

**GEFAHRENQUELLE WASSERSTOFF
BEI DER SCHWEISSUNG VON UNLEGIERTEN STÄHLEN**

Gefahrenquelle „Wasserstoff“ bei der Schweißung von unlegierten Stählen

Übersicht

In dieser Publikation wird auf die Wasserstoff induzierte Rissbildung bei Schweißung von unlegierten Stählen eingegangen. Dabei wird deren Vermeidung durch geeignete Maßnahmen, wie die Anwendung ausgewählter Schweißprozeduren und die richtige Elektrodenhandhabung erläutert.

- TEIL 1** beschreibt den Wasserstoffeintrag in Schweißgüter bei Verwendung von Stabelektroden. Dabei wird im Besonderen die Thematik der Elektrodenbehandlung vor dem Schweißen, der Umgebungsklimata während der Schweißung und geänderter Elektrodenführung auf den Wasserstoffeintrag ins Schweißgut anhand von Messergebnissen beschrieben.
- TEIL 2** beschäftigt sich mit der Wasserstoff-Effusion nach Beendigung der Schweißungen. Es werden der grundsätzliche Zusammenhang von Temperatur und Zeit, sowie der Einfluss verschiedener Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperaturen und geänderter Streckenenergien und Lagenanzahlen bei praktischen Schweißungen auf das Effusions-Verhalten von Wasserstoff gezeigt.
- TEIL 3** geht auf eine praxisnahe Messmethode zur Evaluierung der Wasserstoffriss-Empfindlichkeit von Mehrlagenschweißverbindungen ein. Es wird die Prüfmethode anhand von praktischen Verbindungsschweißungen vorgestellt und die Zusammenhänge von Schweißgutfestigkeit, diffusiblen Wasserstoffgehalt, Verbindungsdicke und Zwischenlagentemperatur abgeleitet.

TEIL 1

Einfluss der Schweißbedingungen und Elektrodenbehandlung auf den Wasserstoffeintrag ins Schweißgut bei Verwendung von Stabelektroden

M. Fiedler, D. Schafzahl, J. Fischer, G. Posch, W. Berger
Böhler Schweißtechnik Austria GmbH, Kapfenberg, Austria

Schon sehr früh wurde erkannt, dass bei Schweißverbindungen mit erhöhten Wasserstoffangeboten in Kombination mit Zugspannungen und kritischen Gefügeausbildungen die Rissbildung, speziell bei Temperaturen unter 200 °C, einsetzt [1, 2]. Dabei wird vor allem der aus verschiedenen Quellen stammende Feuchtigkeit eine wesentliche Rolle als Ursache des erhöhten Wasserstoffangebots beigemessen.

Abbildung 1 zeigt Feuchtigkeits- bzw. Wasserstoffquellen bei der Schweißung mit Stabelektroden. Es kann dabei zwischen den Hauptquellen:

- Werkstück
- Umgebungsklima und
- Elektrode

unterschieden werden. Nachfolgend werden die einzelnen Feuchtigkeits- bzw. Wasserstoffquellen einzeln diskutiert und der Einfluss auf den Wasserstoffeintrag ins Schweißgut dargestellt.

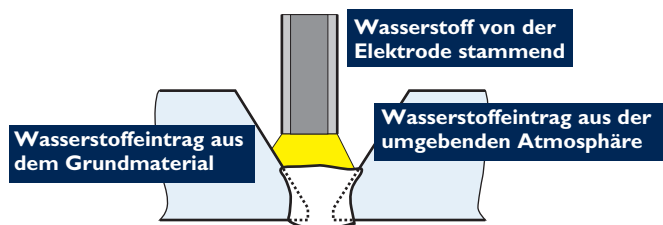


Abbildung 1: Feuchtigkeits- bzw. Wasserstoffquellen bei der Schweißung mit Stabelektroden

1. Feuchtigkeitsquelle: Werkstück

Primäre Feuchtigkeitsquellen sind vor allem Oberflächenschichten, wie Primer und Grundierung, die vor der Schweißung keiner Wärmebehandlung zur Entfeuchtung der Nahtkanten unterzogen wurden. Als sekundär kann der residuelle, besser bekannt als nicht diffusible Wasserstoffgehalt des Grundmaterials angesehen werden, der durch hochqualitative Stahlherstellungsverfahren bereits auf sehr geringem Niveau gehalten wird. Durch eine entsprechende Wasserstoffarmglühbehandlung, wie sie auch normativ für die Herstellung der Probenträger bei Prüfung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes in Schweißgütern festgelegt ist, kann dieser Wasserstoffeintrag weiter reduziert werden.

2. Feuchtigkeitsquelle: Umgebungsluft

Ein nicht zu unterschätzender Faktor des Wasserstoffeintrages ins Schweißgut wird durch die Umgebungsluft bei der Lichtbogenschweißung hervorgerufen. Durch die hohe Energie des Lichtbogens kann Feuchtigkeit von der Umgebungsluft, die im Lichtbogen zu einem gewissen Teil zu atomarem Wasserstoff dissoziiert bzw. ionisiert wird, ins Schweißgut aufgenommen werden und in weiterer Folge zu Schäden wie zum Beispiel Rissen führen. Die Umgebungsluft, die durch die beiden Parameter

- Relative Luftfeuchtigkeit und
- Lufttemperatur

definierbar ist, kann nach Angaben des DVS Merkblatt 0944 [3] bzw. nach Dickehut [4,5] durch den Wasserdampfpartialdruck beschrieben werden. Abbildung 2 zeigt den Einfluss von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte auf den Wasserdampfpartialdruck, Gleichung 1 kann als Berechnungsformel dienen [3].

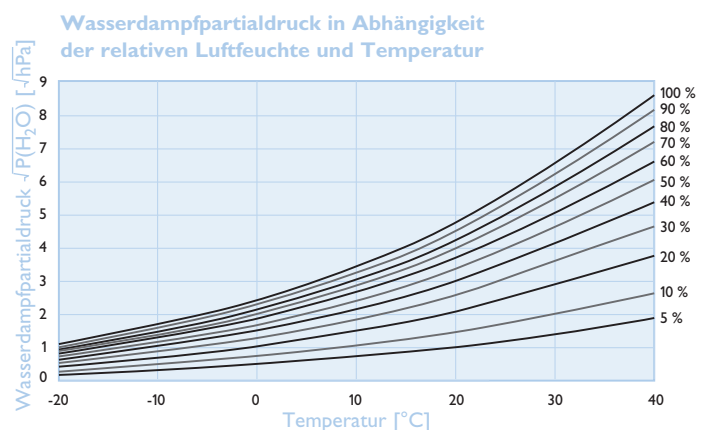


Abbildung 2: Beschreibung des Umgebungsklimas durch relative Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur

$$\sqrt{P(\text{H}_2\text{O})} = \sqrt{\frac{\text{rel.LF}}{100}} \times 10^{\left(-\frac{2313}{273,15 + \text{Temp.}} + 9,259\right)}$$

Gleichung 1: Berechnung des Wasserdampfpartialdrucks

Es ist aus Abbildung 2 zu erkennen, dass beim Auftreten hoher Temperaturen in Kombination mit hohen relativen Luftfeuchtigkeiten ein hoher Wasserdampfpartialdruck ge-

bildet wird, der auf die Schweißung einwirkt. Der Widerstand gegen den hohen Wasserdampfdruck kann nur durch geeignete Schweißprozeduren und durch die Elektrode selbst aufrechterhalten werden. Vor allem ist bei der Schweißung an feuchter Umgebungsluft ein möglichst kurzer Lichtbogen einzuhalten. Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Zusammenhang des diffusiblen Wasserstoffgehaltes mit der Lichtbogenlänge bei Schweißung einer basischen Elektrode an feuchter Umgebungsluft. Durch die Erhöhung der Lichtbogenlänge wird die Lichtbogenoberfläche und damit die Absorptionsoberfläche für Wasserstoff vergrößert. Natürlich sind hier auch die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Mechanismen zu betrachten. So vergrößert sich bei Erhöhung der Lichtbogenlänge auch die Lichtbogenspannung in Abhängigkeit der Stromquellenkennlinie, was wiederum zu einer erhöhten Streckenenergie und verbesserten Effusions-Möglichkeiten des Wasserstoffes aus dem Werkstück führt. Des Weiteren ist bei Erhöhung der Lichtbogenspannung auch auf die geänderten Dissoziations- und Ionisationsverhältnisse im Lichtbogen hinzuweisen, die zu einer Änderung der Wasserstoffaufnahme führt. Zusätzlich ist anzumerken, dass der Feuchtigkeitsgehalt bzw. die Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle die Wasserstoffaufnahme aus der umgebenden Luft verändert, da bei hoher Hüllenfeuchtigkeit relativ weniger Umgebungsfeuchtigkeit aufgenommen wird. Die Gesamtheit aller Mechanismen kann bei Schweißung an feuchter Luft zu einer Verringerung, für unlegierte basische Elektroden aber meist zu einer Erhöhung der Wasserstoffaufnahme und des diffusiblen Wasserstoffgehaltes bei Erhöhung der Lichtbogenlänge führen.

Diffusibler Wasserstoffgehalt in Abhängigkeit der Lichtbogenlänge bei Schweißung an feuchter Luft (95 % rel. LF, 21 °C Lufttemp.)

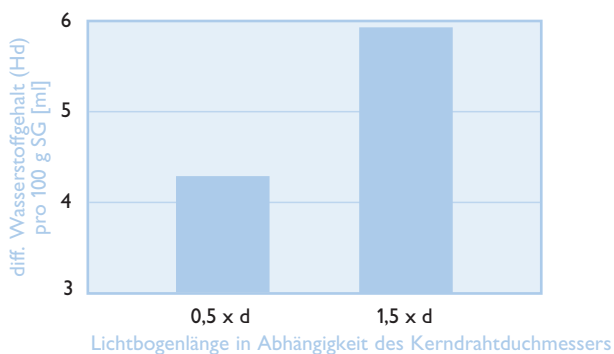


Abbildung 3: diffusibler Wasserstoffgehalt pro 100g Schweißgut in Abhängigkeit der Lichtbogenlänge am Beispiel einer basischen Elektrode; d= Kerndrahtdurchmesser der Elektrode

Die Abhängigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeit während der Schweißung auf den Wasserstoffeintrag in Schweißgüter wurde bereits sehr früh erkannt und ausführlich untersucht. Aus diesen Erkenntnissen ist es heutzutage möglich, den diffusiblen Wasserstoffgehalt (Wasserstoffeintrag) in Schweißgüter für unterschiedliche Umgebungsklimate vorauszusagen [4,5].

Wasserstoffeintrag in das Schweißgut in Abhängigkeit des Umgebungsklimas beim Schweißen

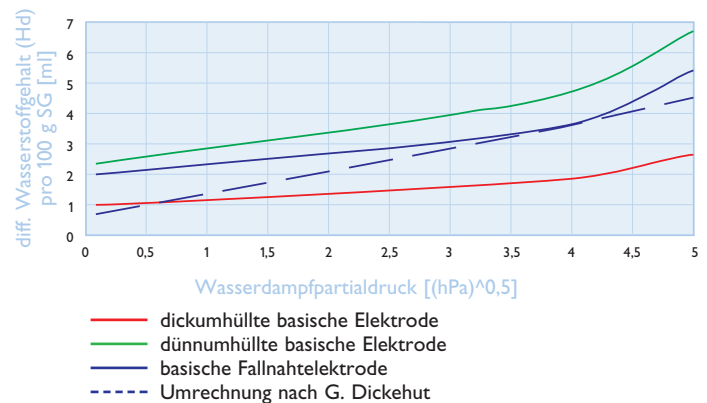


Abbildung 4: Einfluss des Umgebungsklimas bei Schweißung unterschiedlicher basischer Stabelektroden auf den Wasserstoffeintrag ins Schweißgut

Für unlegierte basische Stabelektroden von BÖHLER WELDING wurde eine Differenzierung zwischen den einzelnen basischen Stabelektroden-Typen vorgenommen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den diffusiblen Wasserstoffgehalt in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für verschiedene basische Stabelektroden. Diese Zusammenhänge können für Elektroden angewandt werden, die direkt aus der Verpackung entnommen werden bzw. im rückgetrockneten Zustand verschweißt werden. Für das Beispiel der basischen Fallnahtelektrode ist auch die von G. Dickehut entwickelte Umrechnung auf unterschiedliche Klimate gezeigt.

