–1,00	A 1100 ± 40	18 16 5 N L, 20 25 5 Cu L / 317L, 385
725LN	195	15,7	14	450–500		0,80–1,00	A 1110 ± 40	25 22 2 N L
Nitronic 50	195	15,7	14				A 1055 ± 25	22 17 8 4 N L
904L	195	15,8	12	450–500		0,80–1,00	A 1100 ± 40	20 25 5 Cu L, Ni 8025, Ni 6625 / 383, NiCrMo–3
1925Mo	195	15,8	12	450–500		0,80–1,00	A 1150 ± 30	Ni 6625, Ni 6059 / NiCrMo–3, NiCrMo–13
254 SMO®	195	16,5	14	450–500		0,80–1,00	A 1175 ± 25	Ni 6625, Ni 6059 / NiCrMo–3, NiCrMo–13
Alloy 24	190	14,5	12	450–500		0,80–1,00	A 1145 ± 25	Ni 6059 / NiCrMo–13
654 SMO®	190	15,0	8.6				A 1180 ± 30	Ni 6059 / NiCrMo–13
	400°C	400°C	400°C					
1.4713		12,0	23				A 810 ± 30	18 8 Mn, 23 12, 19 9 Nb, 25 4, 22 12 H / 307, 309, 347, 309
405		11,5	21				A 830 ± 30	23 12, 22 12, 25 4, 17 Ti / 309, 430
442		11,5	19				A 830 ± 30	23 12, 22 12 H, 21 10 N, 25 4, 25 20 / 309, 310
446		11,5	17				A 830 ± 30	25 20, 23 12, 25 4 / 310, 309
	500°C	500°C	500°C					
304H	158	18,4	21.9				A 1080 ± 30	19 9 / 308H
321H	158	18,4	21.6				A 1070 ± 50	19 9 Nb
153MA™	163	18,2	21.2				A 1070 ± 50	21 10 N
309S	158	18,4	20.5				A 1100 ± 50	23 12, 22 12 H, 25 20 / 309, 310
309	158	18,4	20.5				A 1100 ± 50	23 12, 22 12 H, 25 20 / 309, 310
253MA®	163	18,2	21.2				A 1070 ± 50	21 10 N
310S3	158	18,4	19.8				A 1100 ± 50	25 20
310	158	18,8	19.0				A 1100 ± 50	25 20

Unlegierter Stahl: ¹12.0, ²55, ³460, ⁴0.18; ⁵A = glühen, T = anlassen

Austenitische Stähle und empfohlene Schweißzusätze

Typ	EN	UNS	Schweißzusatz
301	1.4310	S30100	19 9 L / 308L
301LN	1.4318	S30153	19 9 L / 308L
304	1.4301	S30400	19 9 / 308 or 19 9 L / 308L
304L	1.4306	S30403	19 9 L / 308L
304L	1.4307	S30403	19 9 L / 308L
321	1.4541	S32100	19 9 Nb / 347 or 19 9 L / 308L
347	1.4550	S34700	19 9 Nb / 347 or 19 9 L / 308L
304LN	1.4311	S30453	19 9 L / 308L
316	1.4401	S31600	19 12 3 / 316 or 19 12 3L / 316L
316L	1.4404	S31603	19 12 3 L / 316L
316L	1.4432	S31603	19 12 3 L / 316L
316L	1.4435	S31603	19 12 3 L / 316L
316L	1.4436	S31600	19 12 3 L / 316L
316LN	1.4406	S31653	19 12 3 L / 316L
316LN	1.4429	S31653	19 12 3 L / 316L
316Ti	1.4571	S31635	19 12 3 Nb / 318 or 19 12 3L / 316L
317L	1.4438	S31703	19 13 4 L / 317L
317LN	1.4434	S31753	19 13 4 L / 317L
317LMN	1.4439	S31726	18 16 5 N L / 317L or 20 25 5 Cu L / 385
725LN	1.4466	S31050	25 22 2 N L
904L	1.4539	N08904	20 25 5 Cu L or Ni 8025 / 383 or Ni 6625 / NiCrMo-3
20-25-7 1925Mo	1.4529	N08926	Ni 6625 / NiCrMo-3 or Ni 6059 / NiCrMo-13
254 SMO®	1.4547	S31254	Ni 6625 / NiCrMo-3 or Ni 6059 / NiCrMo-13
Alloy 24	1.4565	S34565	Ni 6059 / NiCrMo-13
654 SMO®	1.4562	S32654	Ni 6059 / NiCrMo-13
304H	1.4948	S30409	19 9 / 308H
321H	1.4878	S32109	19 9 Nb
153 MATM	1.4818	S30415	21 10 N
309S	1.4833	S30908	23 12 / 309, 22 12 H / 309, 25 20 / 310
309	1.4828	S30900	23 12 / 309, 22 12 H / 309, 25 20 / 310
253 MA®	1.4835	S30815	21 10 N
310	1.4841	S31400	25 20
310S	1.4845	S31008	25 20

Ferritische Stähle und empfohlene Schweißzusätze

Typ	EN	UNS	Schweißzusatz
410S	1.4000	S41008	13 / 410 or 19 9 L / 308L
410L	1.4003	S40977	13 / 410, 19 9 L / 308L or 18 8 Mn / 307
430	1.4016	S43000	19 9 L / 308L, 23 12 L / 309L or 18 Nb L / 430
441	1.4509	S43932	19 9 Nb or 18 8 Mn / 307, 18 Ti L / 439 or 18 Nb Ti L / 430Nb
439	1.4510	S43035	19 9 L / 308L, 17 Nb L / 439Nb, 18 Ti L / 439 or 17 Ti / 430
430Cb	1.4511	430Cb	19 9 L / 308L, 18 Nb L / 430
409	1.4512	S40910	19 9 L / 308L or 23 12 L / 309L, 13 Nb L / 409Nb or 18 Nb L / 430
444	1.4521	S44400	19 12 3 L / 316L or 23 12 2 L / 309LMo
443	1.4622	S44330	19 12 3 L / 316L
–	1.4713	–	18 8 Mn / 307, 23 12 / 309, 19 9 Nb / 347, 25 4 or 22 12 H / 309
405	1.4724	S40500	23 12 / 309, 22 12, 25 4 or 17 Ti / 430
442	1.4742	S44200	23 12 / 309, 22 12 H / 309, 21 10 N, 25 4 or 25 20 / 310
446	1.4762	S44600	25 20 / 310, 23 12 / 309 or 25 4

Duplex Stähle und empfohlene Schweißzusätze

Typ	EN	UNS	Schweißzusatz
LDX 2101®	1.4161	–	23 7 N L / 2307 or 22 9 3N L / 2209
2202	1.4062	S32202	23 7 N L / 2307 or 22 9 3N L / 2209
2304	1.4361	–	23 7 N L / 2307 or 22 9 3N L / 2209
LDX 2404®	1.4662	S82441	25 9 4 N L / 2594 or 22 9 3 N L / 2209
2205	1.4462	S32205/S31803	22 9 3 N L / 2209 or 25 9 4 N L / 2594
2507	1.4410	S32750	25 9 4 N L / 2594
Zeron 100®	1.4501	S32760	25 9 4 N L / 2594

Martensitische und ausscheidungshärtende Stähle und empfohlene Schweißzusätze

Typ	EN	UNS	Schweißzusatz
410	1.4006	S41000	13 / 410, 13 Nb L / 409Nb, 19 9 / 308, 19 9 Nb / 347 or 23 12 / 309
420	1.4024	S42000	13 / 410, 13 Nb L / 409Nb, 19 9 / 308, 19 9 Nb / 347 or 23 12 / 309
420	1.4021	S42000	13 / 410, 13 Nb L / 409Nb or 19 9 Nb / 347
431	1.4057	S43100	17 / 430, 19 13 2 L / 316L or 18 8 Mn / 307
415	1.4313	S41500	13 4 / 410NiMo, 16 6 Mo or 17 6 / 630
248 SV	1.4418	–	17 6 / 630, 16 6 Mo or 16 5 1
17-4 PH	1.4542	630 / S17400	17 4 Cu / 630 or 19 9 L / 308L
17-4 PH	1.4548	630 / S17480	17 4 Cu / 630 or 19 9 L / 308L

Ferritische Chromstähle

Nachstehende Tabelle beinhaltet die chemische Zusammensetzung sowie die Schweiß-eignung einiger ferritischer Cr-Stähle, deren charakteristisches Merkmal ein niedriger Kohlenstoffgehalt ist. Damit sind diese Stähle vom Beginn der Erstarrung bis zur Raumtemperatur vorwiegend ferritisch, unterliegen also im Wesentlichen keiner Umwandlung und sind aus diesem Grund auch nicht härtbar. Zur Verbesserung der chemischen Eigenschaften werden teilweise Mo, Ti oder Nb zulegiert.

Werkstoff	% C	% Cr	% Mo	Schweiß-eignung
X6Cr13	<0,08	13,0	–	bedingt
X6Cr17	<0,08	17,0	–	bedingt
X6CrMo17-1	<0,08	17,0	1,1	bedingt

Voraussetzung für ausreichende technologische Werte, speziell die Dehnung betreffend, ist ein feinkörniges Gefüge. Es wird dann erzielt, wenn die letzten Umformungsstufen unterhalb 800 °C durchgeführt werden und anschließend eine Wärmebehandlung bis 800 °C mit anschließend schneller Abkühlung an Luft oder in Wasser erfolgt. Diese Werkstoffgruppe ist sehr überhitzungsempfindlich, d. h. sie neigt bei Temperaturbeaufschlagung über 1000 °C zur Kornvergrößerung, die in Verbindung mit Karbidausscheidungen erhebliche Versprödung hervorrufen kann. Ferritische Cr-Stähle werden daher auch nicht im Druckbehälterbau eingesetzt.

Weiters neigen die ferritischen Cr- bzw. Cr-Mo-Stähle mit zunehmenden Cr-Gehalten im Temperaturbereich von 400–525 °C zu einer zeitabhängigen Aushärteerscheinung, nämlich der sogenannten 475 °C-Versprödung. Es handelt sich dabei um die Entmischung des Ferrits in eine chromreiche und eine eisenreiche Phase.

Schweißen von ferritischen Cr-Stählen

Vor allem bei den höher Cr-haltigen Stählen entsteht durch die beim Schweißen bedingte Wärmezufuhr im hochohitzten Teil der Übergangszone ein Kornwachstum, welches sich durch eine nachträgliche Wärmebehandlung nicht beseitigen lässt. Zusätzlich werden an den Korngrenzen Karbide ausgeschieden, die eine weitere Verminderung der Zähigkeit verursachen. Aus den vorgenannten Gründen sind die ferritischen Cr-Stähle als nur „bedingt schweißgeeignet“ einzustufen. Ähnlich ungünstige Bedingungen sind im Schweißgut bei Verwendung artgleicher Schweißzusätze zu erwarten.

Der Zähigkeitsverlust stellt eine absolute Schwächung der Schweißverbindung dar. Deshalb wird für die Schweißung ferritischer Cr-Stähle der Einsatz austenitischer Schweißzusätze empfohlen. Durch die weitaus besseren Zähigkeitseigenschaften ist das austenitische Schweißgut in der Lage, gewissermaßen als Dehnglied zu fungieren. Auch aus korrosionschemischer Sicht weist das austenitische Schweißgut Vorteile auf. Ein Nachteil besteht in der unterschiedlichen Farbausbildung zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut. Bei der Forderung nach Farbgleichheit sind artgleich legierte Schweißzusätze zu verwenden. Sind im praktischen Einsatz stark schwefelhaltige oder aufkohlende Gase vorhanden, so kann das austenitische Schweißgut (z. B. durch Nickelsulfid-Bildung) bevorzugt angegriffen werden. In diesem Fall geht man so vor, dass man die Verbindung austenitisch füllt und nur die letzten Lagen mediumseitig mit ferritischem Schweißzusatz schweißt.

Die Schweißung erfolgt unter Vorwärmung auf 200 bis 300 °C, um die thermischen Spannungen möglichst gering zu halten. Weiters ist auf geringe Wärmezufuhr zu achten, um die Grobkornbildung zu minimieren. Nach dem Schweißen ist eine Glühung im Bereich von 700 bis 750 °C vorteilhaft. Dabei koagulieren die ausgeschiedenen Karbide und gleichzeitig wird ein Spannungsabbau erreicht. Beide Faktoren führen in gewissen Grenzen zu einer Verbesserung der Zähigkeit. Das Grobkorn in der wärmebeeinflussten Zone lässt sich allerdings nicht mehr beseitigen. Beim Einsatz austenitischer Schweißzusätze muss deren Neigung zur Ausscheidung intermetallischer Phasen (Versprödung) im Temperaturbereich von 600 bis 900 °C berücksichtigt werden.

Schweißtechnologie

für ferritische Cr-Stähle mit Kohlenstoffgehalten unter 0,12 %

- Umhüllte Stabelektroden unter UP-Pulver sind nach Angaben des Herstellers rückzutrocknen.
- Artgleiche Schweißzusätze nur dann einsetzen, wenn Forderung nach Farbgleichheit besteht, bzw. das Bauteil mit schwefelhaltigen oder aufkohlenden Gasen beaufschlagt wird.
- Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur von 200–300 °C ist anzuraten.
- Streckenenergie beim Schweißen ist möglichst niedrig zu halten.
- Nach dem Schweißen ist eine Anlassglühung bei 700–750 °C empfehlenswert. Achtung bei Verwendung austenitischer Schweißzusätze wegen Versprödungsgefahr.

Weichmartensitische Chrom-Nickel-Stähle

Stähle mit weichmartensitischer Gefügestruktur finden in vielfältiger Weise Anwendung, wobei der Stahltyp mit 12 % Chrom und 4 % Nickel als wichtigster Vertreter dieser Stahlgruppe bezeichnet werden kann. Informationen über die chemische Zusammensetzung und Schweißbeignung sind nachstehender Tabelle enthalten.

Werkstoff	% C	% Cr	% Mo	% Ni	Schweißbeignung
X5CrNi13-1	<0,05	13,0	0–0,4	1–2,0	gut
X5CrNi13-4	<0,05	13,0	4,0	4,0	gut
X5CrNi13-6	<0,05	13,0	4,0	6,0	gut
X5CrNi16-6	<0,05	16,0	–	6,0	gut/bedingt
X5CrNiMo16-5-1	<0,05	16,0	1,5	5,0	gut/bedingt
X5CrNi17-4	<0,05	17,0	–	4,0	gut/bedingt

Die mechanischen Güteigenschaften derartiger Werkstoffe liegen in Abhängigkeit ihrer chemischen Zusammensetzung und vor allem der Art der Wärmebehandlung in sehr weiten Grenzen, wodurch in weiterer Folge nur der Typ X5CrNi13-4 im Vordergrund der Betrachtungen steht.

Grundgedanken der Entwicklung waren vor allem die Absenkung des Kohlenstoffgehaltes zur Erhöhung der Zähigkeit der martensitischen Struktur und zur Verminderung der Kaltrissneigung sowie zur Erzielung eines möglichst deltaferritfreien Gefüges durch Legieren mit 4 bis 6 % Nickel. Das Gefüge bei „Raumtemperatur“ besteht also aus „weichem“ Martensit mit geringen Mengen von unterkühltem Deltaferrit und Austenit. Durch Anlassen wird die Zähigkeit weiter erhöht und die Härte bzw. Festigkeit abgesenkt. Der niedrige Kohlenstoffgehalt sowie die Zulegierung von ca. 0,5 % Molybdän verbessern gleichzeitig die Korrosionsbeständigkeit. Ein großer Vorteil der weichmartensitischen Chrom-Nickel-Stähle liegt – verglichen mit den reinen Chrom-Stählen – in ihrer guten Schweißbeignung.

Die Schweißbeignung der weichmartensitischen Stähle ist im Wesentlichen durch drei Eigenschaften gekennzeichnet

1. Bildung von niedriggekohlten, zähen Martensit in der WEZ und im Schweißgut, wodurch die Kaltrissneigung stark vermindert wird.
2. Niedrige Gehalte an Delta-Ferrit. Damit ist die Neigung zur Grobkornbildung beim Schweißen weitgehend ausgeschaltet.
3. Wasserstoffempfindlichkeit des martensitischen Gefüges. Bei Gehalten an diffusilem Wasserstoff von HDM >5 ml/100 g können wasserstoffinduzierte Kaltrisse entstehen.

Schweißen von weichmartensitischen Cr-Ni-Stählen

Eine wesentliche Einflussgröße auf die mechanischen Güteigenschaften dieser Werkstoffe stellt die Art der Wärmebehandlung dar. Weichmartensit auf Nickelgehalten über 3,5 % weisen eine metallkundliche Besonderheit auf, nämlich die Bildung von feindispersen Austenit bei Anlasstemperaturen über 580 °C. Dieser Effekt führt zu einem Anstieg der Werte der Kerbschlagarbeit im 13/4-Schweißgut, wobei höchste Werte beim Anlassen zwischen 600 und 620 °C erzielt werden. Bei höheren Anlasstemperaturen fällt die Kerbschlagarbeit infolge Umwandlung des Anlassaustenits in Martensit beim Abkühlen wieder ab.

Für die Vermeidung von Kaltrissen in Schweißverbindungen ist die Wahl der Zwischenlagentemperatur von besonderer Bedeutung. Die praktischen Erfahrungen im Zusammenhang mit den weichmartensitischen Werkstoffen zeigen, dass beim Abkühlen nach dem Schweißen das schlagartige „Umklappen“ großer Schweißnahtbereiche in Martensit vermieden werden sollte. Andernfalls ist mit extremen Umwandlungs- und Eigenspannungszuständen im Schweißgut zu rechnen, die in weiterer Folge Kaltrisse auslösen können. Zwischenlagentemperaturen, die im Bereich der Ms-Temperatur liegen, sind daher als kritisch zu bezeichnen.

Es wird empfohlen, die Zwischenlagentemperatur beim Schweißgut X5CrNi13-1 im Bereich 120 bis 220 °C und bei den Schweißgütern X5CrNi13-4 und X5CrNi13-6 zwischen 100 und 160 °C zu halten. Damit ist je Schweißraupe eine etwa 50%ige Martensitumwandlung gegeben, die sowohl aus metallurgischer als auch spannungstechnischer Sicht anzustreben ist. Die exakte Einhaltung der genannten Zwischenlagentemperatur ist vor allem dann erforderlich, wenn keine nachträgliche Wärmebehandlung vorgenommen werden kann.

Schweißtechnologie

Entsprechend der Eigenschaften der Schweißung weichmartensitischer Stähle empfiehlt sich die Einhaltung der nachstehend angeführten Schweißtechnologie. Die Hinweise gelten für den wichtigsten weichmartensitischen Stahl mit 13 % Cr und 4 % Ni.

- Zum Verbinden sollen nur artgleich legierte Schweißzusätze verwendet werden.
- Umhüllte Stabelektroden und UP-Pulver sind nach den Angaben des Herstellers rückzutrocknen, um einen Wasserstoffgehalt im Schweißgut von <5 ml/100 g einhalten zu können.
- Dickwandige Bauteile sollten auf 100 °C vorgewärmt und mit einer Zwischenlagentemperatur im Bereich von 100 bis 160 °C geschweißt werden.
- Zur Erhöhung der Zähigkeit ist nach dem Schweißen eine Anlassglühung oder allenfalls eine Vergütung erforderlich.

Ferritbestimmung

Grundlagen

Einbrand

Bei jedem Schweißvorgang wird durch den Lichtbogen eine gewisse Menge/Oberflächenschicht des Grundwerkstoffes aufgeschmolzen und mit dem flüssigen Zusatz vermischt. Dabei bezeichnet man mit Einbrand die Tiefe der aufgeschmolzenen Zone, die man z. B. im Schliffbild messen könnte. Eine solche Meßgröße hat für eine sichere Verbindung in Bezug auf Bindefehler eine gewisse Aussagekraft. Dagegen gibt die Vermischung – quantitativ erfasst als prozentualer Anteil des im Schweißgut mit aufgeschmolzenem Grundwerkstoff – ein gutes Mittel zur Beurteilung der metallurgischen Zusammensetzung und Eigenschaften des Schweißgutes ab. Die Höhe der Vermischung – auch Aufmischung genannt – ist zudem relativ einfach zu bestimmen: Einmal durch die chemische Analyse des Schweißgutes und zum anderen – sogar vorab – mit guter Genauigkeit auf graphischem oder rechnerischem Wege.

Wenn mit artgleichem Zusatz geschweißt wird, hat die Vermischung naturgemäß nur einen marginalen Einfluß auf die chemische Zusammensetzung der Naht. Sie wirkt sich aber sehr stark aus, wenn eine klassische Mischverbindung aus unlegierten und hochlegierten Stahl (Beispielsweise S235 mit X2CrNi 18 10) oder anderen Materialkombinationen geschweißt wird. Die Folgen bei unsachgemäßer Betrachtung können vielseitig sein – unter Umständen ist sogar mit Versprödung, Rissen, Korrosionsproblemen u. ä. zu rechnen. Die Vermischung wird zudem durch die Wahl des Schweißprozesses und der verwendeten Schweißparameter bestimmt.

Abhängigkeit vom Schweißprozess

Die Schweißprozesse (EN ISO 4063) zeichnen sich neben der Art und Verwendung des Schweißzusatzwerkstoffes hauptsächlich durch die unterschiedliche Energiedichte aus. Diese hat maßgeblichen Einfluß auf den Vermischungsgrad zwischen Grundmaterial und Schweißzusatz.

Wirkung der Schweißparameter

Für einen jeweiligen Schweißprozess wird die Aufmischung hauptsächlich durch die eingebrachte Energie bestimmt. Grundsätzlich kann bei steigender Energieeinbringung mit erhöhter Aufmischung und damit geänderter Chemie (in Bezug auf die Schweißzusatzzusammensetzung) gerechnet werden.

Einfluß der Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur

Durch eine Änderung der Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur ergibt sich auch eine geänderte Aufschmelzung mit dem Grundwerkstoff – so steigt die Vermischung bei gleichem Energieeintrag (Schweißstrom, Schweißspannung, Schweißgeschwindigkeit) durch eine Erhöhung der Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur (vorausgesetzt, dass durch die eingebrachte Schweißraupe auch Grundwerkstoff aufgeschmolzen wird).

Ferritbestimmung

Die austenitischen, chemisch beständigen Cr-Ni-Stähle weisen im Allgemeinen eine sehr gute Schweißbarkeit auf. Es sind jedoch die besonderen physikalischen Eigenschaften dieser Stähle – geringe Wärmeleitfähigkeit und hoher Wärmeausdehnungskoeffizient – beim Schweißen hinsichtlich der Wärmeleitung zu beachten. Besondere Bedeutung kommt bei diesen Werkstoffen der Art der Primärerstarrung zu, die in weiterer Folge das Heißrisverhalten wesentlich beeinflusst. Auch die Abkühlung von 1200 °C auf 800 °C (t12/8-Zeit) steuert wesentlich die Umwandlung des Primärgefüges – hier sei auf die Einflüsse von Energiedichte, Schweißparameter, Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur, Bauteildicke etc. referenziert.

Für den Praktiker ist das Vorhandensein gewisser Ferritanteile im Schweißgut ein indirekter Hinweis auf ausreichende Heißrisbeständigkeit. Allgemein ist Ferrit im Schweißgut günstig bei Schweißnähten ohne freie Dehnungsmöglichkeit, bei großen Nahtquerschnitten und wenn Risse bisher die Einsatzbarkeit beeinträchtigen. Ferrit steigert die Schweißgutfestigkeit, hat aber einen gegenteiligen Effekt auf die Korrosionsbeständigkeit in bestimmten Medien. Er ist weiters ungünstig bei Tieftemperaturanwendungen und im Hochtemperaturbereich, wo eine Umwandlung in die spröde Sigma-Phase möglich ist.

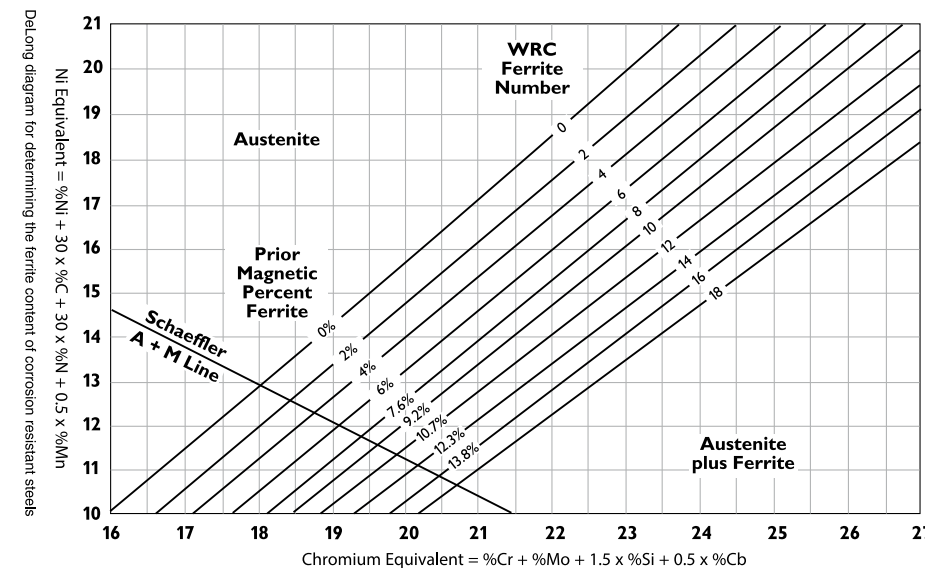
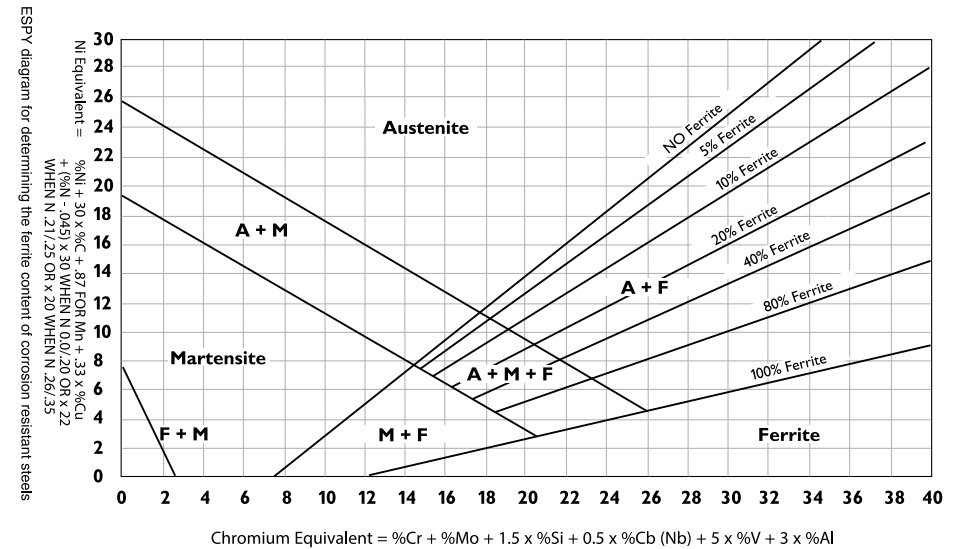
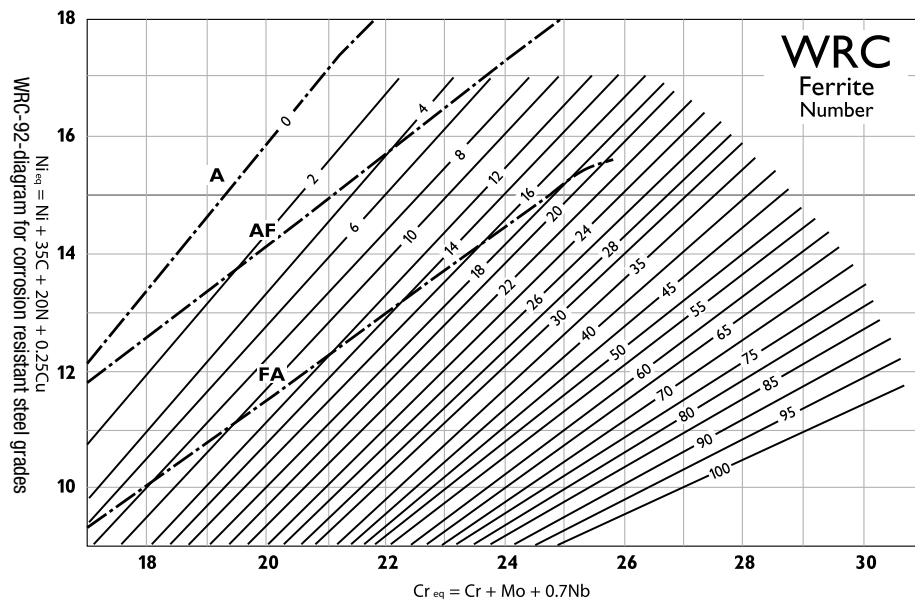
Der Ferritgehalt kann neben der metallurgischen Abschätzung auch magnetisch und rechnerisch bestimmt werden. Die verwendete Skalierung ist nicht absolut, so dass bei Messungen von verschiedenen Labors Unterschiede in den Ergebnissen zu erwarten sind (z. B. Streuungen zwischen 3,5 und 8,0 % bei einer Probe mit etwa 5 % Delta-Ferrit). Die Messwerte werden üblicherweise in FN (Ferrit-Nummern) ausgewiesen. Bis ca 10 FN kann die Ferritnummer mit den Ferrit-Prozent gleichgesetzt werden. Nach Meinung des Welding Research Council (WRC) ist es im Augenblick noch nicht möglich, den absoluten Ferritgehalt in austenitisch-ferritischen Schweißgütern zu bestimmen. Auch an Proben mit reinem Schweißgut sind Streuungen zu erwarten, die aus Variationen der Schweiß- und Messbedingungen resultieren. Die übliche Standardisierung geht von einer 2-Sigma-Streuung aus, was bei 8 FN eine Variation von $\pm 2,2$ FN bedeutet.

Größere Streuungen sind zu erwarten, wenn das Schweißverfahren eine starke Änderung der chemischen Zusammensetzung z. B. der Stickstoffaufnahme aus der Umgebungsluft zuläßt. Eine hohe Stickstoffaufnahme kann dazu führen, dass ein Schweißgut mit 8 FN im Ferritgehalt auf 0 FN fällt. Eine Stickstoffaufnahme von 0,10 % senkt typischerweise den Ferritgehalt um ca. 8 FN. Die Aufmischung mit dem Grundwerkstoff führt bei Schweißgütern zu weiteren Ferritabsenkungen, da artgleiche Grundwerkstoffe üblicherweise geringere Ferritgehalte als das reine Schweißgut aufweisen.

Neben der Messung kann der Ferritgehalt auch aus der chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißguts errechnet werden. Dazu können verschiedene Gefügediagramme herangezogen werden. Diese sind das WRC-92-Diagramm, das Schaeffler-Diagramm, das DeLong-Diagramm und das Espy-Diagramm. Die Ergebnisse zwischen den einzelnen Diagrammen können sehr stark streuen, da sie auf Basis von Reihenuntersuchungen

für verschiedene Werkstoffgruppen erstellt wurden. Das WRC-92-Diagramm gibt eine Vorhersage des Ferritgehaltes in FN. Es ist das neueste der angeführten Diagramme und zeigt eine bessere Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den errechneten Ferritgehalten als bei Verwendung des DeLong-Diagramms. Es ist anzumerken, dass das WRC-92-Diagramm den Silizium- und Mangangehalt nicht berücksichtigt, womit die Eignung bei hochsilizierten und hochmanganhaltigen (über 8 %) Schweißgütern eingeschränkt ist. Weiters sollte es bei Stickstoffgehalten über 0,2 % ebenfalls nur eingeschränkt verwendet werden. Das Schaeffler-Diagramm ist das älteste der angeführten Diagramme und fand bisher eine breite Anwendung bei der Ermittlung des Ferritgehaltes. Es hat einen weiten Gültigkeitsbereich, berücksichtigt aber nicht die starke austenitisierende Wirkung von Stickstoff. Diese Schwächen versucht das Espy-Diagramm auszugleichen. Es errechnet wie das Schaeffler-Diagramm den Ferritgehalt in Prozent, berücksichtigt aber auch Mangangehalte bis 15 % und Stickstoffgehalte bis etwa 0,35 %. Das DeLong-Diagramm ist eine Modifikation des Schaeffler-Diagramms, das den Ferritgehalt in Ferritnummern bis etwa 18 FN ausweist. Das Diagramm berücksichtigt den Stickstoffgehalt zur Berechnung und zeigt eine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung als das Schaeffler-Diagramm. In seiner Gültigkeit deckt es sich in etwa mit dem WRC-92-Diagramm.

Ist zur Ermittlung der Nickel-Äquivalente der Stickstoffgehalt nicht bekannt, dann kann für die WIG- Schweißung und die Elektrodenhandschweißung ein Gehalt von 0,06 %, bei der Schutzgasschweißung mit Massivdrahtelektroden ein Gehalt von 0,08 % angenommen werden. Die Ferritnummer kann mit dem WRC-92-Diagramm – eine korrekte chemische Zusammensetzung vorausgesetzt – in einem Bereich von ± 3 FN bei etwa 90 % der Messungen vorausgesagt werden.



Wirkung von Delta-Ferrit

Die folgende Übersicht gibt eine Zusammenfassung der Vor- und Nachteile von Delta-Ferrit im austenitischen Schweißgut. Grundsätzlich treffen die Aussagen auch auf den Stahlwerkstoff zu.

In Abhängigkeit von den praktischen Einsatzbedingungen ist der Delta-Ferrit teilweise sogar unerwünscht, in den meisten Fällen vorteilhaft und in manchen Fällen auch erforderlich. Die Gründe für die auf den ersten Blick widersprüchlichen Forderungen sind in der Übersicht angeführt. Ebenso werden die Folgen von Abweichungen aufgezeigt.

Begründungen		Folgen einer Über- oder Unterschreitung	
Delta-Ferrit-Anteil ist unerwünscht			
Forderung nach unmagnetischem Schweißgut	FN = 0	Magnetisierbarkeit	
besondere Korrosionsbeanspruchungen	FN < 0,5	selektive Korrosion	
Einsatz bei sehr tiefen Temperaturen	FN < 0,5	Zähigkeitsverlust	
Einsatz bei hohen Temperaturen	FN < 0,5	Phasenausscheidungen	
Niedriger Delta-Ferrit-Anteil ist von Vorteil			
hohe Heißrissicherheit, auch bei dickwandigen Bauteilen Einsatztemperaturen zwischen -100 und +400 °C keine außergewöhnliche chemische Beanspruchung	FN = 3–15	Gefahr der Heißrissbildung	FN < 3
		Zähigkeitsverlust	FN > 15
		Phasenausscheidungen	FN > 15
		selektive Korrosion	FN > 15
Hoher Delta-Ferrit-Gehalt ist erforderlich			
Beständigkeit gegen Spannungsrisskorrosion	FN = 30–75	verminderte Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit	FN < 30
Erhöhung der Festigkeitseigenschaften	FN = 30–75	verminderte Zähigkeitseigenschaften	FN > 75
		verminderte Festigkeitseigenschaften	FN < 30
Kompensierung der Aufmischung bei Mischverbindungen	FN = 15–25	Gefahr von Heißrissen durch Aufmischung	FN < 15

Hitzebeständige Stähle

Allgemeines

Hitzebeständige Stähle werden bei Temperaturen über 500 °C und je nach Legierungstyp bis 1150 °C verwendet. Neben der Zunderbeständigkeit und ausreichender Warmfestigkeit wird auch eine geringe Volumenänderung bei wiederholtem Erhitzen und Abkühlen gefordert, damit die schützende Oxidschicht nicht aufreißt. Des Weiteren sollten sie eine hinreichende Beständigkeit gegenüber verschiedenen Glüh- und Ofenatmosphären haben.