3. Feuchtigkeitsquelle: Elektrode

3.1. Abhängigkeit des Wasserstoffgehaltes vom Grundumhüllungstyp

Für die Schweißung von unlegierten Stählen kann eine Vielzahl von Elektroden eingesetzt werden. Jeder Elektrodentyp weist dabei anwendungsspezifische Charakteristika auf, wobei für den Wasserstoffeintrag grob zwischen den Umhüllungstypen unterschieden werden kann. Abbildung 5 zeigt für Durchmesser 4 mm Elektroden die Bandbreite des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im Schweißgut in Abhängigkeit des Umhüllungstyps. Zellulose-Elektroden weisen dabei den höchsten Wasserstoffgehalt durch den hohen Anteil an Hydroxyl-Gruppen in der Elektrodenhülle und einer gezielt eingestellten Restfeuchtigkeit auf. Auch bei Rutil-Elektroden wird für die Erreichung des speziellen Eigenschaftsprofils der Feuchtigkeitsgehalt in der Elektrodenhülle angepasst bzw. eingestellt. Bei basischen Elektroden ist eines der Hauptziele die Erreichung möglichst geringer Wasserstoffgehalte im Schweißgut um auch bei der Verschweißung hoch und höchstfester Stähle rissfreie Schweißnähte zu gewährleisten. Bei Verwendung dieser Elektroden wird auch meist eine Rücktrocknung vom Elektrodenhersteller empfohlen. Entwicklungstechnisch wird bei diesen Produkten ein hoher Aufwand zur Erreichung der Anforderungen

Wasserstoffeintrag in das Schweißgut bei Anwendung verschiedener Elektrodentypen

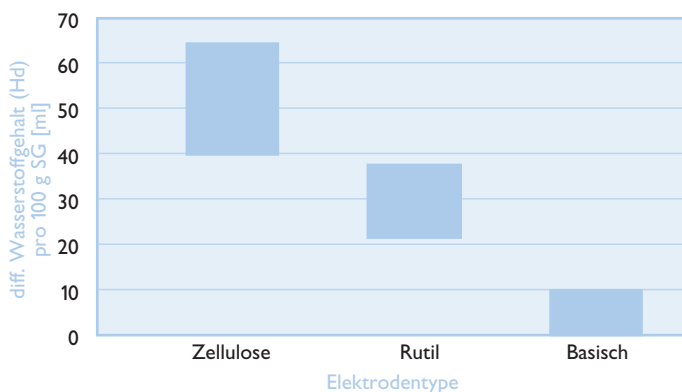


Abbildung 5: diffusibler Wasserstoffgehalt pro 100 g Schweißgut nach Normprüfmethode in Abhängigkeit des Elektrodenumhüllungstyps

betrieben, wobei das Arbeitsfeld des Entwicklers in folgende Hauptpunkte geteilt werden kann:

- Verminderung der Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle bei Auslagerung in feuchter Luft und
- Hohe Schutzwirkung der Elektrodenhülle bei Schweißung in feuchter Atmosphäre (Tropengebieten mit relativen Luftfeuchtigkeiten größer 90 % und hohen Temperaturen).

3.2. Abhängigkeit des Wasserstoffgehaltes von der Elektrodenlagerung

BÖHLER WELDING war einer der ersten Hersteller, der begann Stabelektroden in hermetisch verschlossenen Blechdosen zu liefern. Damit kann das Risiko der Feuchtigkeitsaufnahme während des Transports und der Lagerung vor Ort bis zum Verschweißen ausgeschlossen werden. Die absolut wasser- und dampfdichte Dose garantiert gebrauchsfertige Elektroden, die ohne Rücktrocknung sicher verschweißt werden können.



Wie in Abbildung 5 gezeigt, weisen basische Elektroden, je nach Umhüllungszusammensetzung, üblicherweise einen Wasserstoffgehalt von 1-10 ml pro 100 g Schweißgut auf. Dieser Wasserstoffgehalt kann allerdings durch unsachgemäße Elektrodenlagerung wesentlich erhöht werden, da die Elektrodenhülle Feuchtigkeit aus der Luft absorbiert. Um den

Sachverhalt der Elektrodenlagerung näher darzustellen, wurde eine Laborelektrode ohne die feuchtigkeitsaufnahme-hemmenden Mittel hergestellt und danach bei verschiedenen Umgebungsklimaten ausgelagert.

Die Auslagerungsdauer dieser basischen Laborelektrode (mit geringem Eisenpulveranteil in der Elektrodenhülle) wurde variiert. Diese Behandlung stellt eine Lagerung in verschiedenen Klimazonen dar, wobei die Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle durch die Gewichtszunahme gemessen wurde. Abbildung 6 zeigt die Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle in Abhängigkeit von Wasserdampfpartialdruck und Auslagerungsdauer. Bei einer geringen absoluten Luftfeuchtigkeit (Wasserdampfpartialdruck) wird auch bei langen Auslagerungszeiten wenig Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufgenommen. Bei hoher Luftfeuchtigkeit steigt jedoch der Feuchtigkeitsgehalt bereits nach sehr kurzer Auslagerungsdauer stark an. Es muss an dieser Stelle hingewiesen werden, dass die Feuchtigkeitsaufnahme wesentlich vom Hüllenaufbau, der Basisrezeptur, und dem Hüllendurchmesser abhängen, wobei es schon bei geringfügiger Änderung von Hüllenbestandteilen zu erheblichen Unterschieden im Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten kommen kann.

Feuchtigkeitsabsorption der Elektrodenhülle in Abhängigkeit der absoluten Luftfeuchtigkeit und Auslagerungszeit (Laborelektrode ohne feuchtigkeitsaufnahme-hemmende Hilfsstoffe)

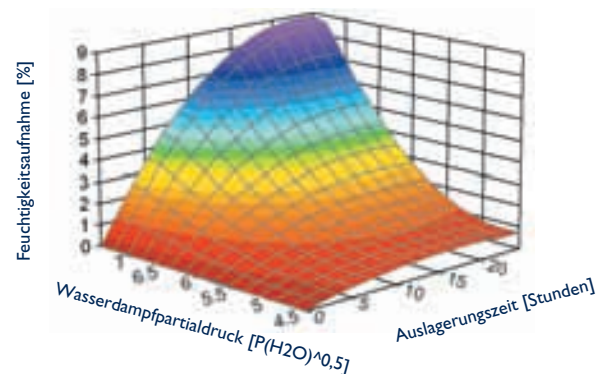


Abbildung 6: Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle

Wasserstoffeintrag ins Schweißgut abhängig von Elektrodenhüllenfeuchtigkeits-Aufnahme und Umgebungsklima während der Schweißung (Laborelektrode ohne feuchtigkeitsaufnahme-hemmende Hilfsstoffe)

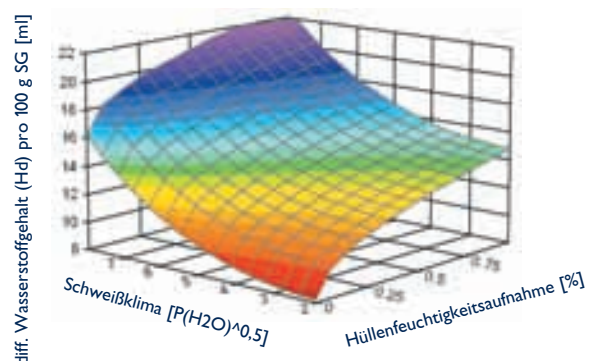


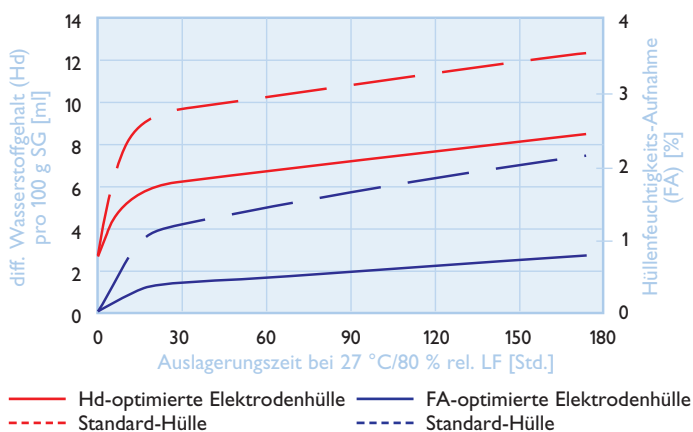
Abbildung 7: Einfluss des Wasserstoffpartialdrucks während der Schweißung (Schweißklima) und der Hüllenfeuchtigkeitsaufnahme auf den Wasserstoffeintrag bei Schweißung einer basischen Labor-Stabelektrode

Bei der Entwicklung von Stabelektroden legen die Ingenieure von BÖHLER WELDING daher ein besonderes Augenmerk auf die Anfälligkeit für Feuchtigkeitsaufnahme und den Zusammenhang von Hüllenfeuchtigkeit und diffusiblen Wasserstoffgehalt im Schweißgut. Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang für die erwähnte basische Laborelektrode. Zusätzlich ist in diesem Diagramm der Einfluss einer Schweißung bei unterschiedlichen Umgebungsklimaten gezeigt. Bemerkenswert ist die Zunahme des diffusiblen Wasserstoffgehaltes bei Auslagerung und Schweißung an feuchter Atmosphäre, das in diesem Fall auf das Fehlen geeigneter Hüllenbestandteile zur Reduktion des Wasserstoffeintrages zurückzuführen ist.

3.3. Verringerung des Wasserstoffeintrags in Schweißgüter durch innovative Elektrodenhüllen-Konzeptionierung

Der diffusible Wasserstoffgehalt stellt vor allem bei der Schweißung von hochfesten Verbindungen ein Kriterium hinsichtlich der Bildung von wasserstoffinduzierten Rissen dar. Die Verminderung der Hüllenfeuchtigkeitsaufnahme und des diffusiblen Wasserstoffgehaltes umhüllter Stabelektroden ist und bleibt deshalb ein vordringliches Entwicklungsziel. Abbildung 8 zeigt das Know How von BÖHLER WELDING: Deutlich bessere Wasserstoffwerte durch optimierte Hüllenkonzepte. Durch die Änderung der Hüllenrezeptur konnte die Feuchtigkeitsaufnahme, der Grundwasserstoffgehalt als auch der diffusible Wasserstoffgehalt nach Auslagerung wesentlich abgesenkt werden. Vor allem wurde die Anfälligkeit bei kurzer Auslagerung (Verschweißung der Elektroden innerhalb einer Arbeitsschicht) wesentlich verbessert.

Verringerung des Wasserstoffeintrages in Schweißgüter durch Optimierung von Elektrodenhüllen



Hd...diffusibler Wasserstoffgehalt
FA...Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle

Abbildung 8: Optimierung der Elektrodenhülle hinsichtlich des Wasserstoffeintrags und der Hüllenfeuchtigkeitsaufnahme; Umgebungsklima während der Schweißung: 23 °C/45 % rel. Luftfeuchte

Speziell für die Entwicklung von Stabelektroden für hochfeste Verbindungen ist es von Interesse, die Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle und die Anfälligkeit hinsichtlich Wasserstoffinduzierter Risse abzusenken. In diesem Zusammenhang ist sicherlich die Verminderung des Risikopotentials bei Verwendung solcher Schweißzusätze zu nennen.

Die Feuchtigkeitsaufnahme der Elektrodenhülle und die Wirkung des Wassers bzw. Wasserstoffes hängen wesentlich von der Hüllenkonzeption ab.

Abbildung 9 zeigt den Zusammenhang der Hüllenfeuchtigkeitsaufnahme und des Wasserstoffeintrages ins Schweißgut für verschiedene basische Stabelektrodentypen.

Zusammenhang von Hüllenfeuchtigkeitsaufnahme und Wasserstoffeintrag bei Verwendung von verschiedenen Elektroden

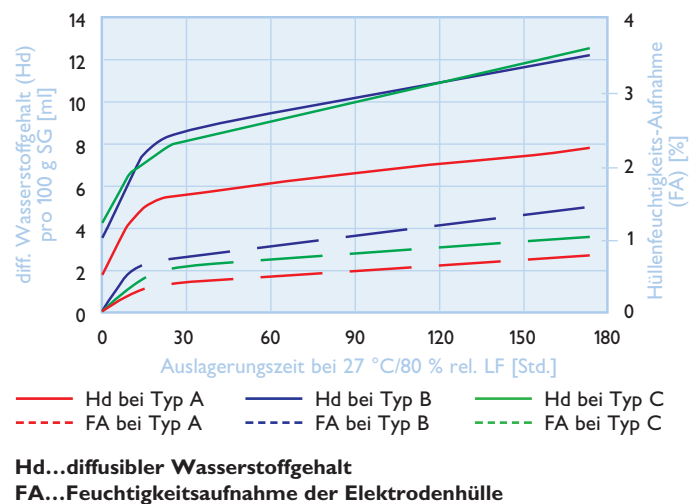


Abbildung 9: Zusammenhang der Hüllenfeuchtigkeitsaufnahme und des diffusiblen Wasserstoffgehaltes bei verschiedenen basischen Stabelektroden (Schweißklima: 21 °C/60 %rel. LF);

Typ A verhält sich bei Auslagerung an feuchter Atmosphäre relativ unkritisch bzw. zeigt nur eine geringe Zunahme des diffusiblen Wasserstoffgehaltes. Typ B und C weisen im Allgemeinen einen höheren Wasserstoffgehalt im rückgetrockneten Zustand auf. Zusätzlich kommt es bei Auslagerung zu verstärktem Wasserstoffeintrag. Die Unterschiede ergeben sich durch die Konzeption der Elektrodenhüllen und der Herstelltechnologie. Die Beschreibung der komplexen physikalischen und chemischen Vorgänge bei Auslagerung und Schweißung würde allerdings den Rahmen dieses Berichtes sprengen.