Legierungselemente wie Cr, Si & Al verursachen durch die Bildung einer dichten und festen Oxydschicht die geforderte Zunderbeständigkeit. Die Cr-Al legierten Stählen sind ferritisch, sehr beständig gegen schwefelhaltigen Gasen aber weniger schweißgeeignet. Stähle legiert mit Cr, Ni & Si zeigen ein austenitisches Gefüge. Diese haben eine gute Beständigkeit in aufkohlenden und N-haltigen Atmosphären.

Schweißen von hitzebeständigen Stählen

Die ferritischen Chromstähle werden in Abhängigkeit von den praktischen Einsatzbedingungen mit artgleich legierten bzw. vorwiegend mit austenitischen Schweißzusätzen verschweißt. Eine Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur im Bereich von 200 bis 300 °C ist bei dickeren Querschnitten zu empfehlen. Anschließend ist durch eine Wärmebehandlung von 700 bis 750 °C eine Verbesserung der durch Grobkornbildung und Karbidausscheidungen verminderten Zähigkeitseigenschaften möglich.

Die Stähle mit ferritisch-austenitischer Gefügestruktur werden üblicherweise mit artgleichen Schweißzusätzen ohne Vorwärmung bzw. Wärmenachbehandlung geschweißt.

Bei den vollaustenitischen Cr-Ni Stählen und Schweißzusätzen ist deren Neigung zur Heißrissbildung zu berücksichtigen. Im Temperaturbereich von 600 °C bis 900 °C ist eine eventuelle Versprödung durch Ausscheidung intermetallischer Phasen zu beachten. Es werden teilweise artgleich legierte Schweißzusätze aber auch Nickelbasis-Schweißzusätze bei Betriebstemperaturen von 600 °C bis 900 °C verwendet.

Untenstehende Tabelle zeigt die wichtigsten hitzebeständigen Stähle und die Gefügestruktur:

Gefügestruktur	Auswahl von typischen Vertretern
Ferritisch	X8CrNiTi18-10, X10CrAlSi7, X10CrAlSi13, X10CrAlSi18, X10CrAlSi25
Ferritisch-austenitisch	X15CrNiSi25-4
Austenitisch	X12CrNi23-13, X8CrNiTi18-10, X15CrNiSi25-21, X12NiCrSi35-16, X10NiCrAlTi32-21

Schweißen von Mischverbindungen

Die Anzahl der möglichen Mischverbindungen zwischen den unterschiedlichsten Stahlsorten ist so vielfältig, dass es praktisch unmöglich ist, jede einzelne Werkstoffkombination zu erfassen. Aus diesem Grund existieren nur wenige entsprechende Normen- bzw. Regelwerke.

Deshalb werden im Folgenden allgemeine Grundregeln, in Form von Hinweisen, Empfehlungen sowie Vorsichtsmaßnahmen für die Auswahl von Schweißzusätzen und die Erstellung geeigneter Schweißtechnologien aufgeführt. Diese Grundregeln sind allerdings nur dann hilfreich, wenn sie mit ausreichendem Sachverstand und metallurgischem Grundwissen in die Praxis umgesetzt werden. Beim Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe ist es in vielen Fällen nicht möglich, für jeden einzelnen Werkstoffpartner die optimalen Schweißzusätze und Schweißbedingungen zu wählen. Es sind somit geeignete Kompromisse zu finden.

Ein wesentliches Kriterium bei der Herstellung von Mischverbindungen ist die Auswahl des Schweißzusatzes. Der Zusatz muss so ausgewählt werden, dass unter Berücksichtigung der Aufmischung mit den unterschiedlichen Grundwerkstoffen kein zu hartes, sprödes und rissanfälliges Schweißgut entsteht.

Im Folgenden werden allgemeine Hinweise und Empfehlungen für die Auswahl von Schweißzusätzen für Mischverbindungen gegeben. Dabei ist zu beachten, dass viele verschiedene Einflussfaktoren für die Auswahl geeigneter Schweißzusätze von Bedeutung sind, die nicht alle in diesem Kapitel berücksichtigt werden können. Deshalb sollte bei der Auswahl von Schweißzusätzen Rücksprache mit dem Hersteller und Konstrukteur gehalten werden.

Unlegiert – Unlegiert (z. B. S235JR mit S355J2)
In der Praxis werden häufig unlegierte Stahlsorten unterschiedlicher Festigkeit miteinander verbunden.

Im Falle derartiger Verbindungen sind im Wesentlichen die mechanischen Gütewerte der Grundwerkstoffe entscheidend. Üblicherweise setzt man Schweißzusätze ein, deren Festigkeitseigenschaften dem weicheren Grundwerkstoffpartner entsprechen. Dazu ist jedoch festzuhalten, dass unlegierte Schweißgüten aufgrund der feinkörnigen Gefügestruktur 0,2-Dehngrenzen von 400 MPa kaum unterschreiten.

In Abhängigkeit zum Schweißverfahren ist die Wahl des Hüllen-, Füllungs- und Pulvertyps unter Berücksichtigung der Wanddicke und Bauteilsteifigkeit vorzunehmen. Bei erhöhter Festigkeit sowie Spannungsbeaufschlagung eines Bauteils ist der Einsatz basischer Schweißzusätze bzw. Hilfsstoffe zu empfehlen, deren metallurgisch reines Schweißgut, verbunden mit niedrigen Wasserstoffgehalten, hohe Rissicherheit gewährleistet.

Unlegiert – Warmfest (z. B. P235GH mit 13CrMo4-5)
Bei diesen Verbindungen wird in der Regel der artähnliche Schweißzusatz des niedriger legierten Werkstoffes verwendet. Ist eine Wärmenachbehandlung erforderlich, so muss die Glühtemperatur auf die beiden Grundwerkstoffe und den Schweißzusatz abgestimmt werden.

Unlegiert – Hochfest (z. B. S235JR mit S460N)
Die Schweißzusätze werden üblicherweise auf den weicheren Grundwerkstoff abgestimmt.

Im Falle stark unterschiedlicher Festigkeitseigenschaften der Werkstoffpartner (z. B. S235JR mit S690Q) sind Schweißzusätze zu verwenden, deren Festigkeitseigenschaften zwischen den Werten der beiden Grundwerkstoffe liegen. Die Schweißtechnologie ist auf den höherfesten Grundwerkstoff abzustimmen.

Unlegiert – Kaltzäh (z. B. S235JR mit 15NiMn6)
Bei Tieftemperaturstählen, die bis zu 3,5 % Ni aufweisen, können sowohl unlegierte als auch zum Ni haltigen Werkstoff artgleich bzw. artähnlich legierte Schweißzusätze verwendet werden.

Bei Ni-Gehalten von 5 bis 9 % sind austenitische oder Nickelbasis-Schweißzusätze zu verwenden.

Unlegiert – Vergütungsstähle (z. B. S235JR mit 42CrMo4)
Vergütungsstähle sind nur bedingt schweißgeeignet. Die Stähle müssen vorgewärmt und einer Wärmenachbehandlung unterzogen werden.

Je nach Werkstoffpaarung kommen unlegierte oder legierte Schweißzusätze in Betracht. Die Aufmischung sollte gering gehalten werden. In Sonderfällen können auch Nickelbasis-Schweißzusätze eingesetzt werden.

In Ausnahmefällen, bei denen eine nachträgliche Wärmebehandlung nicht möglich ist, kann der Einsatz von überlegierten austenitischen Cr-Ni-Schweißzusätzen (z. B. A 7 CN-IG) vorteilhaft sein.

Unlegiert – Chromstähle (z. B. S235JR mit X12Cr13)
Sowohl ferritische als auch martensitische Cr-Stähle erfordern eine spezielle Wärmebehandlung beim Schweißen und eine nachträgliche Glühbehandlung. Dadurch ist der Einsatz von Nickelbasis-Legierungen (abhängig von den Einsatzbedingungen) zu empfehlen.

Ist eine nachträgliche Glühbehandlung nicht möglich und die Einsatztemperatur mit max. 400 °C begrenzt, können auch austenitische überlegierte Schweißzusätze verwendet werden.

Unlegiert – Austenit (z. B. S235JR mit X5CrNi18-10)

Beim Verbinden von Stählen mit stark unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung existiert eine komplexe metallurgische Problematik, die nur durch Kompromisse zu lösen ist. Allgemein sollten überlegierte austenitische Schweißzusätze verwendet werden.

Die Auswahl des Schweißzusatzes ist bei derartiger Mischverbindungen von entscheidender Bedeutung. Unter Berücksichtigung der Aufmischung mit den unterschiedlichen Grundwerkstoffen sollte ein Schweißgut entstehen, das weder ein martensitisches Gefüge noch ein austenitisch-ferritisches Gefüge mit 0 bis 5 % δ -Ferrit aufweist. Somit wird eine rissfreie und zähe Schweißverbindung zwischen dem unlegierten Stahl und dem austenitischen Werkstoff gewährleistet. Die Aufmischung zwischen den Grundwerkstoffen und dem Schweißzusatz ist dabei möglichst gering zu halten. Als Hilfsmittel für die Auswahl von Schweißzusätzen dient das Schäßler-Diagramm.

Wird die Schweißung im abnahmepflichtigen Bereich durchgeführt, muss ein Nickelbasiszusatzwerkstoff verwendet werden, falls eine nachträgliche Wärmebehandlung durchgeführt wird, die Betriebstemperaturen über 300 °C liegt oder die zu verschweißenden Wanddicken größer als 30 mm sind.

Hochfest – Hochfest (z. B. S460N mit S890Q)

Bei Mischverbindungen von hochfesten Feinkornbaustählen sollte man sich bei der Wahl des Schweißzusatzes festigkeitsmäßig am weicheren Stahltyp orientieren.

Im Falle stark unterschiedlicher Festigkeitseigenschaften der Werkstoffpartner (z. B. S460N mit S890Q) ist ein Schweißzusatz, dessen Festigkeit zwischen den Grundwerkstoffen liegt, zu verwenden. Andernfalls entsteht durch den hohen Festigkeitssprung im Schweißnahtbereich eine Schwachstelle im Bauteil. Die Schweißtechnologie ist auf den höherfesten Grundwerkstoff abzustimmen.

Hochfest – Austenit (z. B. S460N mit X5CrNi18-10)

Es sind, wie bei der Verbindung Unlegiert – Austenit, überlegierte austenitische Schweißzusätze einzusetzen.

Wird die Schweißung im abnahmepflichtigen Bereich durchgeführt, muss ein Nickelbasiszusatzwerkstoff verwendet werden, falls eine nachträgliche Wärmebehandlung durchgeführt wird, die Betriebstemperaturen über 300 °C liegen oder die zu verschweißenden Wanddicken größer als 30 mm sind.

Kaltzäh – Kaltzäh (z. B. S275NL mit 15NiMn6)

Schweißzusätze sind unter Berücksichtigung der geforderten Tieftemperaturzähigkeit auszuwählen. Für Mischverbindungen mit Stählen bis zu 3,5 % Ni reicht ein Schweißzusatz aus, der einem der beiden Werkstoffpartner entspricht.

Bei Ni-Gehalten von 5 bis 9 % sind austenitische oder Nickelbasis-Schweißzusätze zu verwenden.

Kaltzäh – Austenit (z. B. 15NiMn6 mit X5CrNi18-10)

Schweißzusätze sind unter Berücksichtigung der geforderten Tieftemperaturzähigkeit auszuwählen. Es sind vorwiegend überlegierte vollaustenitische Schweißzusätze in Betracht zu ziehen.

Warmfest – Warmfest (z. B. 16Mo3 mit 13CrMo4-5)

Bei diesen Verbindungen wird in der Regel der Schweißzusatz des niedriger legierten Werkstoffes verwendet.

Die Wärmenachbehandlung ist auf die beiden Grundwerkstoffe und den Schweißzusatz abzustimmen. Für den Dampfkesselbau gibt die Verbände Vereinbarung 2003/3 (Dampfkessel) verbindliche Regel zur Auswahl der Schweißzusätze und Glühtemperaturen.

Warmfest – Austenit (z. B. 13CrMo4-5 mit X5CrNi18-10)

Bei diesen Verbindungen werden überwiegend Nickelbasis-Schweißzusätze eingesetzt, weil die meisten warmfesten Stähle hoch vorgewärmt und einer Wärmebehandlung unterzogen werden müssen. Da viele austenitische Stähle bei Temperaturen über 400 °C zu einer σ -Phasen-Versprödung neigen, sollten die Schweißflanken des warmfesten Werkstoffes 3-lagig mit Nickelbasis-Schweißzusatz plattiert und anschließend geglüht werden. Erst dann sollte die Verbindung geschweißt werden. Nur in Ausnahmefällen können auch überlegierte austenitische Schweißzusätze eingesetzt werden.

Vergütungsstähle – Vergütungsstähle (z. B. 25CrMo4 mit 42CrMo4)

Vergütungsstähle sind nur bedingt schweißgeeignet. Mit zunehmendem C-Gehalt verschlechtert sich die Schweißbeugung. Sie bedürfen einer speziellen Wärmebehandlung beim Schweißen sowie einer nachträglichen Glühbehandlung. Artgleich legierte Schweißzusätze sind kaum vorhanden. Die Auswahl erfolgt entsprechend den gegebenen Festigkeitseigenschaften unter Berücksichtigung der notwendigen Wärmebehandlung. In vielen Fällen erlauben die praktischen Einsatzbedingungen die Verwendung weicherer Schweißzusätze. Der Einsatz von Nickelbasis-Schweißzusätzen ist ebenfalls möglich.

Nur unter der Voraussetzung, dass keine nachträgliche Wärmebehandlung erfolgt, ist der Einsatz von überlegierten austenitischen Cr-Ni-Schweißzusätzen in Betracht zu ziehen.

Vergütungsstähle – Austenit (z. B. 42CrMo4 mit X5CrNi18-10)

Die bedingte Schweißbeugung sowie die notwendige Wärmenachbehandlung erfordern den Einsatz von Nickelbasis-Schweißzusätzen, wobei die Schweißflanken des Vergütungsstahls 3-lagig plattiert und anschließend geglüht werden sollte.

Nur wenn keine Wärmebehandlung durchgeführt wird, sind auch austenitische überlegierte Schweißzusätze einsetzbar, wobei eine Betriebstemperatur von max. 400 °C nicht überschritten werden darf.

Austenit – Austenit (z. B. X5CrNi18-10 mit X6CrNiMoTi17-12-2)
Der Schweißzusatz ist entsprechend der chemischen Zusammensetzung des höher legierten Werkstoffpartners auszuwählen.

Austenit – Chromstähle (z. B. X5CrNi18-10 mit X12Cr13)
Die Auswahl der Schweißzusätze ist von den Betriebsbedingungen abhängig. Sowohl ferritische als auch martensitische Cr-Stähle besitzen nur bedingte Schweißbeignung. Deshalb sind eine spezielle Wärmeführung beim Schweißen und eine nachträgliche Wärmebehandlung erforderlich.

Die Festlegung von austenitischen Schweißzusätzen hat daher unter Berücksichtigung ihrer Versprödungsneigung zu erfolgen und kann in gewissen Fällen den Einsatz von Nickelbasis-Schweißzusätzen erfordern.

Austenit – Hitzebeständig (z. B. X5CrNi18-10 mit X8CrNi25-21)
Es sind vorwiegend Schweißzusätze zu verwenden, die legierungsmäßig dem hitzebeständigen Werkstoffpartner entsprechen.

Nickelbasis – Nickelbasis (z. B. Alloy C 625 mit Alloy C 22)
Es ist jede Werkstoffpaarung in Bezug auf die Wahl des Schweißzusatzes gesondert in Betracht zu ziehen.

Nickelbasis – Unlegiert / Warmfest / Hochfest / Kaltzäh / Vergütungsstahl (z. B. C 276 mit X12Cr13 / X5CrNi18-10 / X8CrNi25-21)
Für derartige Mischverbindungen stehen eine Reihe unterschiedlich legierter Nickelbasis-Schweißzusätze zur Verfügung. In vielen Fällen wird ein dem Nickelbasis-Grundwerkstoff artgleich oder artähnlich legierter Schweißzusatz verwendet.

Nickelbasis – Chromstahl / Austenit / Hitzebeständig (z. B. C 276 mit X12Cr13 / X4CrNi18-10 / X12CrNi25-21)
Für die Wahl des Schweißzusatzes sind die Einsatzbedingungen zu berücksichtigen. Üblicherweise wird ein der Nickelbasis-Legierung entsprechender oder artähnlich legierter Schweißzusatz verwendet.

Hartmanganstahl – Unlegiert (z. B. X120Mn12 mit S235JRG1)
Es ist der Einsatz von austenitischen Cr-Ni-Schweißzusätzen mit erhöhtem Mn-Gehalt oder überlegierte Typen zu empfehlen.

Hartmanganstahl – Austenit (z. B. X120Mn12 mit X5CrNi18-10)
Als Schweißzusätze sind austenitische Typen mit erhöhtem Mn-Gehalt oder überlegierte Typen zu empfehlen.