3.5. Einfluss der Elektrodenerwärmung während der Schweißung auf den Wasserstoffeintrag in das Schweißgut

Der diffusible Wasserstoffgehalt wird normativ durch die Schweißung eines Prüfstückes, das aus An-, Mittel- und Auslaufstück besteht, gemessen. Dafür werden ungebrauchte

Elektroden verwendet, die sich in Abhängigkeit vom eingestellten Schweißstrom, der Hüllenfeuchtigkeit und anderen Faktoren während der Schweißung des Prüfstückes erwärmen. Als Hauptgrund für die Temperaturerhöhung der Elektrode ist die Joule'sche Erwärmung durch die Strombelastung des Kerndrahtes zu nennen. Die Wärmeeinbringung ist dabei abhängig vom Quadrat des Schweißstromes und von der Schweißzeit. Der Wasserstoffeintrag in das Schweißgut ändert sich wenn Elektroden mit einer gewissen Hüllenfeuchtigkeit verschweißt werden, ungeachtet dessen ob die Feuchtigkeit während der Produktion oder nach einer Auslagerung in die Hülle gelangt ist. Abbildung 10 zeigt beispielhaft den diffusiblen Wasserstoffgehalt einer basischen Elektrode mit und ohne Elektrodenerwärmung. Die Elektrodenerwärmung wurde durch eine vorangehende Schweißung der halben Elektrodenslänge mit durchschnittlichem Strom erreicht. Durch diese Erwärmung wird ein „Selbsttrocknungseffekt“ der Elektrodenhülle bewirkt und Restfeuchtigkeit oder auch aufgenommene Feuchtigkeit wird wieder abgegeben. Hierbei ist anzumerken, dass die Bindekraft der Feuchtigkeit an bzw. in der Hülle auch von der Lagerzeit in feuchter Atmosphäre abhängt.

Wasserstoffeintrag in das Schweißgut bei Anwendung verschiedener Elektrodentypen

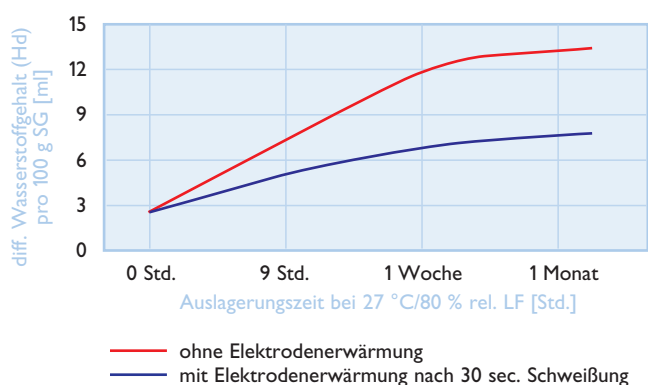


Abbildung 10: Verringerung des Wasserstoffeintrags durch Elektrodenerwärmung während der Schweißung, Schweißklima: 21 °C/60 %rel. LF

Zusammenfassung

Teil 1 zeigt die Möglichkeiten der schädlichen H₂-Aufnahme und wie diese durch geeignete Verpackung sowie durch das Know-How der Entwicklungsingenieure der BÖHLER Schweißtechnik vermindert werden kann. Grundsätzlich lässt sich der Schweißprozess in die Teilsysteme Grundmaterial, Elektrode und Umgebungsluft aufteilen, wobei jedes Teilsystem als Wasserstoffquelle dienen kann. Für die Gesamtbetrachtung können die einzelnen Wasserstoffeinträge aber nicht aufsummiert werden, da es durch die komplexen physikalischen und chemischen Vorgänge zu Wechselwirkungen im Schweißprozess kommt und der diffusible Wasserstoffgehalt beeinflusst wird.

Die wohl meist unterschätzten Wasserstoffquellen, die letztendlich zu hohen diffusiblen Wasserstoffgehalten im Schweißgut und in kritischen Fällen zu Rissen führen können, sind sicherlich feuchte Umgebungsklimata, die Schweißung mit langem Lichtbogen an feuchter Luft und die Auslagerung der Elektroden in feuchter Atmosphäre. Es wurden Beispiele exemplarisch dargestellt und auch das Betätigungsfeld der Entwicklungsingenieure in diesem Arbeitsfeld aufgezeigt. Durch innovative Elektrodenhüllenkonzeption ist es möglich, geringe Wasserstoffgehalte in Schweißgütern zu realisieren und das Risikopotential für wasserstoffinduzierte Rissbildung wesentlich abzusenken.

BÖHLER WELDING möchte dazu beitragen, Schweißingenieure, Schweißaufsichtspersonen und Schweißer auf diesem Gebiet zu sensibilisieren und durch Wahl geeigneter Schweißverfahren, Elektrodenbehandlungen und Schweißvorbereitungen den Wasserstoffeintrag in das Schweißgut so gering wie möglich zu halten.

TEIL 2 Einflüsse auf die Wasserstoffdiffusion in Schweißgütern bei Verwendung von Stabelektroden

M. Fiedler, D. Schafzahl, J. Fischer, Ch. Strauss, G. Posch, W. Berger
Böhler Schweißtechnik Austria GmbH, Kapfenberg, Austria

Teil 2 beschreibt die Möglichkeiten bei der Verarbeitung der Elektroden den diffusiblen Wasserstoffgehalt im Schweißgut möglichst gering zu halten. [1, 2].

Geeignete Schweißpraktiken zielen meist auf verbesserte Effusionsbedingungen, aber auch auf die Verringerung schädigungsbedingter Größen, wie Eigenspannungen und Gefügeausbildungen ab. Natürlich sei angemerkt, dass auch durch konstruktive Lösungen das Risikopotential gegenüber wasserstoffinduzierter Rissbildung wesentlich gesenkt werden kann.

Diese Untersuchung widmet sich der verschiedenen Einflüsse auf die Diffusionsbedingungen des Wasserstoffes in Schweißgütern. Es wird hierbei besonderes Augenmerk auf eine praxisnahe Überprüfung und Darstellung der gemessenen Ergebnisse gelegt. Der Diffusionsprozess, der in erster Linie als Temperatur-, Konzentrations- und Zeitgesteuerter Prozess verstanden werden kann, wird außerdem durch unterschiedliche Absorptions-, Fehlstellen- und anderer Mechanismen in Schweißgütern geprägt. Allein die Betrachtung von so genannten „Wasserstofffallen“ und deren Einfluss auf die Diffusionsbedingungen in komplexen Schweißgütern mit stark diversifizierten Gefüge-, Legierungs-, Einschluss- und Ausscheidungs- Charakteristiken macht eine theoretische Ableitung des Wasserstoffverhaltens schwierig [11-16].

Wichtig für die Betrachtung des Gefahrenpotentials von Wasserstoff ist unter anderem die Effusion bei verschiedenen Bedingungen einzuschätzen, um Gegenmaßnahmen bei Auftreten von Wasserstoffrissen einleiten zu können.

Die Durchführung praxisnaher Untersuchungen mit unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffen ermöglicht die genaue Beschreibung all dieser Effekte.

1. Einfluss verschiedener Auslagerungstemperaturen auf das Effusionsverhalten des Wasserstoffs

Als Grundlage der Versuche zur Bestimmung des Effusionsverhaltens können die in den entsprechenden Standards festgelegten Vorschriften, Probenvorbereitungen und sonstigen Bedingungen angewandt werden [8,9]. Im speziellen wurden die in der amerikanischen Norm AWS A 4.3 vorgeschlagenen Prüfstückdimensionen für

die Messungen herangezogen. Durch Aufschweißen von „Blindnähten“ auf Probblöcken mit bestimmter Größe und anschließendem Abschrecken in Eiswasser (innerhalb von 3 Sekunden) wird die Diffusion des Wasserstoffes aus der Probe bis zur tatsächlichen Messung wesentlich verhindert - der eingebrachte Wasserstoff wird sozusagen „eingefroren“. Nach durchgeführter Schlackenablösung und Entfernung des Anfangs- und Auslaufstückes der Probe kann der diffusible Wasserstoff mit geeigneten Wasserstoffanalysatoren und zugrunde gelegten Berechnungsalgorithmen ermittelt werden.

Zeitabhängige Wasserstoffeffusion: Optimierte basische Stabelektrode – Auslagerungstemperatur: 400 °C

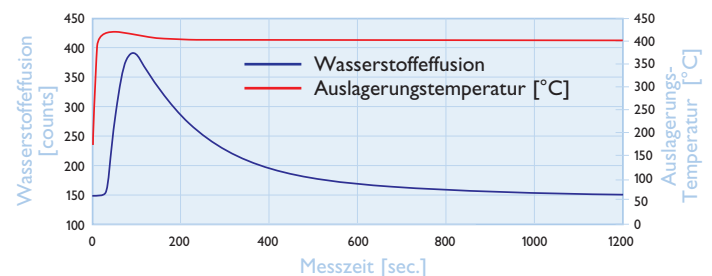


Abbildung 11: gemessener Wasserstoff der aus einer Probe effundiert, in Abhängigkeit der Zeit, am Beispiel einer basischen Stabelektrode und einer Auslagerungstemperatur von 400°C

Abbildung 11 zeigt das Effusionsverhalten von Wasserstoff in Abhängigkeit der Messzeit für Prüfung einer basischen Elektrode bei einer Auslagerungstemperatur von 400°C. Nach Aufbringung der Auslagerungstemperatur werden die Diffusionsbedingungen im Allgemeinen begünstigt und Wasserstoff entweicht aus der Probe. Je nach thermisch bedingter Aktivierung der Diffusionsvorgänge und Konzentrationsunterschiede können unterschiedliche Effusionsverhalten beobachtet werden. Abbildung 12 zeigt dieses Verhalten für unterschiedliche Auslagerungstemperaturen. Es ist zu erkennen, dass bei höher beaufschlagter Temperatur der Wasserstoff schneller aus der Probe diffundiert, was durch einen höheren Maximalpeak und der stärker abfallenden Kurve nach Erreichen dieses höchsten Wasserstoffaustritts bemerkt werden kann. Natürlich ist in diesem Zusammenhang zu diskutieren, inwieweit eine höhere Auslagerungstemperatur die Aktivierung des gesamten Wasserstoffes beeinflusst und damit für die Messung des diffusiblen Wasserstoffes empfohlen werden kann.

Wasserstoffeffusion bei unterschiedlicher Auslagerungstemperatur

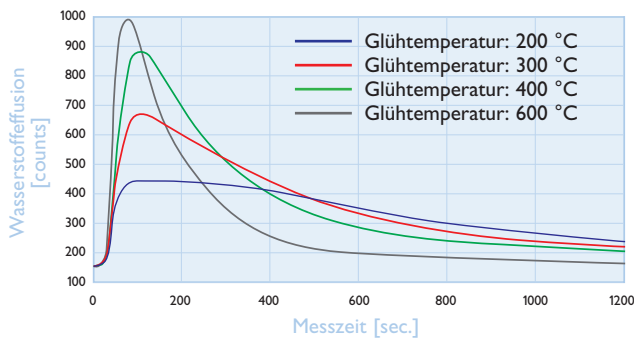


Abbildung 12: Verhalten der Wasserstoffeffusion bei unterschiedlicher Auslagerungstemperatur am Beispiel einer basischen Stabelektrode

Abbildung 13 zeigt den aus der Probe entweichenden Wasserstoff bei Einsatz unterschiedlicher Stabelektrodentypen. Bei Rutilelektroden erfolgt durch das Elektrodendesign ein relativ hoher Wasserstoffeintrag ins Schweißgut, demzufolge können durch die hohen Konzentrationsunterschiede hohe maximale Effusionspeaks erwartet werden – hohe diffusive Wasserstoffgehalte werden festgestellt.