Schweißtechnologisch orientierte Aspekte

Hinweise zur Vorwärmung von Werkstoffen

Aufhärtung des Stahles beim Schweißen

Während dem Schweißen wird der zu schweißende Grundwerkstoff hohen Temperaturen ausgesetzt, und teilweise bis über die Ac3-Temperatur erhitzt. Dabei bildet sich eine Zone, in der die ursprüngliche Mikrostruktur durch den Wärmeeinfluss des Schweißvorganges geändert wird. Dieser Bereich wird als Wärme Einfluss Zone (WEZ) bezeichnet. In dieser Zone kommt es zu einem Kornwachstum, d.h. die Austenitkörner wachsen. Die Zähigkeit verringert sich mit zunehmender Korngröße.

Bei Abkühlung kann es, abhängig von der Legierungszusammensetzung, zu einer erheblichen Härtesteigerung, in der Regel durch Martensitbildung, kommen. Das martensitische Gefüge ist das härteste und damit auch am wenigsten verformbare aller metallischen Werkstoffe. Die Härte in der WEZ hängt hauptsächlich von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und der Abkühlgeschwindigkeit ab. Eine schnelle Abkühlung führt zu einem martensitischen Gefüge mit hoher Härte, da die Diffusion der Legierungselemente erschwert wird. Die Bildung des Gleichgewichtsgefüges gemäß dem Eisen-Kohlenstoffdiagramm ist nicht mehr möglich. Eine langsame Abkühlung lässt zunehmend Zeit für eine diffusionsgesteuerte Umwandlung. Hier entsteht ein weicheres Gefüge, die Zwischenstufe Bainit und Ferrit.

Die werkstofflichen Vorgänge beim Abkühlen werden einfach und für die Praxis genügend durch die Abkühlzeit zwischen 800 °C und 500 °C bestimmt. Hier spricht man von der t8/5-Zeit. In diesem Bereich finden bei Stählen die wichtigsten Gefügeumwandlungen statt.

Die chemische Zusammensetzung des Stahles bestimmt das Umwandlungsverhalten und für die jeweilige Abkühlgeschwindigkeit den Anteil der sich bildenden Gefüge. Verschiedene Legierungselemente wie z. B. Kohlenstoff (bestimmt die Martensithärte), Mangan, Chrom und Molybdän erhöhen die Härtebarkeit und verschieben dadurch die kritische Abkühlungszeit hin zu einer langsameren Abkühlung, die t8/5-Zeit steigt.

Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist abhängig von folgenden Größen:

- Der Materialdicke
 - zweidimensionale Wärmeableitung: Ist die während des Schweißens eingebrachte Wärme fließt parallel zur Blechoberfläche ab. (dünnwandige Bauteile)
 - dreidimensionale Wärmeableitung: Ist die während des Schweißens eingebrachte Wärme fließt parallel und senkrecht zur Blechoberfläche ab
- Der Temperatur des Grundwerkstoffes
- Der Wärmeeinbringung

Werden über die Wurzellage die Füll- und Decklagen geschweißt, so werden die darunterliegenden Zonen normalisiert bzw. angelassen und die Härtespitzen neben der Wurzelnaht abgebaut. Sind jedoch bereits vorher, durch die Aufhärtung nach dem Schweißen der Wurzellage Risse in der Übergangzone entstanden, so verbleiben diese auch nach dem Einbringen, der Decklagen in der Schweißverbindung und können unter Umständen zum Bruch des geschweißten Bauteiles führen.

In derart aufgehärteten Zonen kommt es unter Einfluss der Schweißschumpfung zu hohen Spannungen, weil der Werkstoff daran gehindert ist, sie durch plastische Verformung abzubauen.

Darüber hinaus entsteht besonders bei dicken Querschnitten in diesem Gebiet ein mehrachsiger Spannungszustand, der noch dadurch begünstigt wird, dass die Martensitbildung unter Volumensvergrößerung abläuft. Erreichen die Spannungen die Trennfestigkeit, so treten im Übergangsbereich Risse auf.

Zur Vermeidung von Unternatrissen und damit für die Sicherheit einer Schweißkonstruktion ist aus vorgenannten Gründen die genaue Kenntnis der Aufhärtungsvorgänge in der wärmebeeinflussten Zone des Stahles von besonderer Bedeutung. Es erscheint auch sehr wichtig, dass man bei einem gegebenen Stahl mit bekannter chemischer Zusammensetzung vor dem Schweißen Voraussagen über eine mögliche Aufhärtung machen kann.

Eine realistische Abschätzung der maximalen Aufhärtung in der WEZ, die üblicherweise in der WEZ-Grobkornzone (CGHAZ), vorliegt, ermöglicht die beim Schweißen gegebene Abkühlzeit $t_{8/5}$ in Kombination mit einem Schweiß-ZTU-Schaubild. Darüber hinaus gibt es empirische Ansätze, die eine Abschätzung der maximalen Aufhärtung in der WEZ in Abhängigkeit von chemischer Stahl-Zusammensetzung und Abkühlzeit $t_{8/5}$ ermöglichen. Die Modelle nach Düren und Yurioka charakterisieren die maximale WEZ-Aufhärtung der hier behandelten Stahlsorten ausreichend genau und können zu deren Abschätzung herangezogen werden. Abb. 1 zeigt die Formeln des Vorhersagemodells von Düren.

Martensithärte	$HV_M = 802 \times C(\%) + 305$
Bainithärte	$HV_B = 350 \times CE^{(1)} + 101$
Mischhärte	$HV = 2019 \times [\%C \times (1 - 0,5 \times \lg(t_{8/5})) + 0,3 \times (\%CE^{(1)} - \%C)] + 66 \times [1 - 0,5 \times \lg(t_{8/5})]$
C-Äquivalent (CE)	$CE^{(1)} = C + \frac{Si}{11} + \frac{Mn}{8} + \frac{Co}{9} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{17} + \frac{Mo}{6} + \frac{V}{3}$

Abb. 1: Berechnung der Härte der WEZ aus chem. Zusammensetzung eines Stahles und $t_{8/5}$ -Zeit nach Düren

Diese Abschätzung der maximalen Aufhärtung in der WEZ mit dem Vorhersagemodell nach Düren ist mit unserer menügeführten „wvc-software“ einfach möglich.

Wie schon zuvor erwähnt kann es durch die Aufhärtung zu Rissen kommen welche begünstigt wird durch den Einfluss von diffusiblen Wasserstoff. Die Risse, die hier entstehen können, werden auch als Kaltrisse bezeichnet. Diese sind wasserstoffinduzierte Risse in Schweißverbindungen an umwandlungsfähigen Stahlwerkstoffen (unlegiertem Stahl, Feinkornbaustahl und niedriglegierten Stahl), die üblicherweise in erkalteten, auf Raumtemperatur gekühlten Schweißnähten, meist auch zeitverzögert, auftreten und sowohl die WEZ wie auch das Schweißgut (SG) betreffen. Das Kaltrissverhalten von Schweißverbindungen wird durch das Zusammenwirken von Spannungen, aufgehärtetem Gefüge und ggf. diffusiblem Wasserstoff bestimmt.

Die wirksamste Maßnahme zur Vermeidung von Kaltrissen ist das Vorwärmen. Die Vorwärmtemperatur ist jene Temperatur, auf die das Werkstück vor dem Schweißen der ersten Raupe im Bereich der Schweißstelle gebracht werden muss. Sie wird als untere Grenze angegeben und darf während der gesamten Schweißung nicht unterschritten werden. Somit kann die Vorwärmtemperatur auch als unterste Zwischenlagentemperatur angesehen werden.

Durch das Vorwärmen wird das Wärmegefälle vermindert und langsames Abkühlen gewährleistet. Das bedeutet, dass die kritische Abkühlgeschwindigkeit, die zu nachteiligen Gefügeänderungen führen kann, nicht erreicht wird (geringe oder keine Aufhärtung – keine Rissgefahr). Weiters wird durch das kleinere Wärmegefälle das Schrumpfen verringert und damit treten weniger Verwerfungen auf. Die Schweißspannungen werden verringert und dem Wasserstoff steht bei höheren Temperaturen mehr Zeit für ein Ausdiffundieren zu Verfügung (geringere Wasserstoffgehalte).

Ein Stahl ist zum Schweißen immer dann vorzuwärmen, wenn mit kritischen Gefügeänderungen gerechnet werden muss. Dies gilt ebenso für das Heften. Die Notwendigkeit einer Vorwärmung ergibt sich aus der beschriebenen Aufhärtungsneigung bestimmter Stähle in der Wärmeeinflusszone. Nach einer etwaigen Unterbrechung des Schweißvorganges muss die Vorwärmtemperatur wieder erreicht sein, ehe man mit dem Schweißen erneut beginnt. Als Regel sollte aber gelten, dass vor allem kritische Nähte in einem Durchgang – also ohne Unterbrechung – zu schweißen sind.

Hinsichtlich „diffusiblem Wasserstoff“ sind folgende Empfehlungen zu beachten:

- Bei Außentemperaturen unter +5 °C oder feuchten Schweißkanten sollte aus Gründen der Kaltrissicherheit eine Trocknung der Schweißkanten auf 80–100 °C vorgenommen werden.
- Für Stahlsorten mit einer Streckgrenze von ≥ 500 MPa sind Schweißverfahren zu bevorzugen, mit denen niedrige Wasserstoffgehalte im Schweißgut von HDM ≤ 5 ml/100 g Schweißgut* erreicht werden.

* ...HDM = Hydrogen-Deposit-Metal (Wasserstoffgehalt diffusibel im niedergeschmolzenen Schweißgut) ermittelt nach EN ISO 3690

Höhe der Vorwärmtemperatur

Die optimale Vorwärmtemperatur hängt von zahlreichen Faktoren ab. Das sind zum Beispiel: die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes, das Schweißverfahren und die dadurch eingebrachte Wärme, die Werkstückdicke, die Lage des Schweißstoßes am Bauteil, die Möglichkeit des Wärmeabflusses, die Art der Konstruktion, die Außentemperatur, usw. Deshalb ist es kaum möglich, allgemein gültige Werte anzugeben. Dabei versteht man unter „optimaler Vorwärmtemperatur“ diejenige Temperatur, die gerade hoch genug ist, dass die kritische Abkühlgeschwindigkeit nicht erreicht wird. Eine zu geringe Temperatur vergrößert die Rissgefahr, zu hohe Temperaturen sind unwirtschaftlich, bzw. können sich bei gewissen Stahlsorten (z. B. hochfeste TM-Stähle) negativ auswirken.

Errechnet werden kann die Vorwärmtemperatur über verschiedene Methoden. Die EN 1011-2:2001 bzw. der gleichlautende technische Bericht ISO/TR 17671-2:2002 empfehlen im Anhang C die Anwendung des CE(CEV)- oder CET-Verfahrens. Im technischen Bericht CEN ISO/TR 17844:2004-09, der einen Vergleich von genormten Verfahren zur Vermeidung von Kaltrissen enthält, sind zusätzlich dazu mit der CEN- Methode (in der JIS B 8285 genormter japanischer Ansatz) und der P_{cm} -Methode (in der ANSI/AWS D1.1, dem „Structural Welding Code – Steel“, genormter amerikanischer Ansatz) zwei weitere praktikable Kalkulationsmodelle zur Vorwärmtemperaturermittlung vorgeschlagen.

Alle genannten Modelle basieren auf den Einflussgrößen

- Stahlzusammensetzung (erfasst in den Kohlenstoffäquivalenten CE(CEV), CET, CEN und P_{cm})
- Werkstoffdicke
- Wasserstoffgehalt im Schweißgut und Wärmeeintrag

Für Kohlenstoff-Mangan-Stähle wird unsererseits neben der CE(CEV)- bevorzugt die CET- Methode verwendet. Für niedriglegierte hochfeste Stähle dagegen ausschließlich die CET- und P_{cm} -Methode, da beide für diese Stahlsorten konzipiert sind. Für Blechdicken $d \leq 10$ mm kommt nur die P_{cm} -Methode zum Einsatz, da die CET-Methode in diesem Bereich nicht mehr gültig ist und unrealistisch hohe Werte für die Vorwärmtemperatur ergibt.

Bei allen genannten Methoden handelt es sich um empirische, auf umfangreichen Ergebnissen aus Härte- und Rissprüfungen basierende Ansätze. Während das CET-Modell die Berechnung der Vorwärmtemperatur für Stumpfnähte hauptsächlich auf Ergebnissen von Schweißnahtsprüfungen an Y-Nähten (Tekken-Prüfungen) und für Kehlnähte auf CTS-Prüfungen aufbaut, basiert das P_{cm} -Modell weitgehend auf Prüfungsergebnissen an schrumpfbehinderten Stumpfnahtschweißungen mit teilweisem Einbrand.

Im Gegensatz zur diagrammbasierten CE(CEV)-Methode ist die Programmierbarkeit der Formeln der CET- und P_{cm} -Methode einfacher in der Handhabung (Abb. 2).

$TP = 697 \times CET + 160 \times \tanh(d/35) + 62 \times HD^{0,35} + (53 \times CET - 32) \times Q - 328 \quad (^\circ C)$ <p>Diese Beziehung gilt für Stähle mit einer Streckgrenze bis zu 1000 N/mm² und</p> <p>CET = 0,2% bis 0,5%</p> <p>d = 10 mm bis 90 mm</p> <p>HD = 1 ml/100 g bis 20 ml/100 g</p> <p>Q = 0,5 kJ/mm bis 4,0 kJ/mm</p>
<p>Abb. 2: Formeln zur Berechnung der Vorwärmtemperatur mittels CET-Methode</p>

Die Berechnung der Vorwärmtemperatur hat sowohl für den Grundwerkstoff als auch das Schweißgut zu erfolgen. Der höhere der beiden kalkulierten Werte ist zu verwenden.

Durchführung der Vorwärmung

Hat man die richtige Vorwärmtemperatur ermittelt, muss der jeweilige Schweißbereich entsprechend erwärmt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Wärme in den kalten Werkstoff abwandert. Das Wärmeangebot muss so groß sein, dass die vorgegebene Temperatur über den gesamten Querschnitt, also an Vorder- und Rückseite erreicht wird.

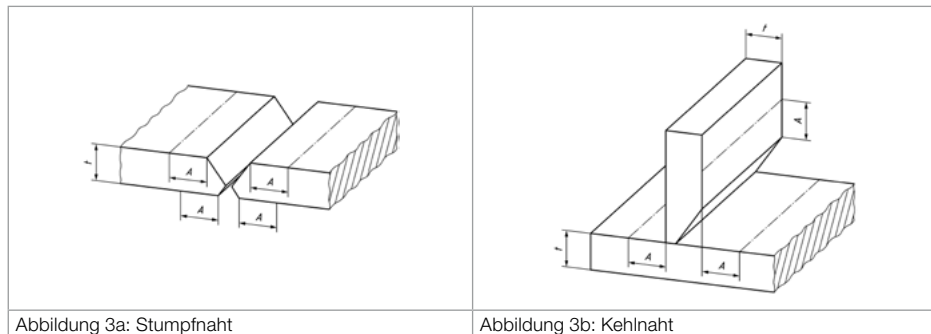
Bei relativ kurzen Nähten wird meist mit dem Schweißbrenner vorgewärmt. Weiters kommen Sonderbrenner mit Luftansaugung oder Brenngas-Druckluft-Brenner zum Einsatz. Neben der Vorwärmung im Ofen oder der Vorwärmung mit Heizmatten gibt es noch die Möglichkeit einer induktiven Vorwärmung.

Überprüfung der Vorwärmtemperatur

Das Überprüfen der vorgegebenen Vorwärmtemperatur ist wichtig, weil sich in der Praxis immer wieder zeigt, dass sich der Schweißer mehr auf sein Gefühl verlässt. Für eine Vielzahl der Fälle reicht das Messen mit Farbstiften (Temperaturmeßfarben) aus. Bei kritischen Schweißungen ist aber eine genaue Temperaturmessung, meist mit Aufzeichnung des Temperaturverlaufes, notwendig. Neben den Farbstiften gibt es Haftthermometer und Anlegethermometer sowie Geräte, mit denen man die Vorwärmtemperatur berührungslos messen und ihren Verlauf aufzeichnen kann.

Die Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur sollte gemäß der EN ISO 13916 gemessen werden. Die folgenden Abbildungen 3 und 4 geben einen Hinweis, wo die Messung der Vorwärmtemperatur abhängig von der Werkstückdicke passieren sollte.

Abstand der Messpunkte für die Vorwärmtemperatur



$t \leq 50 \text{ mm}$: $A = 4 \times t$, max. 50 mm

$t > 50 \text{ mm}$: $A = \text{min. } 75 \text{ mm}$

Die Messpunkte, welche in Abbildung 3 dargestellt sind, sollten aber nicht für die Messung der Zwischenlagentemperatur verwendet werden, da es hier zu Messungenauigkeiten kommen kann, welche die mechanisch technologischen Gütwerte des Schweißgutes negativ beeinflussen. Abbildung 4 stellt den vorzuziehenden Messpunkt der Zwischenlagentemperatur dar. Da es immer wieder zu Diskussionen kommt, wann diese Temperatur gemessen werden soll, ist hier die EN ISO 13916 eindeutig in der Formulierung. Die Zwischenlagentemperatur, wie auch die Vorwärmtemperatur, ist jene Temperatur die unmittelbar vor dem Schweißen gemessen werden sollte.

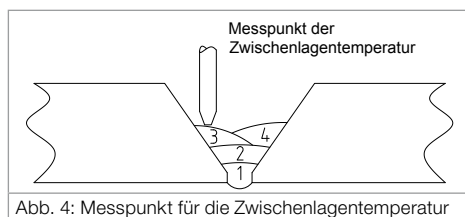


Abb. 4: Messpunkt für die Zwischenlagentemperatur

Hinweise für Heftschweißungen

Grundsätzlich unterliegt eine Heftschweißung den gleichen Qualitätsregeln wie die Schweißung selbst. Dies gilt sowohl für die Wärmeführung (Vorwärmung) wie auch für die Auswahl des Schweißzusatzes. In vielen Fällen ist es ratsam wegen der schnellen Wärmeableitung vorzuwärmen, auch wenn der Grundwerkstoff selbst sonst nicht unbedingt eine Vorwärmung erfordert. Je nach Anwendung kann es Sinn machen nicht artgleiche Schweißzusätze etwa mit niedriger Festigkeit und höherer Zähigkeit zu verwenden, da diese eine größere Verformungsfähigkeit aufweisen. Diese Heftstellen sind dann in der Regel später auszuschleifen und können nur unter Berücksichtigung auch der konstruktiven Verhältnisse belassen werden. Heftstellen sollten in Abhängigkeit von der Dicke des Grundwerkstoffes immer eine ausreichende Länge und Dicke aufweisen, um die aus der Montage resultierenden Eigenspannungen aufnehmen zu können.

Die Mindestlänge der Heftnaht sollte 50 mm betragen, bei Werkstückdicken unter 12 mm muss die Mindestlänge jedoch die vierfache Dicke des dickeren Teils aufweisen. Bei Werkstückdicken über 50 mm oder bei Streckgrenzen über 500 N/mm² sollte eine Vergrößerung der Länge und Dicke von Heftnähten in Betracht gezogen werden, dies kann auch eine Zweilagenschweißung beinhalten.

Die Heftschweißungen müssen frei von Rissen sein und sollten vor der endgültigen Schweißung gründlich gesäubert werden. Heftschweißungen, die Risse aufweisen, müssen ausgearbeitet werden. Kraterrisse können jedoch auch durch Schleifen entfernt werden. Alle Heftschweißungen, die nicht in die endgültige Schweißung einbezogen werden, sollten beseitigt werden. Allfällig erforderliche Hilfsmittel, die für den Auf- oder Zusammenbau von Teilen mit Kehlnähten vorübergehend befestigt werden, sollten so gestaltet sein, dass sie sich wieder leicht entfernen lassen. Erfolgt die Entfernung der Hilfsmittel durch Schneiden oder Meißeln, ist die Oberfläche des Bauteils wieder sorgfältig glatt zu schleifen. Mit einer Oberflächenrissprüfung kann der Nachweis geführt werden, dass der Werkstoff an Stellen der zeitweiligen Schweißung nicht gerissen ist.

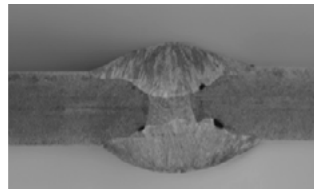
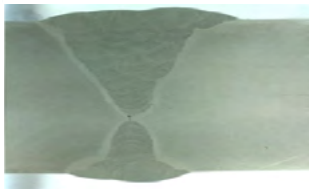
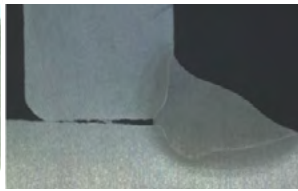

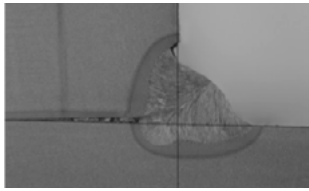
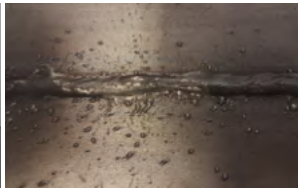
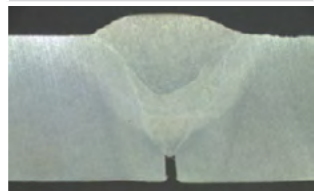
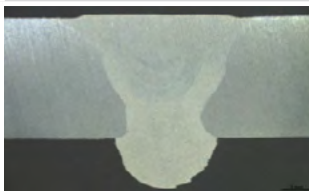

Hinweise zur Vermeidung von Schweißfehlern

Das Schweißen erfordert je nach Grundwerkstoff und Einsatzgebiet höchste Sorgfalt, um potentiellen Fehlern entgegenzuwirken. Die Lebensdauer von Schweißkonstruktionen hängt wesentlich von der Qualität, der Minimierung der Kerbwirkung und von Unregelmäßigkeiten ab.

Fehler in Schweißverbindungen sind eine unangenehme Erscheinung, da sie zum Teil sehr kostenintensive Nacharbeiten verursachen. In vielen Fällen lassen sich Fehler und Schäden durch einfache Maßnahmen vermeiden. Solche Maßnahmen sind in verschiedenen Stufen der Planung und Fertigung umsetzbar. Das kann von der optimalen Schweißzusatzwahl bis hin zur Beherrschung des Schweißverfahrens und einer regelmäßigen Wartung der Stromquelle reichen.

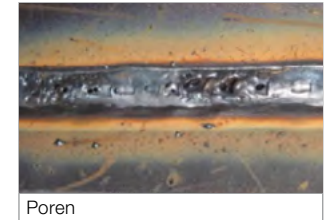
Es liegt in der Natur der Sache, dass Schweißnähte immer wieder Ungängen aufweisen. Ob sich eine Ungänge kritisch auf die Bauteillebensdauer auswirkt ist vom jeweiligen Einsatz des Bauteils abhängig. Während der Auslegung der Schweißkonstruktion muss geklärt werden welche Schweißnahtfehler sich ungünstig auf die Lebensdauer auswirken. Danach kann eine Zulässigkeitsgrenze nach EN ISO 5817 definiert werden.

Dieses Unterkapitel gibt keinen vollständigen Überblick über die möglichen Schweißfehler, sondern beschränkt sich auf Fehlertypen, die durch verhältnismäßig einfache Maßnahmen zu vermeiden sind. Neben der Beschreibung der Fehler und den Ursachen enthalten die folgenden Tabellen mögliche Gegenmaßnahmen, die eine günstige Wirkung zeigen können. Für detailliertere Informationen sind Normen, Schweißrichtlinien (z. B. des DVS) und andere Literaturstellen heranzuziehen.

Schlackeneinschlüsse	Bindefehler	Unsymmetrische Naht
		
Ursachen: Schweißleistung zu gering, Lichtbogen zu lang, schlechte Schweißnahtvorbereitung, Schlacke der darunterliegenden Raupe schlecht entfernt, vorlaufende Schlacke, stechende Brennerführung bei schlackeführenden Fülldrähten.	Ursachen: Falsche Schweißleistung, zu hohe Schweißgeschwindigkeit, fallend geschweißt, Lichtbogen nicht mittig geführt, übermäßig langer Lichtbogen.	Ursachen: Falscher Anstellwinkel des Schweißbrenners, zu großes Schweißbad, falsche Schweißparameter, Blaswirkung.
Nahtüberhöhung	Einbrandkerben	Schweißspritzer
		
Ursachen: Zu viel Zusatz im Verhältnis zur Schweißgeschwindigkeit, zu großer Elektrodendurchmesser, falsche Brenneranstellung.	Ursachen: Lichtbogen zu lang / Spannung zu hoch, Schweißgeschwindigkeit zu hoch, Schweißleistung zu hoch, übermäßiges Pendeln, falsche Brenneranstellung.	Ursachen: Falsch eingestellte Schweißparameter, falsche Polarität, schlechte Qualität des Zusatzes, mangelhafte Schutzgasversorgung.
Ungenügende Wurzeldurchschweißung	Übermäßiger Einbrand / Wurzeldurchhang	Bauteilversatz
		
Ursachen: Ungeeignete Schweißnahtvorbereitung, Spalt zu gering, Schweißleistung zu gering, Lichtbogen zu lang, zu hohe Schweißgeschwindigkeit.	Ursachen: Zu hoher Wärmeeintrag, zu großer Spalt, zu dünne Wurzellage.	Ursachen: Schlechte Fixierung oder Heftung der Werkstücke, Verzug beim Heften, Bruch der Heftnähte vor dem Überschweißen.

Auftreten und Vermeiden von Poren

Im Gegensatz zu den vorgenannten Erscheinungen können Poren beim Schweißen nur bedingt durch die chemische Zusammensetzung von Grundwerkstoff und Schweißgut beeinflusst werden. Grundsätzlich sind zwei Arten der Porenbildung möglich.



Poren

Im flüssigen Zustand löst Stahl Gase wie Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Bei der metallurgischen Porenbildung scheiden sich gelöste Gase während des Erstarrungsvorganges aufgrund des Löslichkeitssprunges von flüssiger zu fester Phase als Gasblasen aus (H, N₂, C₂O, O). Ist die Erstarrungsgeschwindigkeit größer als die Geschwindigkeit, mit der die Gasblasen aufsteigen, so werden sie eingeschlossen („eingefroren“) und bleiben vorwiegend kugelig als Poren in der Schweißnaht zurück. Je nach Gasmengenangebot können diese Poren auch schlauchförmig vorliegen. Gasblasen entstehen an der Phasengrenze zwischen flüssig und fest und an in der Schmelze schwimmenden Schlackenteilchen.

Mechanische Porenbildung tritt auf, wenn mit Gasen (z. B. Luft) gefüllte Spalte oder Hohlräume überschweißt werden. Können die durch die Schweißwärme expandierenden Gase nicht vollständig in eine andere Richtung entweichen, so baut sich ein Druck auf, der sich durch Blasenbildung in das flüssige Schweißbad abbaut. Verstärkt kann dieser Effekt noch durch gasbildende Stoffe in den Spalten und Hohlräumen werden (Feuchtigkeit, Fette und Öle, Bestandteile von Anstrichstoffen, metallische Überzüge). Mechanisch gebildete Poren haben in der Regel eine Verbindung zu den Hohlräumen, die zu ihrer Entstehung führten.

Fehler und Ursachen	Gegenmaßnahmen
METALLURGISCHE POREN	
Hohe Stickstoffgehalte im Grundwerkstoff und Schweißzusatz	Lösungsvermögen für Stickstoff (z. B. erhöhte Cr- und Mn-Gehalte bei austenitischen und Duplex-Legierungen)
Aufstückung durch Plasmaschlitze	Schleifen der Schnittkante
Unzureichendes Abschirmen des Lichtbogenbereiches gegenüber der Atmosphäre durch: – zu langen Lichtbogen – falschen Elektrodenanstellwinkel – beschädigte Elektrodenumhüllung – Blaswirkung	mit kurzem Lichtbogen schweißen mit steilem Anstellwinkel schweißen auf unbeschädigte und zentrische Elektrodenumhüllung achten auf symmetrischen Werkstoffanschluß achten, möglichst mit Wechselstrom schweißen
Zu geringe Schutzgasmenge durch: – zu niedrige Einstellung – undichte Leitung – zu kleine Kapillarbohrung – zu geringen Vordruck für den Druckminderer	Einstellung entsprechend korrigieren Lecks suchen und beseitigen Richtige Zuordnung von Kapillare u. Druckminderer Flaschen- und Leitungsdruck muss erforderlichem Vordruck des Druckminderers entsprechen

Fehler und Ursachen	Gegenmaßnahmen
METALLURGISCHE POREN	
Unzureichender Gasschutz durch: – Luftzug durch offene Fenster, Türen etc. – ungenügende Gasmenge bei Schweißung – zu großer Gasdüsenabstand – exzentrischer Drahtelektrodenaustritt – falsche Gasdüsenform – falsche Gasdüsenstellung	Luftzug vermeiden, Absaugung anders positionieren Gas entsprechend länger vor- oder strömen lassen Gasdüsenabstand verringern Drahtelektrode besser richten, Kontaktrohr zentrisch anordnen Gasdüsenform auf Nahtvorbereitung abstimmen Gasdüse, in Schweißrichtung gesehen, möglichst hinter Brenner anordnen
Turbulenzen durch: – zu hohe Schutzgasdurchflußmenge – Spritzer an Gasdüse oder Kontaktrohr – unruhigen Lichtbogen	Gasmenge reduzieren Gasdüse und Kontaktrohr in Schweißpausen reinigen Drahtförderstörungen beseitigen, Spannung erhöhen bei stotternder Drahtelektrode, auf guten Stromübergang im Kontaktrohr achten, einwandfreier Masseanschluß, Schlacken von vorher geschweißten Raupen beseitigen
Thermik bzw. Kaminwirkung durch: zu hohe Schweißbadtemperatur durch zu hohe Werkstücktemperatur ungehinderter Luftzug in Pipelines	Schweißbadgröße reduzieren Vorwärm- oder Zwischenlagentemperatur verringern (falls metallurgisch möglich) Rohre abdichten
Feuchtigkeit durch: Feuchte Elektrodenumhüllung (erhöhte H-Gehalte) Schwitzwasser auf Drahtelektrode Feuchtigkeit auf Grundwerkstoff undichter wassergekühlter Brenner Schwitzwasser auf Schutzgasdüse	Elektroden nach Angaben des Herstellers rüchtrocknen Schweißzusatz temperieren, trocken lagern Schweißnahtbereich trocknen durch Abflämmen oder vorwärmen Lecks suchen und beseitigen, Drahttransportschlauch trocknen falls Wasser hineingekommen ist Brennerkühlung auf Überkapazität prüfen
Falsche Handhabung basischer Elektroden	Zündstellen überschweißen
Anschmelzen von Seigerungszone	basische Elektrode mit höherem Mn-Gehalt verwenden Einbrand vermindern durch Senken der Lichtbogenleistung oder Erhöhen der Schweißgeschwindigkeit
Rostige und verzünderte Oberflächen	Schweißnahtbereich vor dem Schweißen reinigen
MECHANISCHE POREN	
Lufteinschluss im unmittelbaren Nahtumgebungsbereich	Möglichkeiten schaffen, dass eingeschlossene Luft entweichen kann, z. B. Schweißspalt vergrößern, Stumpfnähte anstelle von Kehl- oder Überlappnähten
Feuchtigkeit im Schweißspalt, unter Umständen in Rost chemisch gebunden	Feuchtigkeit durch Vorwärmen beseitigen, Rost- oder Zunderschichten entfernen, Stumpfnähte anstelle von Kehl- oder Überlappnähten
Fettschichten im Schweißspalt, entweder als Verunreinigung oder zur Korrosionsvermeidung oder zu Schmierzwecken bewusst aufgebracht	Fett durch Lösungsmittel beseitigen, Schweißspalt vergrößern und gut trocknen, Stumpfnähte anstelle von Kehl- oder Überlappnähten
Metallische Überzüge (z. B. Zinn, Zink)	Empfohlene Schichtdicken einhalten, Metallüberzüge eventuell beseitigen, Schweißspalt vergrößern, Stumpfnähte anstelle von Kehl- oder Überlappnähten
Anstrichstoffe (z. B. Fertigungsbeschichtungen)	Günstigen Anstrichstoff wählen, vorgeschriebene Schichtdicke einhalten, zu dicke Schichten eventuell entfernen, für gute Ausgasung im Spalt sorgen, Kehl- oder Überlappnähte durch Stumpfnähte ersetzen

Auftreten und Vermeiden von Rissen



Die folgende Aufstellung gibt Erläuterungen zu möglichen ungünstigen Erscheinungen beim Schweißen von Stählen und zeigt Maßnahmen zur Vermeidung dieser Fehler auf. Grundsätzlich können die meisten der angeführten Erscheinungen durch Optimierungen der chemischen Zusammensetzung von Stahl und Schweißzusatz vermindert werden.

Fehler und Ursachen	Gegenmaßnahmen
WASSERSTOFFRISSE	
Beim Schweißen diffundiert atomarer Wasserstoff in das Schweißgut und in die Wärmeeinflusszone. Während und nach dem Abkühlen kann dies zur Rissbildung besonders in Bereichen höherer innerer Spannungen und hoher Versetzungsdichte (z. B. an Korngrenzen beim Martensit) führen.	Verwendung von Schweißzusätzen, die im Schweißgut zu einem sehr geringen Wasserstoffgehalt führen. Rücktrocknung des Schweißzusatzes. Vermeiden hoher Spannungsbeaufschlagung. Vorwärmen der Verbindung. Anwendung des Wasserstoffarmglühens nach dem Schweißen. Verringerung von Aufhärtungen im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone.
ERSTARRUNGSRISSSE	
Erstarrungsrisse sind hauptsächlich mit Spurenelementen wie z. B. Schwefel und Phosphor, verbunden. Diese können sich während des Erstarrens in der Raupenmitte ausscheiden. Sie sind das Ergebnis der Ausbildung, niedrig schmelzender Filme um die Korngrenzen. Diese Filme vermindern die Verformbarkeit des Schweißguts, und es können sich Längsrisse aufgrund der Schrumpfspannungen beim Erstarren des Schweißgutes ausbilden.	Änderung der Schweißparameter, sodass die Einzelraupen breiter und flacher werden, d.h. Verringerung des Tiefen-Breiten-Verhältnisses einer Raupe. Verminderung der Aufmischung mit dem Grundwerkstoff. Verringerung der Schweißgeschwindigkeit. Anmerkung: Erstarrungsrisse treten selten in Stählen mit niedrigen Schwefel- und niedrigen Phosphoranteilen auf.
RISSE DURCH SPANNUNGSARMGLÜHEN	
Karbid- oder Nitridausscheidungen können während des Spannungsarmglühens auftreten, wenn das Spannungsarmglühen und/oder die Stahlzusammensetzung ungünstig sind. Dies kann die Verformbarkeit des Stahls soweit herabsetzen, dass der Spannungsabbau nicht nur zu plastischen Verformungen, sondern auch zu Rissbildungen führt.	Verringern der Spannungskonzentration durch Schleifen der Raupenübergänge. Vermindern des Grobkornanteils in der Wärmeeinflusszone durch eine richtige Folge der Schweißraupen. Einsatz eines optimalen Verfahrens zur Wärmebehandlung.
SPANNUNGSRISSKORROSION	
Eine kritische Kombination von Spannung, Mikrostruktur und Umgebungsmedium kann zu dieser Form der Korrosion führen, wobei immer alle drei Einflussfaktoren gleichzeitig vorliegen müssen.	Vermeiden von Spannungskonzentrationen. Spannungsverminderung in allen Schweißungen.
ENDKRATERRISSE	
Schweißleistung wurde zu schnell reduziert Starke Schrumpfung während der Erstarrung des Schweißbades Schlechte Qualität des Zusatzes	Rückführung der Elektrode um Krater aufzufüllen Kraterfüllfunktion der Maschine nutzen, oder die Auffüllzeit verlängern Schweißzusatz auf Nahtflanke führen und Schweißung beenden

Wirtschaftlichkeit & Kalkulationshilfen

Es liegt im Wesen der durch Wettbewerb gekennzeichneten Wirtschaft, dass sich jeder Wirtschaftsteilnehmer um ein möglichst günstiges Verhältnis zwischen dem Ertrag seiner Produktionsleistung und dem dazu erforderlichen Aufwand bemüht. Die Kostensenkung ist eine komplexe Aufgabe, die in verschiedenste unternehmerische Bereiche einwirkt. Dieser Abschnitt versucht in sehr knapper Form eine Übersicht über Faktoren zu geben, die auf die Wirtschaftlichkeit einer Schweißverbindung Einfluss haben und bietet ein einfaches Kalkulationsschema, das die grobe Abschätzung des Schweißzusatzbedarfs und der Schweißzeit erlaubt.