Wasserstoffeffusion bei Anwendung unterschiedlicher Elektrodentypen

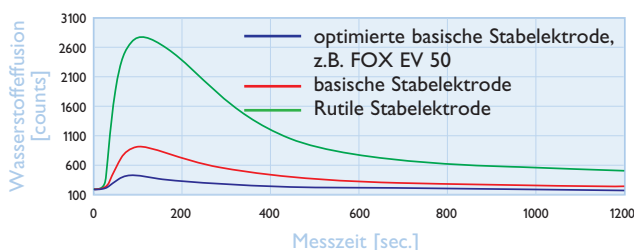


Abbildung 13: Wasserstoffeffusion bei Anwendung unterschiedlicher Stabelektrodentypen; Auslagerungstemperatur 400°C

Grundlagenforschungen wie diese sind bei BÖHLER WELDING ein wichtiger Teil der Entwicklungsarbeit. Sie trägt dazu bei, unsere Produkte immer aktuell zu halten.



BÖHLER FOX EV 50 – Eine Elektrode mit Tradition und immer auf dem neuesten Stand der Technik.

2. Einfluss verschiedener Abkühlbedingungen nach der Schweißung auf das Effusionsverhalten des Wasserstoffs

Normativ ist für die Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes in Schweißgütern eine rasche Abkühlung nach Schweißende durchzuführen, um gleichwertige Bedingungen zu schaffen, aber vor allem um den maximal in das Schweißgut eingebrachten diffusiblen Wasserstoffgehalt zu ermitteln. Bei praktischen Schweißanwendungen kommt es abweichend zu dieser Vorgangsweise in den allermeisten Fällen zu einer langsamen Abkühlung des Werkstückes. Auch ist speziell bei hochfesten Schweißverbindungen eine bestimmte Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur einzuhalten. Um diese unterschiedlichen Bedingungen zu evaluieren und eine Einschätzung des Diffusionsverhaltens bei praktischen Schweißungen zu erlangen, wurden Schweißversuche mit unterschiedlichen Vorwärmtemperaturen durchgeführt und nach verschiedenen Abkühlzeiten der verbleibende diffusive Wasserstoffgehalt in den Proben gemessen.

2.1. Wasserstoffeffusion in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur und Abkühlzeit nach Schweißende

Abbildung 14 zeigt die ermittelten diffusiblen Wasserstoffgehalte bei Anwendung verschiedener Vorwärmtemperaturen und Abkühlzeiten nach Schweißende bis zum Abschrecken in Eiswasser. Generell kann durch das Abkühlen der Probe an Luft ein hoher Anteil des Wasserstoffes effundieren. Für die gezeigte dickumhüllte rutile Stabelektrode werden so nach zehnmütiger Abkühlung nur mehr 20-40 % (je nach Vorwärmtemperatur) des Anfangs- Wasserstoffgehaltes festgestellt. Auffällig erscheint jedoch der gemessene diffusive Wasserstoffgehalt nach 3-sekündiger Abkühlzeit in Abhängigkeit der Vorwärmtemperatur. Durch eine höhere Vorwärmung gelangt ein höherer Anteil des eingebrachten Wasserstoffes in die umliegenden Gebiete der Schweißnaht und wird bei rascher Abkühlung bis zur Messung „gespeichert“. Dadurch werden bei höherer Vorwärmung durch die geänderten Diffusionsverhältnisse höhere diffusive Wasserstoffgehalte – aus dem Grundwerkstoff stammend – gemessen.

Bei hoher Abkühlzeit bis zum Abschrecken in Eiswasser wirkt sich eine Vorwärmung für bestimmte Elektrodentypen jedoch günstig für den Erhalt niedriger Wasserstoffgehalte aus. So wird die Schweißnaht durch den höher erwärmten Grundwerkstoff langsamer abkühlen, wodurch die Effusionsbedingungen verbessert werden und niedrige diffusive Wasserstoffgehalte resultieren. Abbildung 15 zeigt diesen Sachverhalt für eine optimierte basische Stabelektrode.

2.2. Diffusibler Wasserstoffgehalt bei Anwendung unterschiedlicher Stabelektrodentypen

Bei Schweißung unterschiedlicher Elektrodentypen ist auffällig, dass die resultierenden diffusiblen Wasserstoffgehalte neben dem Wasserstoffeintrag auch durch die Vorwärmung und die Abkühlzeit bis zum Abschrecken in Eiswasser beeinflusst werden. Durch die Konzentrationsunterschiede zwischen eingebrachten Wasserstoff (hauptsächlich elektrodentypenabhängig) und Wasserstoffgehalt im Grundwerkstoff werden bei Schweißzusatzwerkstoffen mit höheren Wasserstoffeinträgen bei höherer Vorwärmtemperatur auch relativ höhere Wasserstoffgehalte in den Grundwerkstoff eingebracht. So kann aus Abbildung 14 und Abbildung 15 erkannt werden, dass bei der Anwendung einer rutilen Stabelektrode ein wesentlich höherer Wasserstoffgehalt in den Grundwerkstoff gelangt. Im genannten Fall beträgt der Unterschied bei Vorwärmung von 25 °C auf 200 °C ca. 40 % nach 3 Sekunden Abkühlzeit. Für basische Stabelektroden mit geringeren Wasserstoffeinträgen kann der Unterschied mit lediglich 15% beziffert werden. Demgemäß kann auch bei hoher Abkühlzeit und höherer Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur bei Schweißung von rutilen (oder Zellulose-) Stabelektroden der Unterschied

nicht kompensiert werden und hohe Wasserstoffgehalte verbleiben in der Schweißverbindung (vgl. Abbildung 14 und 15; Abkühlzeit 600 Sekunden). Bei Betrachtung der rutilen Stabelektroden können somit bei hoher Abkühlzeit unabhängig von der Vorwärmtemperatur ähnliche Wasserstoffgehalte prognostiziert werden. Zwar wird durch die höhere Vorwärmtemperatur ein höherer Anteil des Wasserstoffes effundieren, jedoch wird auch ein höherer Wasserstoffgehalt in die Schweißverbindung eingebracht. Für die gezeigte optimierte basische Stabelektrode bewirken höhere Vorwärmtemperaturen bei hohen Abkühlzeiten Vorteile zur Erreichung niedriger Wasserstoffgehalte. Relativ weniger Wasserstoff wird durch höhere Vorwärmtemperaturen eingebracht, demgemäß sind auch geringere Wasserstoffgehalte bei langer Abkühlzeit festzustellen. Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass eine höhere Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur nur bedingt geeignet zur Erreichung niedrigerer Wasserstoffgehalte in Schweißverbindungen erscheint, da dieser wesentlich vom eingebrachten Wasserstoffgehalt abhängig ist. Dennoch werden im allgemeinen wasserstoffrisksbeeinflussende Faktoren, wie Eigenspannungsniveau, Gefügeausbildung und Festigkeit durch höhere Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur positiv – zur Vermeidung von Rissen – beeinflusst.

Effundierter Wasserstoff bei Anwendung unterschiedlicher Bedingungen, rutiler Stabelektrode

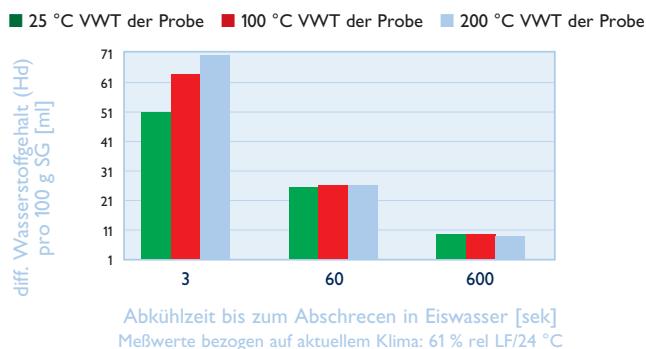


Abbildung 14: gemessener diffusibler Wasserstoffgehalt bei Anwendung unterschiedlicher Abkühlzeiten und Vorwärmtemperaturen am Beispiel einer dickumhüllten rutilen Stabelektrode

Effundierter Wasserstoff bei Anwendung unterschiedlicher Bedingungen, optimierte basische Stabelektrode

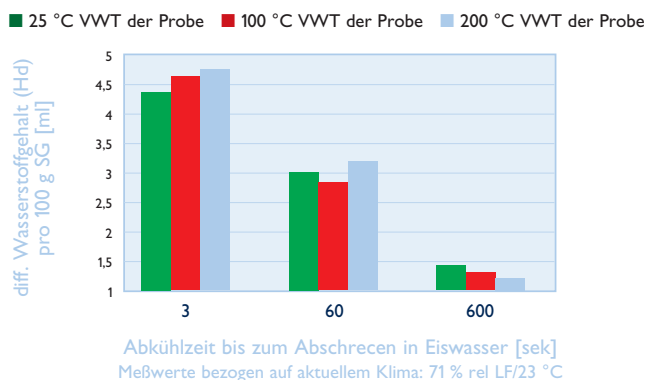


Abbildung 15: gemessener diffusibler Wasserstoffgehalt bei Anwendung unterschiedlicher Abkühlzeiten und Vorwärmtemperaturen am Beispiel einer optimierten basischen Stabelektrode

Einfluss der Abkühlzeit nach dem Schweißen auf den diffusiblen Wasserstoffgehalt bei Anwendungen verschiedener Elektrodentypen

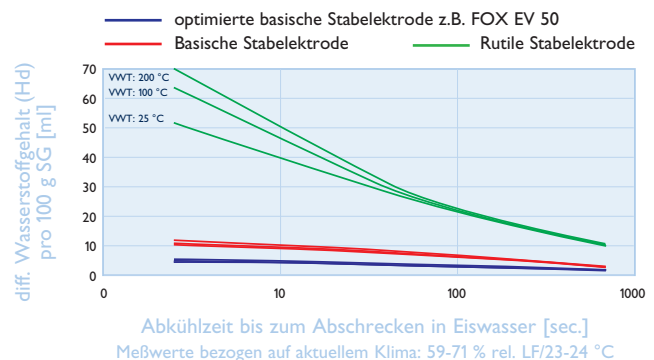


Abbildung 16: diffusibler Wasserstoffgehalt bei Schweißung mit unterschiedlichen Stabelektrodentypen in Abhängigkeit der Abkühlzeit

Abbildung 16 zeigt den diffusiblen Wasserstoffgehalt bei Schweißung mit unterschiedlichen Stabelektrodentypen in Abhängigkeit der Abkühlzeit nach Schweißende bis zum Abschrecken in Eiswasser. Bereits nach kurzer Abkühlzeit werden in Abhängigkeit des Konzentrationsunterschiedes nur mehr geringe Anteile des eingebrachten Wasserstoffgehaltes festgestellt.

3. Einfluss von Mehrlagen-Schweißungen auf das Effusionsverhalten des Wasserstoffs

In realen Schweißungen, speziell dickwandigen Verbindungen, die einem hohen Risikopotential gegenüber Wasserstoffrisen ausgesetzt sind, ist nach wie vor die Mehrlagenschweißung

vorherrschend. Nicht nur durch die thermisch aktivierte erhöhte Wasserstoffeffusion, sondern auch durch die Umkörnung des Gefüges der überschweißten Lagen (Raupen) können positive Effekte zur Vermeidung von Rissen erzielt werden. Um den Sachverhalt der Wasserstoff-Effusion bei Mehrlagenschweißungen darzustellen, wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Abbildung 17 zeigt hierfür die Nahtaufbauformen bei Schweißung mit unterschiedlicher Raupenanzahl.



Abbildung 17: Nahtaufbau bei Schweißung mit unterschiedlicher Raupenanzahl

3.1. Diffusibler Wasserstoffgehalt in Schweißgütern in Abhängigkeit der Raupenanzahl und Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur

Speziell im Pipelinebau stellt sich immer wieder die Frage, mit welchen Wasserstoffgehalten in den gefertigten Nähten während und nach Fertigstellung der Schweißverbindung zu rechnen ist. In vielen Fällen wird dabei nach Einbringen der Wurzelschweißung und/oder teilweiser oder vollständiger Schweißung der Hotpass-Lage die Zentriervorrichtung zur Rohr-Enden-Zentrierung gelöst und durch Verformung induzierte zusätzliche Spannungen können Risse hervorrufen. Vielfach werden diese Schweißungen aus wirtschaftlichen Gründen mit Zellulose-Stabelektroden verrichtet.

Der hohe Wasserstoffeintrag durch die Verwendung dieser Elektrodentypen und das Vorhandensein von meist dickwandigen Verbindungen erfordert spezielle Maßnahmen, wie die korrekte Einhaltung der Zwischenlagentemperatur, um rissfreie Nähte herzustellen. Von besonderem Interesse ist es deshalb, die diffusiblen Wasserstoffgehalte, bzw. die Wasserstoff-Effusion bei Anwendung von Zellulose-Elektroden mit unterschiedlicher Raupenanzahl und Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur zu kennen.