Abschätzung des Schweißzusatzbedarfs

Ausbringung von Stabelektroden

Einen schnellen Überblick über die potentielle Ausbringung von Stabelektroden geben die jeweiligen EN ISO-Normen nach welcher die Stabelektroden eingestuft sind.

Am Beispiel der unlegierten Stabelektrode BÖHLER FOX EV 50 kann somit folgende Ausbringung errechnen.

BÖHLER FOX EV 50

Stabelektrode, unlegiert, basisch umhüllt

Normbezeichnungen			
EN ISO 2560-A	EN ISO 2560-B	AWS A5.1	AWS A5.1M
E 42 5 B4 2 H5	E 4918-1 A U H5	E7018-1H4R	E4918-1H4R

Ausbringung gemäß EN ISO 2560

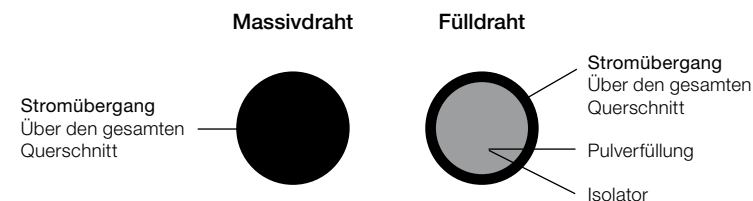
Kennziffer	Ausbringung [%]	Stromart ^{a, b}
1	$\eta \leq 105$	AC und DC
2	$\eta \leq 105$	DC
3	$105 < \eta \leq 125$	AC und DC
4	$105 < \eta \leq 125$	DC
5	$125 < \eta \leq 160$	AC und DC
6	$125 < \eta \leq 160$	DC
7	$\eta \leq 160$	AC und DC
8	$\eta \leq 160$	DC

a Um die Eingabe für Wechselstrom nachzuweisen, sind die Prüfungen mit einer Leerlaufspannung von höchstens 65 V durchzuführen.

b AC = Wechselstrom, DC = Gleichstrom

Die Ausbringung hängt aber stark vom jeweiligen Typ ab. Um eine genauere Information zu der tatsächlichen Ausbringung zu erhalten, können Sie uns direkt kontaktieren oder besuchen Sie uns unter: www.voestalpine.com/welding

Ausbringung von Massivdrähten und Fülldrähten



Schweißzusatz Draht-Ø 1,2 mm	Drahtgewicht [g/m]	„Minus“ Spritzer, Schlacke usw. [g/m]	Gewicht des reinen Schweiß- gutes	Durchschnittlicher Prozesseffektivität
Massivdraht	8,68	-0,19	= 8,49	98–100 %
Metallpulver	8,30	-0,22	= 8,08	96–98 %
Basisch	7,48	-0,43	= 7,05	85–94 %
Rutil	7,22	-0,85	= 6,37	83–92 %

Ausbringung beim UP-Schweißen

Grundsätzlich kann beim UP-Schweißen von einer Ausbringung von 98–100 % vom Drahtgewicht gerechnet werden. Das bedeutet, dass 1 kg Draht ca. 0,98–1,00 kg Schweißgut ergibt.

Der Verbrauch von Schweißzusätzen ist von vielen Faktoren abhängig. Wir haben für unsere Kunden daher im Internet ein komfortables Programm erstellt den Welding Calculator, mit dessen Hilfe die benötigte Menge an Schweißzusätzen ermittelt werden kann. Sie finden dieses Programm unter: www.voestalpine.com/welding unter der Rubrik Services finden Sie den „Welding Calculator“.

Einschaltdauer und Abschmelzleistung

Der Anteil der reinen Schweißzeit wird oft als "Einschaltdauer" bezeichnet. Dieser in Prozent angegebene Wert sagt als absolute Größe nichts über die Wirtschaftlichkeit einer Arbeitsweise aus, da beispielsweise bei leistungsstarken Verfahren, bei denen die Nebenzeiten nicht im selben Ausmaß wie die eigentliche Schweißzeit gesenkt werden kann, die Einschaltdauer trotz geringerer Gesamtschweißzeit sogar prozentuell sinken kann.

Die Nebenzeiten, die die Einschaltdauer senken, können verfahrens-, bauteil-, betriebs- und persönlichkeitsbedingt sein. Es wird hier nicht im Detail auf einzelne Aspekte eingegangen. In jedem Fall bedarf es einer genauen Analyse, um Ansatzpunkte für die Senkung der Nebenzeiten zu finden.

Bei statistisch gut abgesicherten Einschaltdauerwerten errechnet sich die Vorgabezeit wie folgt: **Vorgabezeit = reine Schweißzeit / Einschaltdauer x 100**

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über Abschmelzleistungen gegeben, welche sich aber auf eine 100%ige Einschaltdauer beziehen. Die Abschmelzleistung wird nicht für jede einzelne Marke ausgewiesen, da die Streuung aus unterschiedlichen Schweißbedingungen diese Detaillierung nicht rechtfertigt.

Abschmelzleistung von Stabelektroden

In nachstehender Tabelle sind Abschmelzleistungen für verschiedene Umhüllungstypen überblicksmäßig dargestellt. Bei Wertebereichen ist der kleinere Wert jeweils der unteren Stromstärkengrenze für diese Elektrode zuzuordnen.

Die Werte in der Tabelle sind mit der jeweils beim Schweißen eingestellten Stromstärke [A] zu multiplizieren um das tatsächliche Abschmelzgewicht in [kg] zu erhalten.

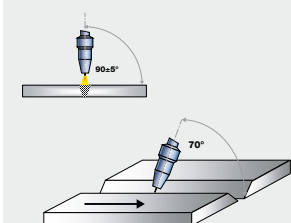
Stabelektrode	Abschmelzleistung [kg/(hxA)]				
Typ	Ø 2,5 mm	Ø 3,2 mm	Ø 4,0 mm	Ø 5,0 mm	Ø 6,0 mm
mitteldickumhüllt (rutil)					
R	0,09–0,015	0,009			
RC	0,010–0,011		0,009	0,009	
dickumhüllt (rutil)					
RR	0,008	0,009	0,009	0,01	0,01
RC	0,009	0,009	0,01	0,01	
RB	0,008–0,009	0,008–0,009	0,009	0,009	
dickumhüllt (rutil)					
B	0,009–0,010	0,01	0,01	0,011	0,011
R(B)	0,009	0,01	0,01	0,011	
Hochleistungselektroden					
RR (160 %)		0,012	0,013	0,014	0,015
RR (180 %)		0,014	0,015	0,016	0,016

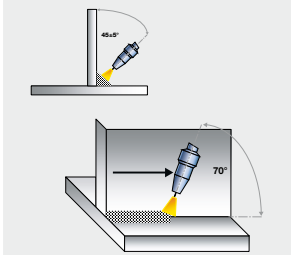
Abschmelzleistung von Fülldrähten

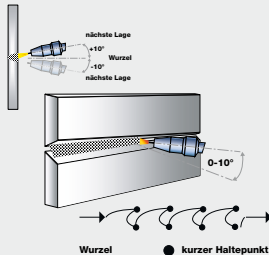
Um die theoretische Abschmelzleistung zu ermitteln, ist es notwendig die verschiedenen Parametereinstellungen zu kennen. Die folgende Aufstellung ist eine Empfehlung der Parametereinstellungen, welche je nach Draht, Anwendung und Position variieren können. Diese Aufstellung kann auch als Hinweis für die richtige Handhabung von Fülldrähten gelten.

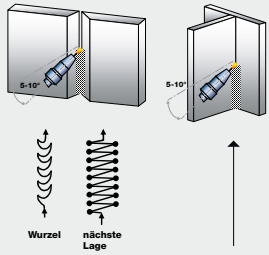
Die Spannung sollte hier nur als Hinweis gelten kann je nach Maschinenhersteller variieren. Grundsätzlich sollte die Spannung so eingestellt werden, dass eine Lichtbogenlänge von ca. 3mm daraus resultiert.

Anwendung unlegierter rutiler Fülldrähte mit M21-Schutzgas

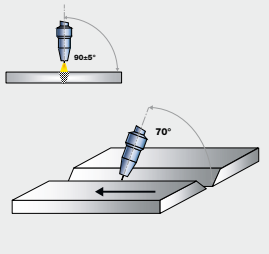
PA-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	120–150	18–20	Wurzel
			200–240	23–25	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	150–180	19–20	Wurzel
			240–300	25–28	Füll- u. Decklage
	1,4	15–20	160–200	20–25	Wurzel
			250–340	24–32	Füll- u. Decklage
1,6	15–20	Nicht empfohlen		Wurzel	
		250–360	26–33	Füll- u. Decklage	

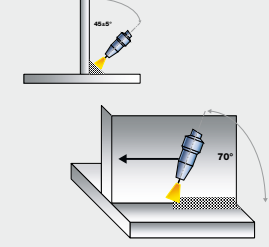
PB-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	210–250	20–24	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	200–320	24–31	Füll- u. Decklage
	1,4	15–20	220–360	24–32	Füll- u. Decklage
	1,6	15–20	230–400	25–33	Füll- u. Decklage
					Füll- u. Decklage

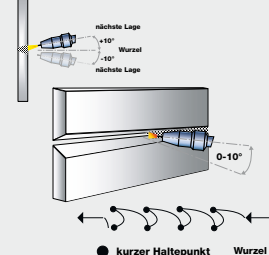
PC-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	140–190	18–20	Wurzel
			200–230	20–22	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	150–190	19–21	Wurzel
			200–250	21–25	Füll- u. Decklage
	1,4	15–20	160–210	20–25	Wurzel
			220–300	23–29	Füll- u. Decklage
1,6	15–20	Nicht empfohlen		Wurzel	
			230–310	24–30	Füll- u. Decklage

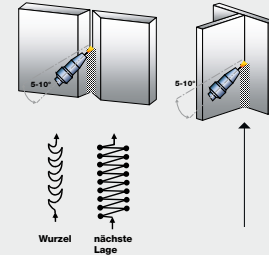
PF-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	140–170	19–22	Wurzel
			190–240	22–25	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	140–180	20–22	Wurzel
			200–240	23–26	Füll- u. Decklage
	1,4	15–20	200–240	23–26	Wurzel
			210–250	23–26	Füll- u. Decklage
1,6	15–20	Nicht empfohlen		Wurzel	
			210–270	23–27	Füll- u. Decklage

Anwendung unlegierter Metallpulverdrähte mit M21-Schutzgas

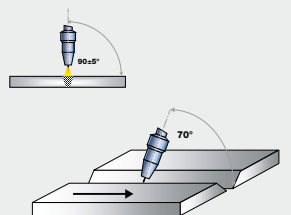
PA-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	100–140	18–21	Wurzel
			220–270	23–26	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	150–180	18–20	Wurzel
			250–320	27–30	Füll- u. Decklage
	1,4	15–20	170–200	21–23	Wurzel
			270–350	29–32	Füll- u. Decklage
1,6	15–20	Nicht empfohlen		Wurzel	
			300–400	29–32	Füll- u. Decklage

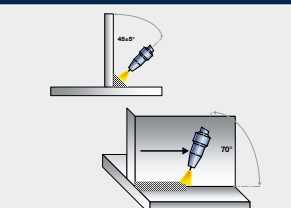
PB-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	230–270	25–28	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	240–320	24–31	Füll- u. Decklage
	1,4	15–20	210–360	24–32	Füll- u. Decklage
	1,6	15–20	230–400	25–33	Füll- u. Decklage

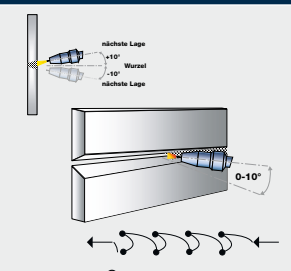
PC-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	110–140	18–21	Wurzel
			190–230	23–26	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	150–170	19–21	Wurzel
			200–260	21–26	Füll- u. Decklage
	1,4	15–20	160–210	20–25	Wurzel
			220–280	23–27	Füll- u. Decklage
1,6	15–20	Nicht empfohlen		Wurzel	
			230–300	24–29	Füll- u. Decklage

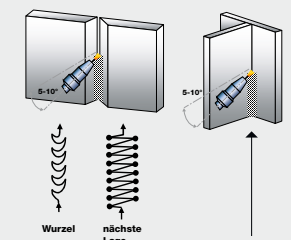
PF-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,0	15–18	100–130	19–20	Wurzel
			130–170	18–22	Füll- u. Decklage
	1,2	15–18	130–160	17–21	Wurzel
			170–190	19–21	Füll- u. Decklage

Anwendung hochlegierter rutiler Fülldrähte mit M21-Schutzgas

PA-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,2	15–18	140–190	22–27	Wurzel mit Keramik
		15–18	165–220	24–28	Fülllage
		15–18	165–250	24–29	Decklage

PB-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,2	15–18	160–260	25–29	Fülllage
	1,2	15–18	135–215	22–27	Decklage

PC-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,2	15–18	130–170	21–23	Wurzel mit Keramik
	1,2	15–18	155–235	22–28	Fülllage
	1,2	15–18	160–235	22–28	Decklage

PF-Position	Ø [mm]	Stick-out [mm]	Schweißstrom [A]	Spannung [V]	Lage
	1,2	15–18	140–175	20–24	Wurzel mit Keramik
	1,2	15–18	100–150	21–23	Fülllage
	1,2	15–18	130–280	22–27	Decklage

Die Abschmelzleistungen sind von verschiedenen Faktoren abhängig, somit kann diese von Draht zu Draht variieren. Die folgende Aufstellung zeigt die Abschmelzleistung von unlegierten gefalzten und nahtlosen Fülldrähten, Metallpulverdrähten und hochlegierten Fülldrähten. Auch hier gilt, dass sich die theoretische Abschmelzleistung auf eine 100 % ige Einschaltdauer beziehen.

Abschmelzleistung von unlegierten nahtlosen Metallpulverdrähten

Strom [A]	100	150	200	250	300	350	400	450
Durchmesser Ø 1,0 mm Abschmelzleistung [kg/h]	1,2	1,6	3,1	4,4				
Durchmesser Ø 1,2 mm Abschmelzleistung [kg/h]			2,5	3,6	4,9	6,6		
Durchmesser Ø 1,4 mm Abschmelzleistung [kg/h]				3,1	4,2	5,6	6,8	
Durchmesser Ø 1,6 mm Abschmelzleistung [kg/h]					3,7	4,7	5,9	7,3

Abschmelzleistung von unlegierten nahtlosen Fülldrähten

Strom [A]	100	150	200	250	300	350	400	450
Durchmesser Ø 1,0 mm Abschmelzleistung [kg/h]	0,96	1,60	2,70	3,40				
Durchmesser Ø 1,2 mm Abschmelzleistung [kg/h]			2,80	3,96	5,2	6,90		
Durchmesser Ø 1,6 mm Abschmelzleistung [kg/h]					4,1	5,1	6,9	7,8

Abschmelzleistung von unlegierten gefalzten Fülldrähten

Strom [A]	150	200	250	300	350	370
Durchmesser Ø 1,2 mm Abschmelzleistung [kg/h]	2,1	3,2	4,4	5,5		
Durchmesser Ø 1,6 mm Abschmelzleistung [kg/h]		2,5	3,6	4,6	5,9	6,5

Abschmelzleistung von hochlegierten Fülldrähten

Strom [A]	130	150	200	250	300	350
Durchmesser Ø 1,2 mm Abschmelzleistung [kg/h]	2,0	2,5	3,7	5,3		
Durchmesser Ø 1,6 mm Abschmelzleistung [kg/h]		2,2	3,4	4,6	5,8	7,5

Natürlich ist es auch möglich die Abschmelzleistung über den Drahtvorschub und das Drahtgewicht zu kalkulieren. Die unten stehende Tabelle ist eine Indikation für das Drahtgewicht, wobei bei schlackeführenden Fülldrähten die Ausbringung geringer ist, da die Füllung teilweise in Schlacke umgeschmolzen wird. Hier kann als Kalkulationshilfe die oben angeführte Ausbringung angenommen werden. Gleiches in Bezug auf Abschmelzleistung gilt auch für die Abschmelzleistung von Massivdrähten. Prinzipiell kann man das Drahtgewicht über die Dichte rechnen, hier gilt für Stahl eine Dichte von 7,85 kg/dm³ und bei Aluminium eine Dichte von 2,6–2,8 kg/dm³.

Grundsätzlich ist die Ausbringung von der Parametereinstellung und dem verwendeten Schutzgas abhängig.

Draht Typ	Drahtgewicht [g/m]					
	Ø0,8mm	Ø0,9mm	Ø1,0mm	Ø1,2mm	Ø1,4mm	Ø1,6mm
Unlegiert						
Massivdraht	3,62		6,05	8,61		15,19
Metallpulverdraht gefalzt				8,02	11,08	14,07
Metallpulverdraht nahtlos			5,85	8,43	11,47	14,98
Rutiler Fülldraht gefalzt			4,76	6,91		11,94
Rutiler Fülldraht nahtlos			4,81	6,92	9,42	12,3
Basischer Fülldraht nahtlos						
Hochlegiert						
Massivdraht	3,7		6,15	8,82		15,4
Metallpulverdraht gefalzt			5,8	8,4		14,8
Rutiler Fülldraht gefalzt		4,08		7,4		13,6
Aluminium						
Massivdraht		1,66	2,05	2,95	4,02	5,25

Wirtschaftlichkeitsüberlegungen

Bei der Bauteilgestaltung sind verschiedenste Kriterien zu beachten, um eine kostengünstige Fertigung eines Bauteils zu erreichen. Dazu gehören vor allem die funktions-, beanspruchungs-, werkstoff- und fertigungsgerechte Gestaltung des Bauteils. Verlangt das Bauteil eine Ausführung als Schweißkonstruktion, wirken weitere Faktoren - wie die Werkstoff- und Bearbeitungskosten der Einzelteile, Schweißkosten in die Wirtschaftlichkeitsprüfung ein.

Zum kostengünstigen Konstruieren geschweißter Bauteile lassen sich keine allgemein gültigen Anweisungen und Lösungen geben, doch kann man eine Reihe einzelner Grundregeln definieren, die die Arbeit erleichtern und Kosten sparen. In der folgenden Aufstellung sind solche Regeln aufgelistet, wobei die Reihenfolge nicht der Bedeutung der Regeln entsprechen muss.

Kehlnähte richtig bemessen <ul style="list-style-type: none"> • Kehlnähte so dünn wie möglich halten • Ausbildung der Kehlnaht beachten tieferen Einbrand nutzen • Dünne und lange Kehlnähte vorsehen • Nach Möglichkeit doppelte Kehlnähte vorsehen 	Mechanisieren der Fertigung <ul style="list-style-type: none"> • Teilmechanisierung des eingesetzten Schweißverfahrens • Ersatz des bestehenden Verfahrens durch ein mechanisiertes Schweißverfahren • Nahtvorbereitungen anpassen
Auf Zugänglichkeit achten	Günstigere Schweißposition wählen
Wirtschaftliche Nahtformen am Stumpfstoß einsetzen <ul style="list-style-type: none"> • Möglichst wenig Schweißgut einbringen • Schweißverfahren beachten, z. B. Fülldraht verwenden • Nahtöffnungswinkel prüfen • Einfluss des Werkstoffes auf die Nahtform prüfen • Wurzelgegenschweißung berücksichtigen 	Verzug vermeiden oder verringern <ul style="list-style-type: none"> • Vorgabe für Verzug einplanen, Vorbiegen • Vorspannen • Schweißfolgeplan aufstellen • Nahtform und Nahtgewicht prüfen • Verfahren mit weniger Verzug einsetzen • Von beiden Seiten gleichzeitig schweißen
Nicht mehr Schweißgut als nötig einbringen <ul style="list-style-type: none"> • Maßhaltig zusammenbauen • Genauere Brennschnitte herstellen • Nahtdicken und Nahtüberhöhungen überwachen 	Kostensenkungspotentiale in der Fertigung nutzen <ul style="list-style-type: none"> • Festlegung von Vorgabezeiten • Analyse der Zeiten und Suche nach Einsparungsmöglichkeiten
Nebenzeiten senken	Vorrichtungen verwenden
Badsicherungen verwenden	Prüfgerecht gestalten
Die reine Schweißzeit senken Unter Beachtung der Grundwerkstoffe, Wandstärken und weiterer Parameter: <ul style="list-style-type: none"> • Mehr Strom bei gleichem Elektrodendurchmesser verwenden • Dickere Elektroden verwenden • Andere Elektrodentypen verwenden • Andere Schweißhilfsstoffe verwenden • Verfahren mit höherer Leistung einsetzen wie z. B. schweißen mit Fülldraht oder UP-Draht 	Verfahrensbedingte Unterbrechungen und Nacharbeit verringern <ul style="list-style-type: none"> • Verfahrensbedingte Unterbrechungen verkürzen • Entfernen der Schlacke erleichtern • Spritzerbildung durch Wahl des richtigen Elektrodentyps verringern, z. B. Fülldraht verwenden • Spritzerbildung durch Wahl des richtigen Schutzgases verringern • Spritzer vermeiden durch Impulslichtbogentechnik unter Mischgas • Zentrale Gasversorgung einrichten
Schweißer schulen und motivieren	Schädliche Umwelteinflüsse beseitigen
Störungen an Geräten verringern <ul style="list-style-type: none"> • Qualität kaufen • Vorbeugende Instandhaltung betreiben • Gerät regelmäßig pflegen • Betriebsanleitung beachten 	Energiekosten einsparen <ul style="list-style-type: none"> • Kabelverluste verringern • Geräte in Pausen abschalten • Energiesparende Verfahren einsetzen • Energiesparende Stromquellen kaufen
Kosten und Qualität beachten	Einfluss von Fehlern bei der Nahtvorbereitung auf die Güte der Schweißnaht beachten

Wasserstoffklasifizierung

EN ISO	Edition (acc. Perinorm)	Name	H2	H4	H5	H10	H15
636	05/2016 (03/2017)	Stäbe, Drähte und Schweißgut zum Wolfram-Inertgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen					
2560	03/2010	Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornbaustählen			x	x	x
3580	03/2016	Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von warmfesten Stählen			x	x	x
3581	11/2016	Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen					
12153	06/2012	Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Gasschutz von Nickel und Nickellegierungen					
12536	08/2000	Stäbe zum Gasschweißen von unlegierten und warmfesten Stählen					
14171	11/2016	Massivdrahtelektroden, Fülldrahtelektroden und Draht-Pulver-Kombinationen zum Unterpulverschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen	x	x	x	x	x
14172	01/2016	Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von Nickel und Nickellegierungen					
14174	04/2012	Pulver zum Unterpulverschweißen und Elektroschlackeschweißen	x	x	x	x	
14175	06/2008	Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse					
14341	03/2011	Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen					
14343	08/2015	Drahtelektroden, Bandelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen von korrosionsbeständigen und hitzebeständigen Stählen					

EN ISO	Edition (acc. Perinorm)	Name	H2	H4	H5	H10	H15
16834	08/2012	Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen					
17632	04/2016	Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen			x	x	x
17633	03/2016 (02/2017)	Fülldrahtelektroden und Füllstäbe zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Gasschutz von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen					
17634	01/2016	Fülldrahtelektroden zum Metall-Schutzgasschweißen von warmfesten Stählen			x	x	x
18273	04/2016	Massivdrähte und -stäbe zum Schmelzschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen					
18274	04/2011	Draht- und Bandelektroden, Massivdrähte und -stäbe zum Schmelzschweißen von Nickel und Nickellegierungen					
18275	06/2012 (02/2017)	Umhüllte Stabelektroden zum Lichtbogenhandschweißen von hochfesten Stählen			x	x	x
18276	03/2016	Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von hochfesten Stählen			x	x	x
21952	07/2012	Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von warmfesten Stählen					
24034	01/2011	Massivdrahtelektroden, Massivdrähte und Massivstäbe zum Schmelzschweißen von Titan und Titanlegierungen					
24598	08/2012	Drahtelektroden, Fülldrahtelektroden und Draht-Pulver Kombinationen für das Unterpulverschweißen von warmfesten Stählen					
26304	11/2011 (02/2017)	Massivdrahtelektroden, Fülldrahtelektroden und Draht-Pulver-Kombinationen zum Unterpulverschweißen von hochfesten Stählen			x	x	x

Härtevergleichstabelle

R_m = Zugfestigkeit (MPa)
B = Brinellhärte

HV = Vickershärte
HRC = Rockwellhärte C

R _m	HV	HB	HRC
200	63	60	-
210	65	62	-
220	69	66	-
225	70	67	-
230	72	68	-
240	75	71	-
250	79	75	-
255	80	76	-
260	82	78	-
270	85	81	-
280	88	84	-
285	90	86	-
290	91	87	-
300	94	89	-
305	95	90	-
310	97	92	-
320	100	95	-
330	103	98	-
335	105	100	-
340	107	102	-
350	110	105	-
360	113	107	-
370	115	109	-
380	119	113	-
385	120	114	-
390	122	116	-
400	125	119	-
410	128	122	-
415	130	124	-
420	132	125	-
430	135	128	-
440	138	131	-
450	140	133	-
460	143	136	-
465	145	138	-
470	147	140	-
480	150	143	-
490	153	145	-
495	155	147	-
500	157	149	-
510	160	152	-

R _m	HV	HB	HRC
520	163	155	-
530	165	157	-
540	168	160	-
545	170	162	-
550	172	163	-
560	175	166	-
570	178	169	-
575	180	171	-
580	181	172	-
590	184	175	-
595	185	176	-
600	187	178	-
610	190	181	-
620	193	184	-
625	195	185	-
630	197	187	-
640	200	190	-
650	203	193	-
660	205	195	-
670	208	198	-
675	210	199	-
680	212	201	-
690	215	204	-
700	219	208	-
705	220	209	-
710	222	211	-
720	225	214	-
730	228	216	-
740	230	219	-
750	233	221	-
755	235	223	-
760	237	225	-
770	240	228	-
780	243	231	21
785	245	233	-
790	247	235	-
800	250	238	22
810	253	240	-
820	255	242	23
830	258	245	-
835	260	247	24

R _m	HV	HB	HRC
840	262	249	-
850	265	252	-
860	268	255	25
865	270	257	-
870	272	258	26
880	275	261	-
890	278	264	-
900	280	266	27
910	283	269	-
915	285	271	-
920	287	273	28
930	290	276	-
940	293	278	29
950	295	280	-
960	299	284	-
965	300	285	-
970	302	287	30
980	305	290	-
990	308	293	-
995	310	295	31
1000	311	296	-
1010	314	299	-
1020	317	301	32
1030	320	304	-
1040	323	307	-
1050	327	311	33
1060	330	314	-
1070	333	316	-
1080	336	319	34
1090	339	322	-
1095	340	323	-
1100	342	325	-
1110	345	328	35
1120	349	332	-
1125	350	333	-
1130	352	334	-
1140	355	337	36
1150	358	340	-
1155	360	342	-
1160	361	343	-
1170	364	346	37

R _m	HV	HB	HRC
1180	367	349	-
1190	370	352	-
1200	373	354	38
1210	376	357	-
1220	380	361	-
1230	382	363	39
1240	385	366	-
1250	388	369	-
1255	390	371	-
1260	392	372	40
1270	394	374	-
1280	397	377	-
1290	400	380	-
1300	403	383	41
1310	407	387	-
1320	410	390	-
1330	413	393	42
1340	417	396	-
1350	420	399	-
1360	423	402	43
1370	426	405	-
1380	430	409	-
1390	431	410	-
1400	434	413	44
1410	437	415	-
1420	440	418	-
1430	443	421	45
1440	446	424	-
1450	449	427	-
1455	450	428	-
1460	452	429	-
1470	455	432	-
1480	458	435	46
1485	460	437	-
1490	461	438	-
1500	464	441	-
1510	467	444	-
1520	470	447	-
1530	473	449	47
1540	476	452	-
1550	479	455	-
1555	480	456	-

R _m	HV	HB	HRC
1560	481	-	-
1570	484	-	48
1580	486	-	-
1590	489	-	-
1595	490	-	-
1600	491	-	-
1610	494	-	-
1620	497	-	49
1630	500	-	-
1640	503	-	-
1650	506	-	-
1660	509	-	-
1665	510	-	-
1670	511	-	-
1680	514	-	50
1690	517	-	-
1700	520	-	-
1710	522	-	-
1720	525	-	-
1730	527	-	51
1740	530	-	-
1750	533	-	-
1760	536	-	-
1770	539	-	-
1775	540	-	-
1780	541	-	-
1790	544	-	52
1800	547	-	-
1810	550	-	-
1820	553	-	-
1830	556	-	-
1840	559	-	-
1845	560	-	53
1850	561	-	-
1860	564	-	-
1870	567	-	-
1880	570	-	-
1890	572	-	-
1900	575	-	-
1910	578	-	54
1920	580	-	-
1930	583	-	-

R _m	HV	HB	HRC
1940	586	-	-
1950	589	-	-
1955	590	-	-
1960	591	-	-
1970	594	-	-
1980	596	-	55
1990	599	-	-
1995	600	-	-
2000	602	-	-
2010	605	-	-
2020	607	-	-
2030	610	-	-
2040	613	-	-
2050	615	-	56
2060	618	-	-
2070	620	-	-
2080	623	-	-
2090	626	-	-
2100	629	-	-
2105	630	-	-
2110	631	-	-
2120	634	-	-
2130	636	-	-
2140	639	-	57
2145	640	-	-
2150	641	-	-
2160	644	-	-
2170	647	-	-
2180	650	-	-
2190	653	-	-
2200	655	-	58
	675	-	59
	698	-	60
	720	-	61
	745	-	62
	773	-	63
	800	-	64
	829	-	65
	864	-	66
	900	-	67
	940	-	68

Achtung: Da es sich um ca.-Angaben handelt, können die vergleichenden Werte dieser Umrechnungstabellen nur als Schätzungen angesehen werden. Es wird empfohlen, insbesondere bei Werten der Spezifikations-Obergrenze, die jeweils empfohlenen Originalwerte anzuwenden. Die Umrechnung der Testdaten sollte, wann immer möglich, vermieden werden.

Schweißen von plattierten Erzeugnissen

Allgemeine Hinweise

Die im folgenden gegebenen Hinweise und Empfehlungen für das Schweißen der hochlegierten Plattierungsauflage gelten – unabhängig vom Herstellverfahren – für alle durch Walzplattierung, Sprengplattierung oder Schweißplattierung hergestellten Erzeugnisse. In den Tabellen P1 und P2 sind nur die Thermanit-Schweißzusätze und -prozesse für die Plattierungen, nicht aber für die ferritischen Grundwerkstoffe, aufgeführt.

A. Plattierte Bleche/Werkstoffkombinationen

Unter plattierten Blechen sind plattierte Erzeugnisse aus Kesselbaustählen und Feinkornbaustählen als Grundwerkstoff mit Auflagen aus hochlegierten nichtrostenden oder hitzebeständigen Stählen oder Ni-Basis-Legierungen – in beliebigen Kombinationen – zu verstehen. Siehe folgende Tabelle.

Gebräuchliche Grundwerkstoffe und Aufлагewerkstoffe

Grundwerkstoffe		Aufлагewerkstoffe (W.-Nr.)	
P235GH	S255N, P255NH, S255NL	1.4000	1.4439
P265GH	P275N, P275NH, P275NL	1.4002	1.4462
H III	P315N	1.4301	1.4539
P295GH	P355N	1.4306	1.4571
19 Mn 5	S380N	1.4311	1.4573
16Mo3	S420N	1.4541	1.4580
16 Mo 5	15MnNi6-3	1.4550	1.4876
13CrMo4-5	20MnMoNi4-5	1.4404	2.4816
10CrMo9-10	20MnMoNi5-5	1.4429	2.4856
		1.4435	2.4858
		1.4438	2.4610

B. Anforderungen an die Verbindungsschweißung

Grundsätzlich sind zwei Forderungen zu erfüllen:

1. Korrosionsbeständigkeit

Die dem Korrosionsangriff ausgesetzte Seite der Schweißverbindung muss die gleiche Beständigkeit haben wie der Plattierungswerkstoff.

2. Mechanische Werte

Die mechanisch-technologischen Werte der Schweißverbindung dürfen die Festigkeit des Bauteils nicht beeinträchtigen.

Bei Verbindung der Aufлагewerkstoffe von Plattierungen treten unvermeidbar „Austenit-Ferrit“-Übergänge auf. Um zu verhindern, dass durch die Vermischung die Legierungsbestandteile weder kritisch „verdünnt“ werden, noch spröde martensitische Gefüge in der Übergangszone entstehen, ist es zumindest beim Schweißen einlagiger Verbindungen und beim Schweißen der ersten Lage bzw. Zwischenlage bei mehrlagigen Verbindungen erforderlich, mit optimalen Schweißbedingungen (Schweißprozesse und -parameter) zu arbeiten und möglichst hochlegierte Schweißzusätze zu verwenden.

Die 2. Forderung gilt hinsichtlich der Festigkeit praktisch nur für einseitig zugängliche Nahtausführungen, weniger für beidseitig zugängliche Nahtausführungen, da von der Bauteil-Berechnung her der Grundwerkstoff tragender Wandteil ist, die Plattierungsauflage jedoch unberücksichtigt bleibt. Die Duktilitätswerte müssen aber in beiden Fällen eingehalten werden.

C. Schweißzusätze

Austenitische (ferrithaltige) Plattierungsauflagen

Bei der Beurteilung der Eignung von Schweißzusätzen für das Verbinden von Plattierungsaufлагewerkstoffen sind die Nahtausführungsformen getrennt zu behandeln.

1. Beidseitig zugängliche Nähte

Bei beidseitig zugänglichen Schweißnähten ist unbedingt zuerst der Grundwerkstoff mit dem artgleichen oder artähnlichen Schweißzusatz zu schweißen und dann erst die Plattierungsseite mit dem (den) entsprechend gewähltem(en) Schweißzusatz(sätzen).

Auf keinen Fall darf mit un- oder niedriglegierten Schweißzusätzen auf den Plattierungswerkstoff oder die artgleichen bzw. höher legierten Schweißzusätze geschweißt werden, da dies mit Sicherheit zur Bildung unzulässig harter und schlecht verformungsfähiger martensitischer Mischzonen führen würde.

Siehe hierzu Fugenvorbereitung Abs. F 1 und Arbeitsfolge Abs. G.