Abbildung 18 beschreibt den genannten Zusammenhang, dabei wurde im besonderen Maße darauf Wert gelegt, dass die nachfolgende Raupe erst bei Erreichen der Zwischenlagentemperatur von 50, 100 bzw. 150 °C eingebracht wurde. Nach Fertigstellung der letzten Schweißraupe wurde die Probe innerhalb von 3 Sekunden in Eiswasser abgeschreckt. Die Schweißungen mit nur einer Lage entsprechen den gezeigten Verhältnissen in Kapitel 2. Auch bei Verwendung von Zelluloseelektroden können dabei höhere Wasserstoffgehalte bei höherer Vorwärmtemperatur durch den hohen Wasserstoffeintrag festgestellt werden. Bei Einbringung einer 2. oder 3. Raupe sind in Bezug auf 100 g abgeschmolzenes Schweißgut relativ niedrigere diffusive Wasserstoffwerte durch

- die Abkühlung der 1. bzw. 2. Schweißraupe und
- zusätzliche Temperaturbehandlung beim Überschweißen festzustellen.

Weiters sind wiederum höhere Wasserstoffgehalte bei höheren Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperaturen auch bei erhöhter Raupenanzahl vorherrschend.

Diffusibler Wasserstoffgehalt bei Ein- und Mehrlagen- (Raupen-) Schweißungen, Zellulose Stabelektrode

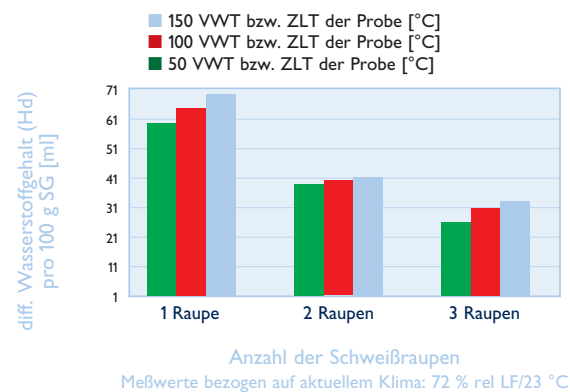


Abbildung 18: Diffusibler Wasserstoffgehalt in Abhängigkeit der Raupenanzahl und Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur bei Anwendung von Zellulose-Elektroden; VWT... Vorwärmtemperatur; ZLT... Zwischenlagentemperatur

3.2. Diffusibler Wasserstoffgehalt in Schweißgütern in Abhängigkeit der Raupenanzahl und verwendeter Elektrodentypen

Natürlich können hohe Wasserstoffeinträge durch geänderte Wahl des Schweißzusatzwerkstoffes prinzipiell geändert bzw. unter Umständen verringert werden. So kommt es bei Verwendung von basischen Fallnaht-Elektroden im Gegensatz zur gezeigten Zellulose Stabelektrode zu wesentlich geringeren diffusiblen Wasserstoffgehalten, sowohl bei Schweißung einer Lage, als auch für Mehrlagen-Schweißungen.

Abbildung 19 zeigt die diffusiblen Wasserstoffgehalte bezogen auf 100 g abgeschmolzenes Schweißgut für die genannten Elektrodentypen. Auch bei Schweißung von mehreren Raupen ist ein Wasserstoffkonzentrationsabhängiges Verhalten bei unterschiedlichen Elektroden zu beobachten, dass zu erhöhter Effusion von Wasserstoff bei relativ höherem Wasserstoffeintrag führt.

Wasserstoffeffusion bei Schweißung von mehreren Raupen in Abhängigkeit des Elektrodenumhüllungstyps

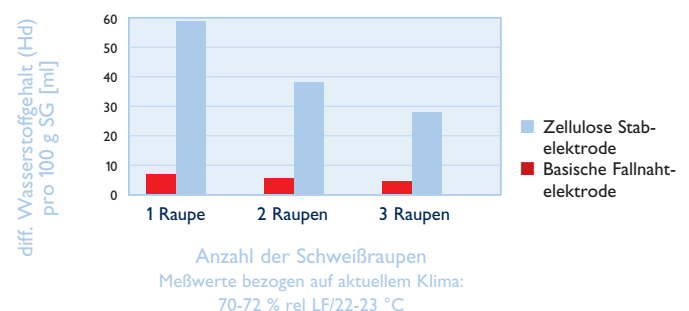


Abbildung 19: Wasserstoffeffusion bei Schweißung mit unterschiedlichen Stabelektrodentypen in Abhängigkeit der Raupenanzahl; Abkühlzeit nach Schweißende bis zum Abschrecken in Eiswasser: 3 Sekunden; Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur 50°C

$$H_d = (HEt) \cdot x^B \text{ mit}$$

$$HEt = HE + A \cdot t$$

$$A = f(HE)$$

$$B = f(HEt)$$

Gleichung 2: diffusibler Wasserstoffgehalt bei Mehrlagen- (Raupen-) Schweißungen in Abhängigkeit des Wasserstoffeintrags (elektrodenabhängig), Vorwärm-, bzw. Zwischenlagentemperatur, Raupenanzahl und elektrodenabhängige Wasserstoff-Effusion

H_d ... diffusibler Wasserstoffgehalt [ml/100g]
 HEt ... Wasserstoffeintrag in Abhängigkeit des Schweißzusatzes und der Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur [ml/100g]
 x ... Schweißraupenanzahl []
 B ... Lagenexponent []
 HE ... Wasserstoffeintrag in Abhängigkeit des Schweißzusatzes [ml/100g]
 t ... Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur über 20°C [K]
 A ... Schweißzusatzwerkstoff- abhängiger Faktor [ml/K] auf 100g Schweißgut bezogen

Grundsätzlich kann die in Gleichung 2 dargestellte Formel zur Einschätzung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes (H_d) für das Diffusionsverhalten bei Mehrlagen-(Raupen-)Schweißung mit geänderter Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperatur dienen. Demnach kann der diffusible Wasserstoffgehalt primär vom eingebrachten Wasserstoffgehalt abgeleitet werden. Teil 1 beschreibt hierfür ausführlich die Einflüsse auf den Wasserstoffeintrag (HE) in Schweißgüter. Weiters können in diesem aktuellen Teil Hinweise für Wasserstoffeinträge bei Anwendung diverser Stabelektrodentypen gefunden werden (Abbildung 14,15,16,18). Natürlich sei angemerkt, dass sich diese Werte Hersteller- und Elektrodendurchmesser bezogen teilweise erheblich unterscheiden können.

Für höhere Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperaturen ab 20 °C ist zusätzlich mit einem Elektroden- (Wasserstoffeintrag-) abhängigen erhöhtem diffusiblen Wasserstoff zu rechnen. Der entsprechende Faktor A kann, abgeleitet aus der Vielzahl an Versuchen, nach Gleichung 3 für unterschiedliche Elektroden eingeschätzt werden und erstreckt sich über einen relativ großen Bereich. Für optimierte basische Elektroden ist mit geringen zusätzlichen Wasserstoffgehalten zu rechnen. Für Schweißzusätze mit höheren Wasserstoffeinträgen, z. B. einer rutilen oder Zellulose Stabelektrode können aufgrund der größeren Konzentrationsunterschiede zwischen Schweißzusatz und Grundmaterial bei einer Temperaturerhöhung von 100 °C durchaus 10ml/100 g SG zusätzlich gemessen werden.

$$A = 0,0017 \times HE$$

Gleichung 3: Faktor A für die Berücksichtigung erhöhter Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperaturen – Abhängig vom (elektrodenabhängigen) Wasserstoffeintrag

Auch die Wasserstoffdiffusion bei Mehrlagen-(Raupen-) Schweißung ist wesentlich vom Wasserstoffeintrag (HEt) abhängig. Gleichung 4 kann hierfür als Einschätzung des so

genannten „Lagen-(Raupen-)exponenten“ (B) dienen und kennzeichnet den elektroden- und vorwärm- bzw. zwischenlagentemperaturabhängigen Faktor für die Wasserstoff-Effusion bei Schweißung mehrerer Lagen (Raupen), der im Wesentlichen durch die Konzentrationsunterschiede hervorgerufen wird.

$$B = -0,53 - 0,0031 \times HEt$$

Gleichung 4: Lagen-(Raupen-)Exponent B für die Berücksichtigung erhöhter Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperaturen und des schweißzusatzwerkstoffabhängigen Wasserstoffeintrags

Zusammenfassung

Teil 2 der Vortragsreihe zur Untersuchung des Gefahrenpotentials von Wasserstoff bei der Schweißung von unlegierten Stählen beschreibt die Wasserstoff-Effusion in Schweißverbindungen anhand von Messungen des diffusiblen Wasserstoffes. Besonderes Augenmerk wurde auf die Überleitung von theoretischen bekannten Grundlagen auf die praxisnahe Anwendung gelegt, um anhand von Beispielen eine Einschätzung der Wasserstoffeffusion bei Anwendung unterschiedlicher Stabelektrodentypen, Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperaturen, Abkühlzeiten und Raupenanzahl bei Mehrlagenschweißung treffen zu können.

Wesentlich für die Praxis erscheinen nachfolgende Punkte:

- Durch erhöhte Vorwärm- bzw. Zwischenlagentemperaturen werden in Abhängigkeit des verwendeten Schweißzusatzes unterschiedliche Wasserstoffmengen durch verbesserte Diffusionsbedingungen in die Schweißverbindung (umliegende Bereiche der geschweißten Naht) eingebracht.
- Die Wasserstoff-Effusion folgt den konzentrationsbedingten Unterschieden und demnach der eingebrachten Menge an Wasserstoff
- Erhöhte Vorwärm- und Zwischenlagentemperaturen sind somit nur bedingt zur Erreichung niedrigerer resultierender Wasserstoffgehalte geeignet.
- Geringste Wasserstoffwerte bzw. Wasserstoffschäden können durch den Einsatz von speziell optimierten basischen Elektroden (vgl. Teil 1) erzielt werden.

TEIL 3

Untersuchung der Wasserstoffrisanfälligkeit von Mehrlagen-Schweißverbindungen mit dem „BEAD BEND TEST“ Untersuchungsmethode und Beispiele

M. Fiedler, H. Königshofer, J. Fischer, G. Posch, W. Berger
Böhler Schweißtechnik Austria GmbH, Kapfenberg, Austria

Im Teil 3 dieser Veröffentlichung behandeln wir die Untersuchungsmethoden und zeigen anhand von Beispielen wie durch korrekte Anwendungen die Risiken minimiert werden können [1, 2]. Wasserstoffbedingte Risse treten in der Wärme-Einfluss-Zone (WEZ) primär als Längsrisse auf und sind als Unternahtrisse bekannt. Speziell bei hochfesten Verbindungen können aber auch in Schweißgütern Wasserstoffrisse in Form von Spröbruchflecken in Zugproben oder Rissen bei Betrachtung eines Längsschliffes der geschweißten Naht festgestellt werden [17]. Abbildung 20 zeigt das Erscheinungsbild von Wasserstoffschädigungen im Schweißgut in Quer- und Längsrichtung zur Schweißrichtung. Im Bild ist auch das bevorzugte Auftreten dieser Schädigungen im oberen Drittel von V-Naht-Verbindungen zu erkennen, das durch den örtlich erhöhten Zugspannungszustand und den dadurch hohen eingelagerten Wasserstoffanteil begründet ist.

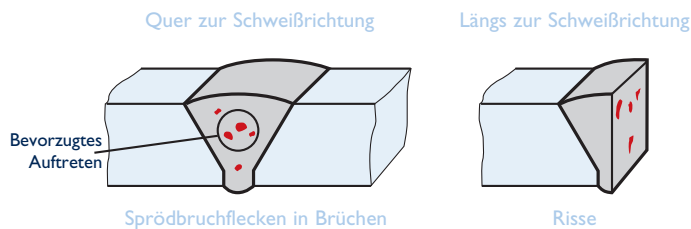


Abbildung 20: Erscheinungsbild von Wasserstoffschädigungen im Schweißgut

Da es in Schweißverbindungen, sowohl im Grundwerkstoff als auch in der Schweißnaht, zu einem erhöhten Gefahrenpotential durch diese sogenannten „Wasserstoffinduzierten Risse“ kommt, wurden von verschiedensten Institutionen besondere Anstrengungen in die Prüfung dieser Risse gelegt. Es haben sich daraufhin im Laufe der Zeit sehr viele verschiedene Prüftests entwickelt, die weltweit im Einsatz sind. Diese Prüfungen können grob in Tests mit „fremdbelasteter“ Probe, als Beispiel sei der IMPLANT-Test genannt, oder in Prüfungen mit „eigenbelasteter“ Probe unterteilt werden [18-21]. Als Prüfungen mit eigenbelasteter Probe können folgende Tests genannt werden [18,22-27]:

- TEKKEN-
- U-GROOVE WELD CRACKING- / LEGHIGH-
- CTS- (Controlled Thermal Severity)
- RRC- (Rigid Restraint Cracking) / IRC- (Instrumented Restraint Cracking)
- GBOP- (Gapped Bead-On-Plate)
- RGW-

- CRUCIFORM-
- WIC- (Welding Institute of Canada)
- TRC- (Tensile Restraint Cracking) Test.