1.1 Einlagige Ausführung

Es sind nur Schweißzusätze zu verwenden, die möglichst hoch legiert sind (höher als die Plattierungsauflage). Entsprechende Thermanit-Schweißzusätze sind in der Tabelle P 1 aufgeführt. Sie sind mit den ebenfalls in dieser Tabelle angegebenen vermischungsarmer Schweißprozessen zu verschweißen, wobei natürlich zusätzlich auf optimale Parameter zu achten ist. Nähere Angaben über diese Schweißzusätze enthalten die entsprechenden Thermanit-Werkstoffblätter.

1.2 Mehrlagige Ausführungen

1.2.1 Erste Lage/Zwischenlage

Hier sind ebenfalls möglichst hochlegierte Schweißzusätze einzusetzen. Bei austenitischen Plattierungen dürfen nur austenitische (ferrithaltige) Zusätze verwendet werden, keinesfalls jedoch Ni-Basis-Zusätze, wie z. B. Thermanit Nicro 82/182. Durch die Aufnahme von Ni aus dem Schweißgut eines solchen Schweißzusatzes würde nämlich die ferrithaltige Decklage vollaustenitisch und warmrissanfällig werden. Bei Ni-Basis-Plattierungen kann auch die Zwischenlage mit Ni-Basis-Schweißzusätzen ausgeführt werden.

Die geeigneten Zwischenlagen-Zusätze sind in den entsprechenden Thermanit-Werkstoffblättern näher beschrieben.

1.2.2 Decklage(n)

In Betracht kommen die den Auflegewerkstoffen entsprechenden Schweißzusätze und die zugehörigen Thermanit-Werkstoffblätter.

2. Nur von der Grundstoffseite her zugängliche Nähte

2.1 Auflegewerkstoffseite Schweißen

Beim Schweißen der Auflegewerkstoffseite ist jede Vermischung mit dem Trägerwerkstoff auszuschließen. Das Schweißen erfolgt in der Regel WIG mit artgleicher oder im Sonderfall höherlegierten Zusatzwerkstoffen bei gleichzeitiger Abschirmung der Wurzel mit Schutzgas.

2.2 Trägerwerkstoffseite Schweißen

Beim Schweißen der Trägerwerkstoffseite sind die Regeln für die Ausführung von Mischverbindungen zu beachten. Bei der Auswahl des Zusatzes ist selbstverständlich darauf zu achten, dass die mechanisch-technologischen Werte der Bauteilberechnung genügen. Siehe auch Abs. B!

Fugenvorbereitung gemäß Abs. F 2.

Anmerkung:

Über das sich im Übergang Austenit-Ferrit ausbildende Gefüge und die Zusammensetzung des „verdünnten“ Schweißgutes geben Schaeffler-Diagramm und Mischrechnung eine ausreichend sichere Aussage.

Plattierungsauflagen aus ferritischen Chrom-Stählen

Bei Plattierungsauflagen aus ferritischen Chrom-Stählen kann die Plattierungsseite meistens - sofern es sich nicht verbietet, z. B. wegen schwefelhaltiger Atmosphären aus korrosionschemischen Gründen - ganz mit austenitischen Schweißzusatzwerkstoffen geschweißt werden. Hierfür kann besonders Thermanit CM eingesetzt werden; ebenso können Thermanit Nicro 82 und 182 verwendet werden.

Bei Vorliegen schwefelhaltiger Atmosphäre mit Betriebstemperaturen über 450 °C ist für die Schweißung des Auflegewerkstoffes z. B. Thermanit 17 zu verwenden.

D. Schweißprozesse

Stabelektroden eignen sich für alle ein- und mehrlagigen Ausführungen und für Nähte, die nur von der Grundwerkstoffseite her zugänglich sind.

Sofern R-Stabelektroden im Lieferprogramm vorliegen, sind diese wegen des geringeren Einbrandes vorzuziehen.

WIG-Schweißdrähte/-stäbe werden vor allem zum Schweißen der Wurzel von Nähten verwendet, die nur von der Grundwerkstoffseite her zugänglich sind.

Sie bieten sich andererseits auch zum Schweißen der Auflegeseite an. Zur Einhaltung der Vorschrift, max. 0,04 % im Schweißgut, sind niedrig C-haltige WIG-Schweißzusätze zu verwenden.

Dagegen sollten **SG-Drahtelektroden** zumindest nicht für die 1. Lage auf dem Grundwerkstoff bei einlagiger oder als Zwischenlage bei mehrlagiger Ausführung verwendet werden; Schweißen der Decklage auf ausreichend legierter Zwischenlage – mit optimierten Schweißparametern – ist möglich.

Das **UP-Schweißen** wird in der Regel wegen zu hoher Vermischungseffekte (Martensitbildung, Aufkohlung, „Verdünnung der Legierungsgehalte“) nicht eingesetzt.

E. Wärmebehandlung

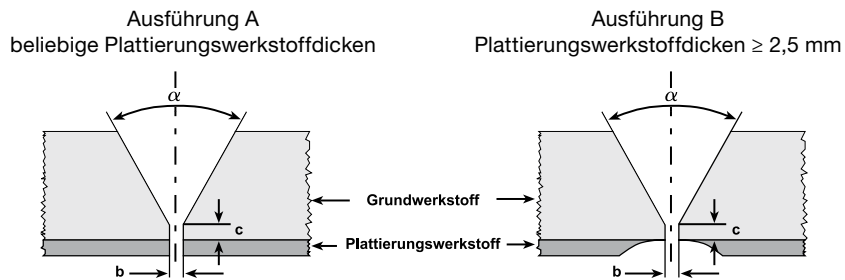
Ist eine Wärmebehandlung erforderlich so sind zur Einhaltung der oben genannten Bedingungen bei der Festlegung von Glühzeit, Glühzeit, Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit die Eigenschaften aller „beteiligten“ Werkstoffe zu beachten, d. h. die Anlasstemperatur des Grundwerkstoffes und seines Schweißzusatzes, das Sensibilisierungsverhalten, die IK-Anfälligkeit (siehe Kornzerfall-Diagramm nach H. J. Rocha) und die Versprödungsneigung des Plattierungswerkstoffes und des zugehörigen Schweißzusatzes.

Vgl. auch AD-Merkblatt W 8.

F. Fugenvorbereitung

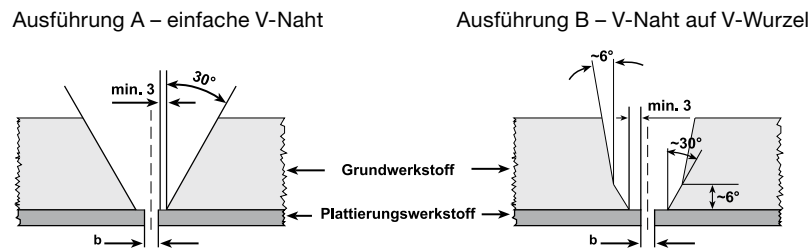
Für die Grundwerkstoffseite werden die Fugen wahlweise in V- oder U-Form vorbereitet. Der Öffnungswinkel bei der V-Naht beträgt ca. 60° , der Neigungswinkel bei der U-Naht etwa 10° . In den nachstehenden Skizzen sind nur die Möglichkeiten der Fugenvorbereitung für die V-Naht dargestellt.

1) Beidseitig zugängliche Nähte



Das Maß b kann bis zu 2 mm betragen. Das Maß c richtet sich nach dem gewählten Schweißprozess. Bei Ausführung B sollte auf der Stegseitenkante der Plattierungswerkstoff so weit abgearbeitet werden, dass mit Sicherheit der Plattierungswerkstoff durch den Schweißzusatz für den Grundwerkstoff nicht angeschmolzen wird.

2) Nur von der Grundwerkstoffseite zugängliche Nähte

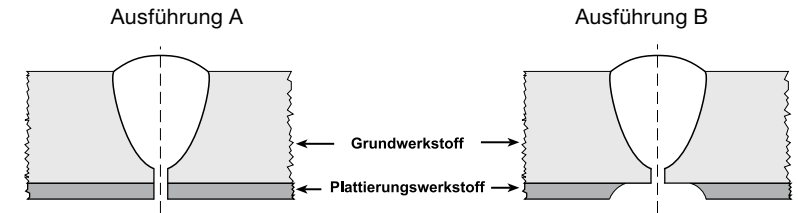


Der Sicherheitsabstand von mindestens 3 mm ist bei beiden Ausführungen erforderlich, damit kein mit dem Grundwerkstoff vermisches Schweißgut in die Plattierungsnaht eingeschwemmt werden kann. Das Maß b richtet sich nach dem gewählten Schweißprozess. Die gesamte Naht wird mit dem Schweißzusatz für den Plattierungswerkstoff geschweißt.

G. Arbeitsfolge beim Schweißen beidseitig zugänglicher Nähte

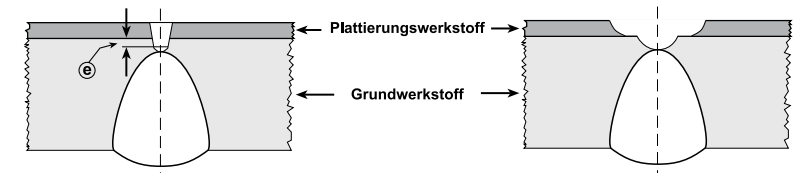
In den nachfolgenden Skizzen sind die Arbeitsfolgen für die beiden V-Nahtausführungen F.1A und F.1B dargestellt.

1) Schweißen des Grundwerkstoffes



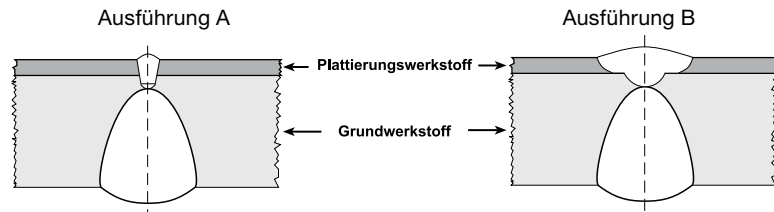
Der Grundwerkstoff wird mit geeignetem artgleichen oder artähnlichen Schweißzusatz geschweißt. Der Plattierungswerkstoff darf durch die Wurzellage nicht angeschmolzen werden.

2) Vorbereitung auf der Plattierungsseite und Schweißen der Kapplage

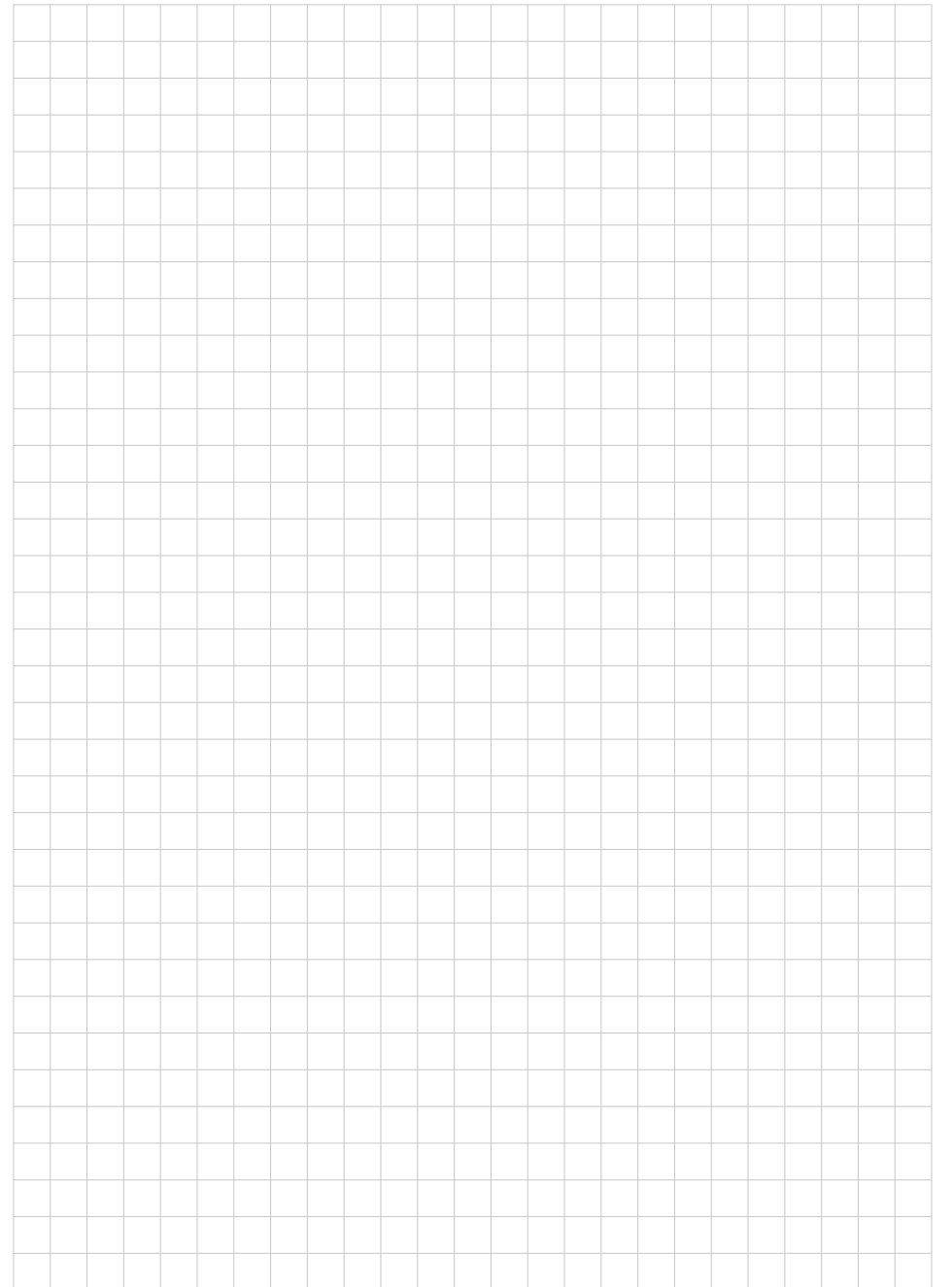


Die Wurzel ist ausreichend weit auszuarbeiten. Grundsätzlich kann die Kapplage bei beiden Ausführungen sowohl mit einem hochlegierten, der Plattierung genügenden Schweißzusatz geschweißt werden, (sofern die Festigkeit der Naht nicht unzulässig beeinträchtigt wird), als auch mit dem Schweißzusatz für den Grundwerkstoff. Wird bei der Ausführung A die Kapplage mit dem für den Grundwerkstoff gewählten Schweißzusatz geschweißt, dann ist ein Sicherheitsabstand e erforderlich, um ein Anschmelzen des Plattierungswerkstoffes zu verhindern.

3) Schweißen der Plattierung



Fertigschweißen der Naht auf der Plattierungsseite mit einem der Plattierung artgleichen oder höherlegierten Schweißzusatz, der den an die Beständigkeit der Plattierung gestellten Forderungen genügt.



voestalpine Böhler Welding

Welding know-how joins steel

Mit über 100 Jahren Erfahrung ist voestalpine Böhler Welding die globale Top-Adresse für die täglichen Herausforderungen in den Bereichen Verbindungsschweißen, Reparatur, Hartauftragung und Plattierung sowie für das Hartlöten. Über 40 Niederlassungen in 25 Ländern, 2.200 Mitarbeiter sowie mehr als 1.000 Vertriebspartner auf der ganzen Welt sind Garant für Kundennähe. Und mit der individuellen Beratung durch unsere Anwendungstechniker und Schweißfachingenieure gewährleisten wir, dass unsere Kunden auch die anspruchsvollsten schweißtechnischen Herausforderungen meistern. voestalpine Böhler Welding führt drei spezialisierte und fokussierte Produktmarken um die Anforderungen unserer Kunden und Partner stets optimal zu erfüllen.



Lasting Connections – Als Pionier für innovative Schweißzusätze bietet Böhler Welding weltweit ein einzigartiges Produktportfolio für das Verbindungsschweißen. Die über 2.000 Produkte werden kontinuierlich an die aktuellen Industriespezifikationen und Kundenanforderungen angepasst, sind von renommierten Institutionen zertifiziert und somit für die anspruchsvollsten Schweißanwendungen zugelassen. „Lasting Connections“ ist die Markenphilosophie, sowohl beim Schweißen wie auf menschlicher Ebene – als zuverlässiger Partner für Kunden.



Tailor-Made Protectivity™ – Mit innovativen und maßgeschneiderten Lösungen gewährleistet UTP Maintenance eine optimale Kombination aus Schutz (Protection) und Wirtschaftlichkeit (Productivity). Der Kunde und seine individuellen Anforderungen stehen im Zentrum. Das kommt im zentralen Leistungsversprechen zum Ausdruck: Tailor-made Protectivity.



In-Depth Know-How – Als ein führender Hersteller von Lötzusatzwerkstoffen bietet Fontargen Brazing bewährte Lösungen, die auf 50 Jahre Industrieerfahrung, erprobte Prozesse und Verfahren aufbauen. Dieses tiefgreifende Wissen (in-depth know-how) macht Fontargen Brazing international zum bevorzugten Partner für jede Löttaufgabe.

Haftungsausschluss

Angaben über die Beschaffenheit und Verwendung unserer Produkte dienen der Information des Anwenders. Die Angaben über die mechanischen Eigenschaften beziehen sich entsprechend den gültigen Normen immer auf das reine Schweißgut. In der Schweißverbindung werden die Schweißguteigenschaften u. a. vom Grundwerkstoff, der Schweißposition und der Schweißparameter entscheidend beeinflusst.

Die Gewährleistung der Eignung für einen bestimmten Verwendungszweck bedarf in jedem einzelnen Fall einer ausdrücklichen schriftlichen Vereinbarung.

Ausgabe September 2017
Handbuch der voestalpine Böhler Welding GmbH