Eigenbelastete Tests haben im Allgemeinen den Vorteil, praxisnähere Situationen wiederzuspiegeln, wobei aber eine Umlegung der erzielten Ergebnisse auf die tatsächliche Schweißung nur bedingt möglich ist. Um eine vollkommene Gleichwertigkeit der Testmethode mit in der Praxis erstellten Schweißnähten zu erreichen, müssten identische Verbindungs- bzw. Probennähte hergestellt werden [23]. Um diesen Umstand gerecht zu werden, hat sich BÖHLER Schweißtechnik Austria bemüht, eine Prüfmethode zu entwickeln, die möglichst für praxisnahe Bedingungen umlegbare Ergebnisse für die Prüfung kritischer Schweißverbindungen liefert. Dieser Test wird nachfolgend beschrieben, und aus der Reihe der zahlreichen Untersuchungen werden zwei Beispiele exemplarisch gezeigt.

Untersuchungsmethode – „Bead bend Test“

Beim „BEAD BEND TEST“ handelt es sich um eine Untersuchungsmethode für die Bestimmung der Wasserstoffrissempfindlichkeit von Schweißverbindungen. Hauptaugenmerk wurde dabei auf eine möglichst einfache, aber dennoch umfassende Prüfung von Schweißnähten bei Anwendung verschiedenster in der Praxis vorkommender Bedingungen gelegt. Entwickelt wurde dieser Test ursprünglich für Vergleichsuntersuchungen bei der Schweißung von Rohrrundnähten im Pipelinebau. Aus diesen Erfahrungen wurde dann eine allgemeine Testprozedur für die Untersuchung wasserstoffinduzierter Risse generiert.

Abbildung 21 zeigt den Aufbau für die Schweißung der Prüfverbindungen und die üblicherweise verwendeten Probenabmessungen. Für die Prüfung werden Bleche des Grundmaterials auf einer steifen Unterlagsplatte, die ca. die 4-fache Dicke der Bleche aufweisen soll, befestigt.

Da der Bead bend Test dem RRC- bzw. IRC Test insofern ähnelt, als auch hier „selbstverspannte“ Proben verwendet werden, kann die Belastung der Schweißnaht durch die Verspannungslänge gesteuert werden. Als Verspannungslänge ist der Abstand der Schweißnaht bis zur Einspannung des Grundmaterials definiert.

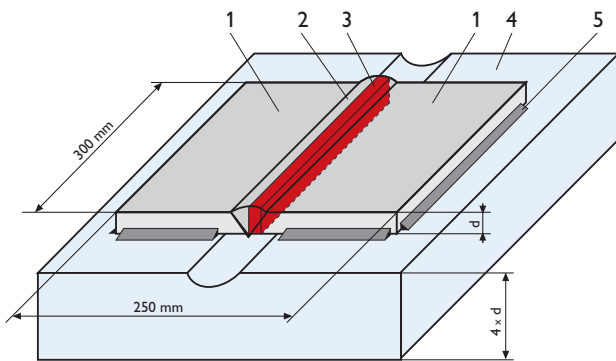


Abbildung 21: Prüfungsaufbau: 1...Grundmaterial, 2...Schweißnaht, 3... Prüfstück, 4... steife Grundplatte, 5... Ankernähte; d... Prüfstückdicke (Dicke des Grundmaterials)

In Abbildung 22 sind Einspannungsmöglichkeiten, die für praktische Prüfungen interessant erscheinen, dargestellt. Bei der ersten Einspannungsart (Variante A) werden die Bleche mittels Ankernähten an die Grundplatte geschweißt. Dadurch

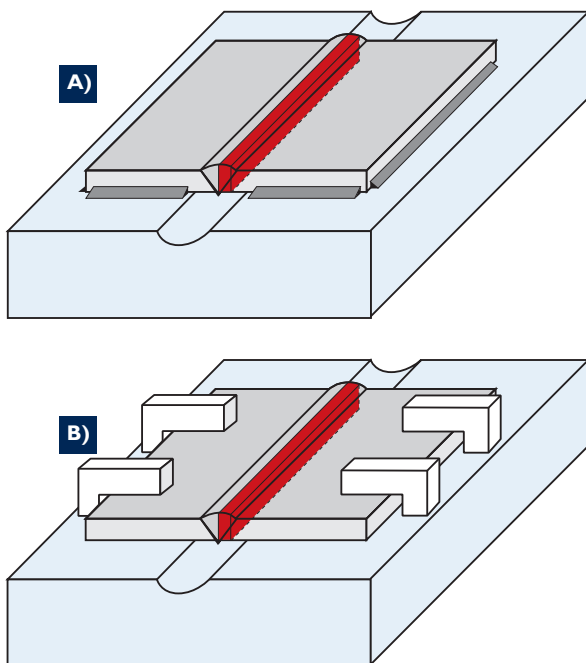


Abbildung 22: unterschiedliche Einspannungsvarianten beim Bead bend Test; A...vollkommene Behinderung der Quer- und Winkelschrumpfung, B...Schrumpfung quer zur Schweißrichtung möglich – Winkelschrumpfung verhindert

ergibt sich eine kurze Verspannungslänge, die hohe Spannungen in die Schweißnaht induziert. Die zweite Möglichkeit (Variante B) unterscheidet sich von dieser strikten Einspannung durch das Zulassen einer Schrumpfung der Bleche in Querrichtung zur Schweißnaht. Winkelschrumpfungen, die vor allem bei V-Naht-Verbindungen auftreten, werden jedoch verhindert. Diese Variante wird vor allem für Untersuchungen verwendet, bei denen Quer-Schrumpfungen des Schweißgutes

zugelassen werden können. Diese Belastungssituation tritt typischerweise bei der Rohrrundnahtschweißung im Pipelinebau auf. Nach der Einspannung der Bleche kann die Schweißung mit praxisnahen Parametern durchgeführt werden. Um auch den Effekt der verzögerten Rissbildung, die in Lit. [1, 28] sehr gut beschrieben wird, Rechnung zu tragen, erfolgt die Extraktion des Prüfstückes von der Grundplatte erst ca. 24 Stunden nach dem Schweißende. Aus der geschweißten Verbindung wird dabei das Prüfstück herausgearbeitet und an der Prüffläche feingeschliffen. Abbildung 23 zeigt das Prüfstück, bei der die Probendicke Y mit 10 mm konstant gehalten wird und X der Dicke der Verbindungsnaht entspricht. Als Prüffläche dient generell die Längsquerschnittsfläche der Schweißnaht aus der Nahtmitte, da in diesem Bereich die lokalen Spannungen nach J. B. Roelens am höchsten sind und mit der höchsten Rissanfälligkeit zu rechnen ist (Abbildung 24).

Um die in der Schweißnaht entstandenen Wasserstoff-induzierten Risse sichtbar zu machen, wird das Prüfstück durch Biegung verformt. Dabei werden die Mikrorisse aufgeweitet und erreichen eine für den Betrachter sichtbare Größe für die nachfolgende Beurteilung der Proben. In diesem Zusammenhang ist es besonders wichtig, die Prüfstücke vor dem Biegen einer Wärmebehandlung zur Wasserstoffeffusion bei $250\text{ °C} / 16$ Stunden zu unterziehen. Dadurch wird die Mikro-rissbildung, die während bzw. nach der Schweißung auftritt, nicht durch eine Fischaugenbildung während der Prüfung (Biegung) überlagert. Durch die Wärmebehandlung kann der eingelagerte Wasserstoff effundieren, sodass dieser nicht durch die Biegebeanspruchung aktiviert wird und eine Fischaugenbildung bei der Prüfung verursacht. Abbildung 25 zeigt die Biegevorrichtung mit einem moderaten Biegeradius von 90 mm. Die relativ große Prüffläche erlaubt auch bei der Prüfung nur eines Teststückes pro Parametereinstellung eine gute Aussagefähigkeit über die Rissanfälligkeit. Abbildung 26 zeigt die Prüfoberflächen samt Rissen von geprüften Schweißnähten.

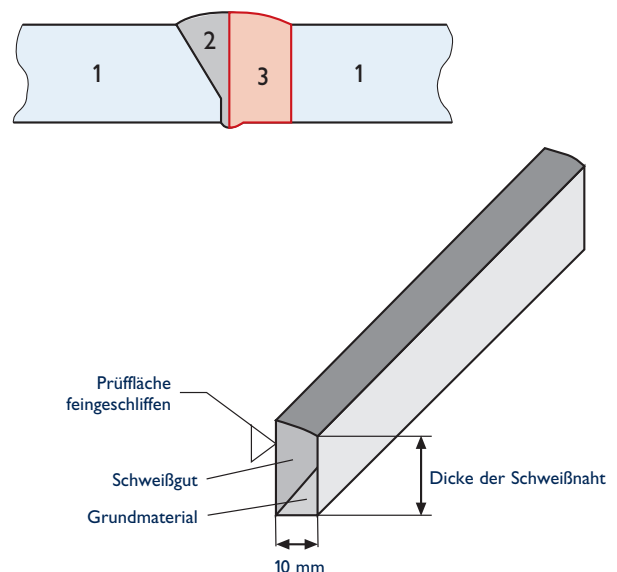


Abbildung 23: von der Schweißverbindung extrahiertes Prüfstück; 1...Grundmaterial, 2...Schweißnaht, 3...Prüfstück

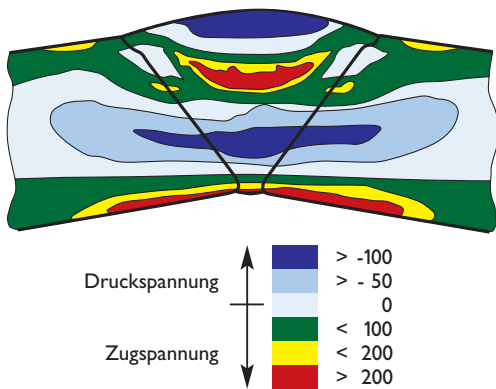


Abbildung 24: Spannungsverteilung in einer V-Nahtverbindung nach J.B. Roelens bei behinderter Quer- und Winkelschrumpfung (Werte in MPa)

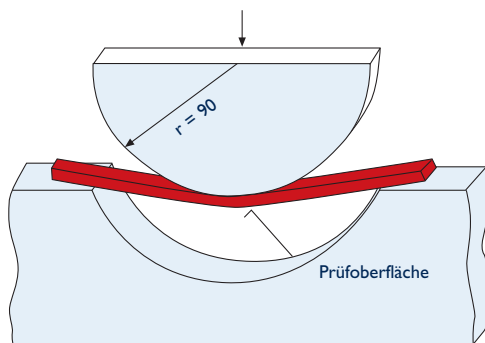


Abbildung 25: Biegevorrichtung des Bead bend Tests



Abbildung 26: gebogene Prüfstücke mit aufgeweiteten Rissen

Durch die einfache und billige Anwendung dieses Tests eignet er sich besonders gut für die Forschung und Entwicklung von hochfesten und wasserstoffbeladenen Schweißgütern. Die praxisnahe Anwendung macht diesen Test überdies für Vergleichsuntersuchungen interessant, da auch Kombinations-schweißungen mit unterschiedlichen Elektrodentypen, wie z. B. Verbindungsschweißungen mit Zellulose- und basischen Fallnaht-Elektroden, getestet werden können.

BEISPIEL 1: Ermittlung der erforderlichen Zwischenlagentemperatur für Zellulose-Schweißgutverbindungen

Zelluloseumhüllte Elektroden werden hauptsächlich für wirtschaftliche Rohrrundnahtschweißungen im Pipelinebau verwendet. Der Böhler-Name dieser Elektroden leitet sich aus dem Hüllenaufbau ab, der zu einem hohen Anteil aus organischen Materialien (Zellulose) besteht. Durch den speziellen Hüllenaufbau kommt es zu einem hohen Wasserstoffeintrag ins Schweißgut, der bei ca. 40-50 ml/100 g Schweißgut nach AWS A 4.3 liegt. Dieser hohe Wasserstoffeintrag macht ein Vorwärmen und die Einhaltung einer entsprechenden Zwischenlagentemperatur bei der Verschweißung dieses Elektrodentyps unerlässlich.

In einer Versuchsreihe wurde mit Hilfe des Bead bend Tests für Zelloseschweißgüter die Mindest-Zwischenlagentemperatur zur Erreichung rissfreier Schweißnähte ermittelt. Die Untersuchung zielte dabei auf praxisnahe Schweißprozeduren mit verschiedenen Rohrwandstärken und Schweißgütfestigkeiten ab. Überprüft wurden folgende Elektrodentypen

- E 6010 (BÖHLER FOX CEL)
- E 7010 (BÖHLER FOX CEL 75, BÖHLER FOX CEL 70-P)
- E 8010 (BÖHLER FOX CEL 85, BÖHLER FOX CEL 80-P)
- E 9010 (BÖHLER FOX CEL 90)

Für die Untersuchung wurden Rohrstähle mit Wandstärken von 5, 10, 15, 20 und 25 mm verwendet. Die Schweißnahtvorbereitung ist in Abbildung 27 gezeigt. Als Einspannvariante für die Prüfplattenschweißung wurde Variante A (vgl. Abbildung 22) gewählt. Die Schweißung der Wurzel- und Hotpasslage erfolgte mit \varnothing 4 mm Elektroden, für die Füll- und Decklagen wurden \varnothing 5 mm Elektroden verwendet.

Die Erprobungen erfolgten bei Zwischenlagentemperaturen von +20, 50, 80, 100, 120 und 140 °C und wurden jeweils an 5, 10, 15, 20 und 25 mm dicken Blechen durchgeführt, sodass zur Ermittlung der Mindest-Temperatur in Abhängigkeit der Rohrwandstärke insgesamt 30 Versuche geschweißt wurden.

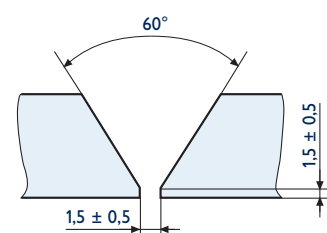


Abbildung 27: Schweißnahtvorbereitung bei Schweißung mit Zellulose-Elektroden

Abbildung 28 zeigt die Rissauswertung der Bead bend Test-Prüfstücke für die höchstfeste Elektroden E 9010 mit 3 verschiedenen Zwischenlagentemperaturen (20 °C, 80 °C und 120 °C) einer 15 mm Verbindungsnaht. Es ist zu erkennen, dass bei Schweißung mit 120 °C keine Risse an der gebogenen Probe entstehen. Bei 80 °C sind bereits einige Risse sichtbar, die bei einer Zwischenlagentemperatur von 20 °C in hohem Maß auftreten.

Zwischenlagen-Temperatur | Böhler Fox CEL 90 (AWSE 9010/EN E50C), Schweißposition: PG
Rohrwandstärke: 15 mm

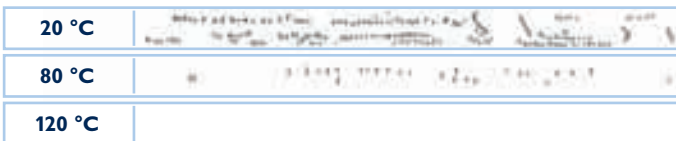


Abbildung 28: Prüfoberflächen mit Rissen in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur bei 15 mm dicken Schweißnähten – verwendete Elektrode: AWS E 9010

Elektrode Fox CEL 90 (AWSE 9010/EN E50C)

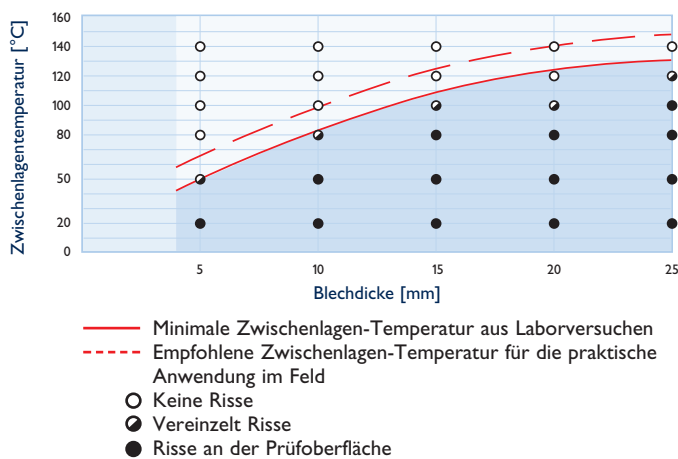


Abbildung 29: Wasserstoff induzierte Risse in Abhängigkeit der Zwischenlagentemperatur und Rohrwandstärke bei der Verwendung von BÖHLER FOX CEL-90 Elektroden.

Empfohlene Zwischenlagentemperatur für Zelloschweißgüter in Abhängigkeit der Schweißgutfestigkeit und Verbindungsdicke. Bead bend Test: behinderte Quer- und Längsschrumpfung

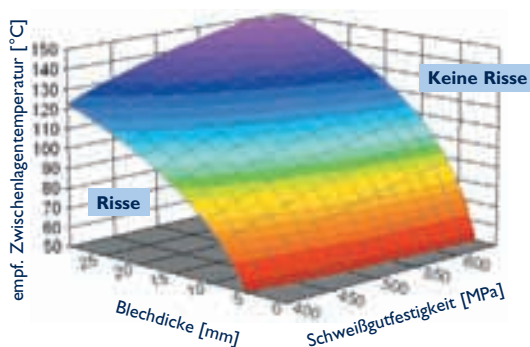


Abbildung 30: empfohlene Zwischenlagentemperatur für die Erstellung rissfreier Verbindungen (gültig für Zellose-Elektroden)

In Abbildung 29 wird der Zusammenhang der Rissbildung in Abhängigkeit der Blechdicke für die Elektroden der Festigkeitsstufe E 9010 gezeigt. Die minimale Zwischenlagentemperatur ist knapp oberhalb jener Temperatur festgelegt, bei der eine geringfügige Rissbildung an der Prüffläche entsteht. Für eine vollkommen rissfreie Verbindungsnaht sollte als Sicherheitsreserve statt der Minimaltemperatur eine um 20 °C höhere Temperatur gewählt werden. Abbildung 30 zeigt die Zwischenlagentemperatur in Abhängigkeit von Schweißgutfestigkeit und Rohrwandstärke zur Erzielung vollkommen rissfreier Verbindungen mit Zellulose Elektroden. Aus diesem Diagramm kann für die Empfehlung der Zwischenlagentemperatur folgende Gleichung abgeleitet werden:

$$\text{empf. ZLT} = 58 + 42 \times \ln(s) - \frac{31413}{R_{\text{eh, Schweißgut}}}$$

Gleichung 5:

empf. ZLT...empfohlene Zwischenlagentemperatur in °C
s...Dicke der Schweißnaht in mm

Reh,Schweißgut...Streckgrenze des Schweißgutes in N/mm²

Der diffusible Wasserstoffgehalt wurde in der Gleichung 5 nicht berücksichtigt, da er für die Schweißung mit Zellulose-Elektroden allgemein sehr hoch liegt und auch nicht durch Behandlung der Elektroden veränderbar ist. So wird der Wasserstoffeintrag in das Schweißgut nicht wesentlich durch eine Auslagerung bzw. Schweißung der Elektroden bei feuchtem Klima erhöht. Er kann aber auch nicht verringert werden, da eine Rücktrocknung der Elektroden nicht erlaubt ist.

BEISPIEL 2: Rissanfälligkeit in Abhängigkeit des diffusiblen Wasserstoffgehaltes und der Schweißgutfestigkeit bei der kombinierten Anwendung von Zellulose- und basischen Fallnaht-Elektroden

In Beispiel 2 wird auf eine sehr praxisnahe Anwendung der Verbindungsschweißung im Pipelinebau eingegangen. Es handelt sich dabei um die kombinierte Anwendung von Elektroden verschiedenen Umhüllungstyps. Für die Wurzel- und in der Regel auch für die Hotpass-Schweißung der Rohrrundnähte werden Zellulose-Elektroden verwendet, die bei der Pipeline-Errichtung eine hohe Vorbauleistung durch die hohen Schweißgeschwindigkeiten gewährleisten. Für die Schweißung der Füll- und Decklagen kommen wegen des geringeren Wasserstoffgehaltes und der allgemein höheren Zähigkeiten des Schweißgutes basische Fallnahtelektroden zur Anwendung. Um den Einfluss der Schweißgutfestigkeit in Kombination mit dem diffusiblen Wasserstoffgehalt auf die Wasserstoff-Rissanfälligkeit dieser Verbindungsart zu testen, wurden im Labor durch eine einfache Mn-Legierung basische Elektroden mit 7 verschiedenen Festigkeitsstufen (Festigkeitsklasse 1-7) erzeugt. Die Streckgrenzen der einzelnen Schweißgüter wurden dabei zwischen 670 und 814 N/mm² eingestellt. Zur Einstellung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes wurden die

basischen Elektroden pro Festigkeitsstufe in 3 Gruppen (I-III) eingeteilt. Jede Gruppe wurde im Klimaschrank bei 80 % relativer Luftfeuchtigkeit und 27 °C ausgelagert. Durch verschiedene Auslagerungszeiten wurde der diffusible Wasserstoffgehalt nach AWS A 4.3 unterschiedlich eingestellt (Tabelle 1).

| Wasserstoffgruppe | Diffusibler Wasserstoffgehalt pro 100 g Schweißgut |
|-------------------|--|
| Gruppe I | 6 |
| Gruppe II | 9 |
| Gruppe III | 12 |

Tabelle 1: diffusibler Wasserstoffgehalt des reinen Schweißgutes nach AWS A 4.3. für die basischen Elektroden der Festigkeitsklassen 1-7

In Summe umfasste diese Untersuchung somit 21 verschiedene Zustände, die durch 7 Festigkeitsklassen und 3 Wasserstoffgruppen erreicht wurden. Mit diesen Elektroden wurden die Füll- und Decklagen der Verbindung geschweißt. Für die Untersuchung wurde als Grundmaterial der Pipelinestahl X80 nach API 5L mit einer Streckgrenze von mindestens 550 N/mm² verwendet. Die Blechdicke wurde mit 18,3 mm konstant gehalten. Die Schweißung erfolgte in Position PA (waagrecht). Als Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur kamen 100 °C zur Anwendung. Es wurde Einspannvariante B nach Abbildung 22 gewählt, da eine Schrumpfung quer zur Schweißnaht bei der Rohrverbindungsschweißung üblich ist und deswegen zugelassen werden kann. Abbildung 31 zeigt den Lagenaufbau der Verbindungsschweißung.

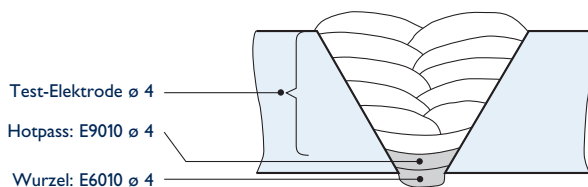


Abbildung 31: gewählter Lagenaufbau bei der kombinierten Schweißung mit Zellulose- und basischen Fallnaht-Test-Elektroden

Wasserstoff-Rissanfälligkeit in Abhängigkeit der Schweißgutfestigkeit und des diffusiblen Wasserstoffgehaltes bei Anwendung der Kombinationsmethode. Bead Bend Test: freie Querschrumpfung; Stahltype: X80; ZLT: 100 °C; Wurzellage: E 6010; Hotpass: E 9010; Füll- und Decklagen: Basische Elektroden unterschiedlicher Hüllenfeuchtigkeit und Festigkeit

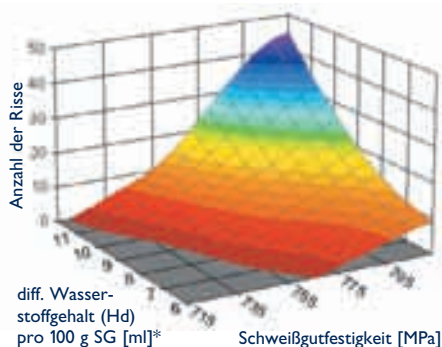


Abbildung 32: Wasserstoff-Rissanfälligkeit bei kombinierter Schweißung mit Zellulose- und basischen Fallnahtelektroden*

* der diffusibler Wasserstoffgehalt bezieht sich auf die Schweißgüter der basischen Fallnahtelektroden und wurde mit der Normprüfmethode nach AWS A 4.3. gemessen

Abbildung 32 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse des Bead bend Tests. Der Wasserstoffgehalt im Verbindungsschweißgut wird trotz Schweißung der Wurzel- und Hotpasslage mit Zelluloseelektroden durch die rasche Effusion des Wasserstoffes wesentlich geringer ausfallen als durch die Normmessung angegeben. Es soll aber hier auf den grundsätzlichen Zusammenhang von Festigkeit des Schweißgutes und Wasserstoffgehalt hingewiesen werden. Weiters erscheint diese Darstellungsart für die praktische Anwendung interessanter, da es einfacher ist, Elektroden mit normierten Wasserstofftests zu prüfen, als den Wasserstoffgehalt der Verbindungsnaht zu messen. Außerdem können auch durch den Schweißzusatzhersteller diffusible Wasserstoffwerte bei Schweißung der Elektroden bei bestimmtem Klima und Auslagerungszustand prognostiziert werden. Es zeigt sich, dass durch den höheren Feuchtigkeitsgehalt in den Elektrodenumhüllungen und das dadurch entstehende höhere Wasserstoffangebot im Schweißgut die Gefahr von wasserstoffinduzierten Rissen wesentlich zunimmt. Weiters ist auch erkennbar, dass bei Erhöhung der Schweißgutfestigkeit besonderes Augenmerk auf den Gebrauch von Elektroden mit möglichst geringen Wasserstoffgehalten, gelegt werden soll.

Zusammenfassung

1. Für möglichst genaue Prognosen über die Wasserstoffrisanfälligkeit von Schweißverbindungen ist es nötig, Testverfahren zu entwickeln, die die Überprüfung praxisnaher Verbindungen erlauben. Dazu müssen einfache, aber dennoch aussagefähige Prüfmethode generiert werden. Mit dem Bead bend Test können diese Kriterien für die Prüfung der Schweißgüter erfüllt werden. Es ist für viele Anwendungen möglich, identische Prüfungsschweißungen herzustellen und diese in Bezug auf ihre Wasserstoff-Rissanfälligkeit zu beurteilen.
2. Die Verspannungsintensität kann durch Einspannungsvarianten geändert werden. Es kann eine feste Einspannung für theoretische Höchstbeanspruchungen verwendet werden. Es ist aber auch möglich, praxisgerechte Beanspruchungssituationen nachzubilden.
3. Der Bead bend Test besitzt durch die relativ große Prüffläche eine gute Aussagekraft.
4. Für die Pipelineschweißung mit Zellulose-Elektroden wurde mit Hilfe des Bead bend Tests die Wasserstoffris-Anfälligkeit in Abhängigkeit der Schweißgutfestigkeit und der Verbindungsdicke (Rohrwanddicke) ermittelt. Dadurch war es möglich, Empfehlungen für die anzuwendende Zwischenlagentemperatur zu geben.
5. Im modernen Pipelinebau wird vielfach die Kombinationsmethode mit Zellulose-Elektroden für die Wurzel- und Hotpasslage, sowie basischen Elektroden für die Füll- und Decklagen angewendet. Mit dem Bead bend Test ist es möglich, diese Verbindungsart auf Wasserstoffrissempfindlichkeit zu testen. Durch Änderung verschiedener Parameter in der Herstellung dieser Verbindungen, wie z. B. der Feuchtigkeitsgehalt der Elektrodenumhüllungen ändert sich die Rissanfälligkeit des Schweißguts.

6. Durch Erhöhung des Wasserstoffangebotes bei der Schweißung und Steigerung der Schweißgutfestigkeit nimmt die Rissanfälligkeit zu.
7. Die Wasserstoffrisanfälligkeit steigt bei Erhöhung der Verbindungsstärke durch den ungünstigeren Spannungsverlauf in der Schweißnaht.

Literatur

1. G. Gnirß. Hydrogen during welding. Part 1. TÜ 17 (1976), No. 11, S. 367ff
2. G. Gnirß. Wasserstoff und seine Wirkung beim Schweißen. Teil 2. TÜ 17 (1976), No. 11, S. 414 ff
3. Feuchteresistente basischumhüllte Stabelektroden. DVS Merkblatt 0944, Jänner 1995
4. G. Dickehut. Voraussage des Wasserstoffgehalts im Schweißgut beim Lichtbogenhandschweißen mit Stabelektroden unter Berücksichtigung der Luftfeuchtigkeit. Dr.-Ing.-Dissertation, TU Braunschweig, 1987
5. G. Dickehut; U. Hotz. Effect of climatic Conditions on diffusible hydrogen content in weld metal. Welding Journal, January 1991; S. 1-s – 6-s.
6. B. Chew. Moisture loss and regain by some basic flux covered electrodes. Welding Journal No. 55 (1976). H.5, S. 127-s – 134-s
7. McKoeown. Hydrogen and its control in weld metal. Metal constr. No. 17 (1985), H. 10, S. 655-661
8. Standard methods for determination of the diffusible hydrogen content of martensitic, bainitic and ferritic steel weld metal, produced by arc welding. ANSI/AWS A4.3-93
9. Bestimmung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes im ferritischen Schweißgut aus Stahl. EN ISO 3690
10. Stephen Liu. Recent Approaches in the Design of Flux-Related Arc Welding Consumables. Center for Welding, Joining and Coatings Research, Colorado School of Mines
11. V. Sarrak. Hydrogen embrittlement and microstructure of steel. Materials Science and heat treatment of metals, 1982, 5, 11-17
12. B.T. Alexandrov. Hydrogen behaviour in welded joints and evaluation of its rule for cold cracking. Part 1, Mathematical modelling of welding phenomena, No. 7, 2005, 781-804
13. V. Musiachenko and B. Kasatkin. Distribution of hydrogen in welded joints of alloy steels and its influence on cold cracking. Automat. Svarka, 1985, 9, 3-8
14. F. Choe. Welding steels without hydrogen cracking, TWI, London, 1973
15. E. Rieke et al. Influence of microstructure of iron and steels on steady state hydrogen permeation. Hydrogen effects in metals, The Metallurgical Society of AIME, 1981, 97-104
16. J. Moreton, F. Choe und t. Boniszewski. Hydrogen movement in weld metals. Metal Construction and British welding journal, 1971, 6, 223-228
17. E. Perteneder, H. Königshofer, R. Bischof. Capabilities and limitations of modern welding consumables suitable for girth welding of pipelines – a producers perspective. 3rd international pipeline technology conference, Brugge, Belgien, May 21-24.2000.
18. IIW- Doc. No II-1513-03. Cold cracking tests.
19. H. Granjon. Information on cracking tests. IIS/IIW- 93- 62
20. IIW- Doc. No IX-1240-82. Cold cracking test methods using Implants
21. IIW- Doc. IX-1729-94. The investigation of implant cold cracking test
22. Pedder et al. CTS testing procedures: the present position. The welding institute research Bulletin, Sept. 1975
23. Satoh et al. Japanese studies on structural restraint severity in relation to weld cracking. Welding in the world 15 (1977), No. 7/8, pp. 155 ff
24. H. Hoffmeister. Concept and procedure description of the IRC-test for assessing HACC. Steel Research (AEW), Vol. 57 (1986), No. 7, pp 344 ff
25. British Standard (BS) 7363, 1990. Controlled thermal severity (CTS) test and bead-on-plate (BOP) test for welds
26. A.P. Chakravarti, S.R. Bala. Evaluation of weld metal cold cracking using the GBOP test. Welding Journal Vol. 68 (1989), p. 1s-8s.
27. JIS Z 3157, 1993. Method of U-groove weld cracking test.
28. A.R. Troiano. The role of hydrogen and other interstitials in the mechanical behaviour of metals. Edward de Mille Campbell Memorial Lecture (1977) p. 54-79.

Editorial

M. Fiedler ist Abteilungsleiter für Forschung und Entwicklung.

D. Schafzahl ist Entwicklungsingenieur für unlegierte Schweißzusätze.

J. Fischer ist Schweißwerkmeister und Spezialist für die Verschweißung von Pipelineelektroden und Messung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes in Schweißgütern.

G. Posch ist Abteilungsleiter für Schweißtechnologie und Qualitätsmanagement.

W. Berger ist Managing Director der Böhler Schweißtechnik Austria GmbH und Schweißtechnologie.

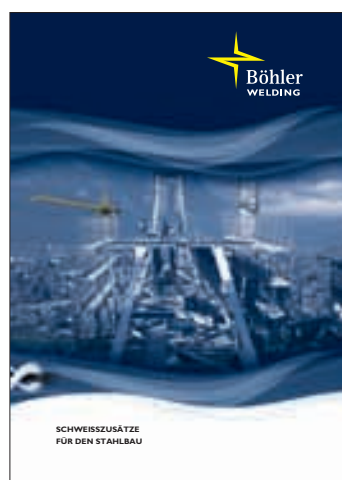
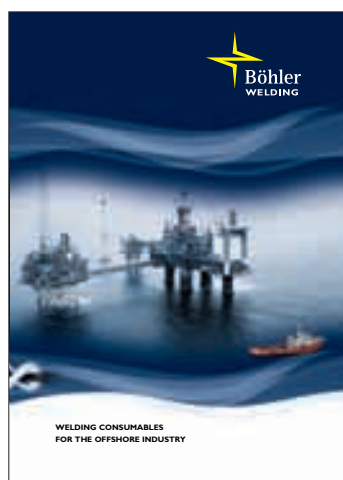
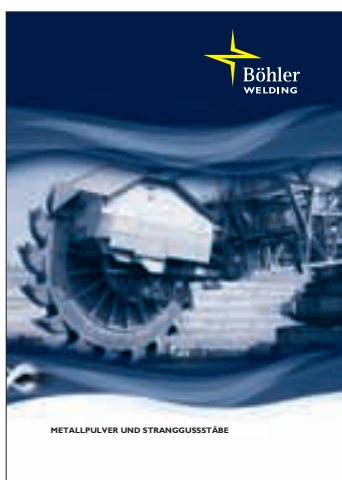
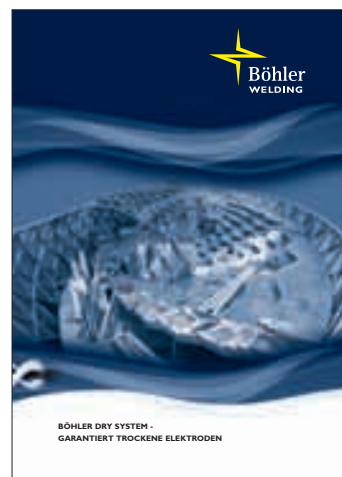
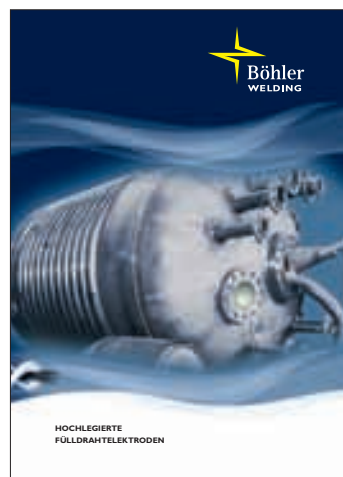
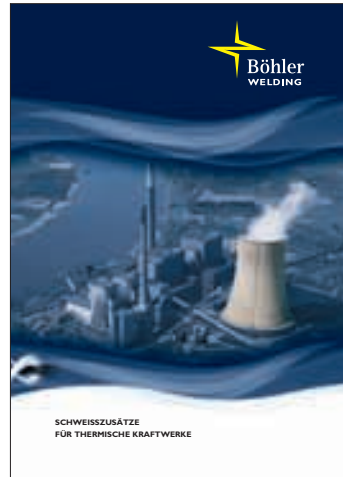
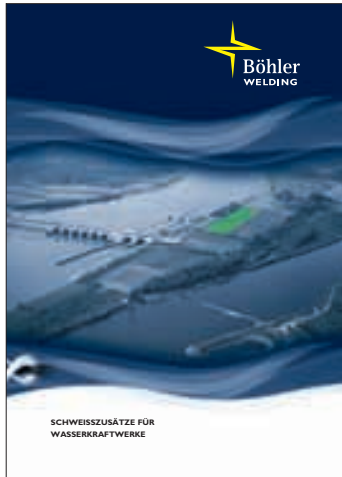
Ch. Strauss ist Schweißwerkmeister und Spezialist für die Verschweißung von Stabelektroden und Messung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes in Schweißgütern.

Danksagung

Besonderer Dank sei allen Mitarbeitern im Schweißlabor der Firma Böhler Schweißtechnik Austria für die freundliche Unterstützung zur Erstellung dieser Arbeit ausgesprochen.

Weitere Broschüren über BÖHLER WELDING Schweißzusätze für ausgewählte Industrien sind in mehreren Sprachversionen verfügbar.

Nähere Informationen erhalten Sie bei den BÖHLER WELDING Vertriebspartnern oder im Internet unter www.boehler-welding.com



Die Angaben zur Art und Anwendung unserer Produkte dienen lediglich der Information des Anwenders. Die Daten zu den mechanischen Eigenschaften beziehen sich immer auf das reine Schweißgut unter Beachtung der geltenden Normen. In der Schweißverbindung werden die Schweißguteigenschaften u.a. vom Grundwerkstoff, der Schweißposition und den Schweißparameter beeinflusst. Eine Garantie für die Eignung für eine bestimmte Art der Anwendung erfordert in jedem einzelnen Fall eine ausdrückliche schriftliche Vereinbarung.

Änderungen vorbehalten.

Herausgegeben von BÖHLER WELDING

Böhler Schweißtechnik Austria GmbH

Böhler-Welding-St. 1

8605 Kapfenberg / AUSTRIA

☎ +43 (0) 3862-301-0

☎ +43 (0) 3862-301-95193

✉ postmaster.bsga@bsga.at

www.boehler-welding.com

Ihr Partner:

www.boehler-welding.com