

EMPFEHLUNGEN ZUM VORWÄRMEN BEIM LICHTBOGENSCHWEISSEN VON UN- UND NIEDRIGLEGIERTEN STÄHLEN

DIN EN 1011, Teil 2: Bestimmungsmethoden im Vergleich

Ulrich Killing, Nerdlen

Das Einstellen geeigneter Vorwärmtemperaturen ist wesentlich zum Erzielen hochwertiger Schweißnähte. In der täglichen Praxis wird hier viel Erfahrungswissen genutzt. Die in der DIN EN 1011-2 beschriebenen vier Methoden ermöglichen ein genormtes Vorgehen zur Bestimmung von Anhaltswerten für Vorwärmtemperaturen. Der folgende Beitrag beschreibt, ob und wann solch eine Vorgehensweise Sinn macht.

Die Qualitätsanforderungen für Schweißnähte an Druckgeräten sind in zahlreichen technischen Regelwerken beschrieben. Für den Bereich der Bundesrepublik Deutschland sind hierbei die Druckgeräterichtlinie DGRL sowie die Herstellvorschriften der AD2000-Merkblätter bzw. der EN-Normen 13445 für unbeheizte Druckbehälter oder der EN 13480 für metallische, industrielle Rohrleitungen maßgebend. Druckgeräte, die in kerntechnischen Anlagen eingesetzt werden, unterliegen zusätzlich noch dem KTA-Regelwerk. Weltweit spielt das amerikanische ASME-Regelwerk eine dominierende Rolle beim Bau von Druckgeräten. Darüber hinaus haben zahlreiche

Betreiber von Druckgeräten eigene Anforderungen, die vielfach gegenüber den genannten Regelwerken verschärfte Qualitätsmerkmale beinhalten.

Das Herstellen von Lichtbogenschweißverbindungen mit den in den verschiedenen Regelwerken geforderten Qualitätsmerkmalen gelingt dabei nur, wenn die einzelnen Schweißparameter optimal aufeinander abgestimmt sind. Im Wesentlichen gilt dies für die Schweißnahtvorbereitung, die Auswahl geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe, das Heftschiessen, das Vorwärmen, die eingestellten Schweißparameter (Wärmeeinbringen), die Schweißfolge und gegebenenfalls

eine notwendige Wärmenachbehandlung der Schweißnähte. In diesem Beitrag soll vorzugsweise auf die richtige Wahl der Vorwärmtemperatur eingegangen werden.

Warum un- und niedriglegierte Stähle vorwärmen?

Beim Schweißen von un- und niedriglegierten Stählen besteht die Gefahr einer Aufhärtung in der Wärmeeinflusszone (WEZ), womit die Gefahr einer Rissbildung in dieser Gefügezone einhergeht. Dabei ist die Aufhärtungsgefahr in erster Linie abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffs bzw. des Schweißguts bei mehrlagigen Schweißverbindungen sowie von der Abkühlungsgeschwindigkeit des Bauteils. Letzterer Parameter wird hauptsächlich von der Wanddicke der zu verschweißenden Komponente sowie durch das Wärmeeinbringen beeinflusst.

Ein bewährtes Mittel zur Veränderung der Abkühlgeschwindigkeit beim Schweißen ist das Vorwärmen des Bauteils. Dabei wird unter Vorwärmen ein Erwärmen verstanden, bei dem der Grundwerkstoff vor Beginn des Schweißens auf eine bestimmte Temperatur gebracht und diese Temperatur im Allgemeinen auch während des Schweißens gehalten wird. Der Unterschied zwischen Schweißwärme und Werkstücktemperatur (Temperaturgefälle) bestimmt dabei die Geschwindigkeit der Wärmeableitung (Abkühlgeschwindigkeit) [1]. Je langsamer die Abkühlgeschwindigkeit ist, desto geringer ist die Gefahr einer Aufhärtung in der WEZ. Allerdings darf nicht unerwähnt bleiben, dass die Notwendigkeit einer Vorwärmung ebenfalls von der chemischen

▼ Tabelle 1. Notwendige Parameter zur Ermittlung einer Mindestvorwärmtemperatur nach DIN EN 1011-2

Methode A	Methode B
Kohlenstoffäquivalent CE $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	Kohlenstoffäquivalent CET $CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$
Wärmeeinbringen $WE [kJ/mm] = U \times I/v_s$ U = Lichtbogenspannung (V), I = Schweißstrom (A), v_s = Schweißgeschwindigkeit (mm/min)	Wärmeeinbringen $WE [kJ/mm] = U \times I/v_s$ U = Lichtbogenspannung (V), I = Schweißstrom (A), v_s = Schweißgeschwindigkeit (mm/min)
Wasserstoffwert (siehe Tabelle 2)	Wasserstoffgehalt HD im Schweißgut (ml/100g abgeschmolzenes Schweißgut)
Wanddicke des Bauteils	Blechdicke

▼ Tabelle 2. Ermittlung des Wasserstoffwerts nach Methode A

Menge diffusiblen Wasserstoffs ml/100g abgeschmolzenes Schweißgut	Wasserstoffwert
>15	A
10 ≤ 15	B
5 ≤ 10	C
3 ≤ 5	D
≤3	E

Zusammensetzung des Grundwerkstoffs, also von der Aufhärtnungsneigung des Werkstoffs, abhängt. Somit ergeben sich durchaus auch Anwendungsfälle, bei denen trotz großer Bauteildicke ein Vorwärmen nicht notwendig ist. Andererseits können widrige Wetterbedingungen, zum Beispiel tiefe Temperaturen, Regen, Feuchtigkeit usw., dazu führen, dass Werkstoffe, die normalerweise nicht vorgewärmt werden müssen, einer Erwärmung vor dem Schweißen bedürfen.

Empfehlungen zum Vorwärmen

Vorwärmen von un- und niedriglegierten Baustählen

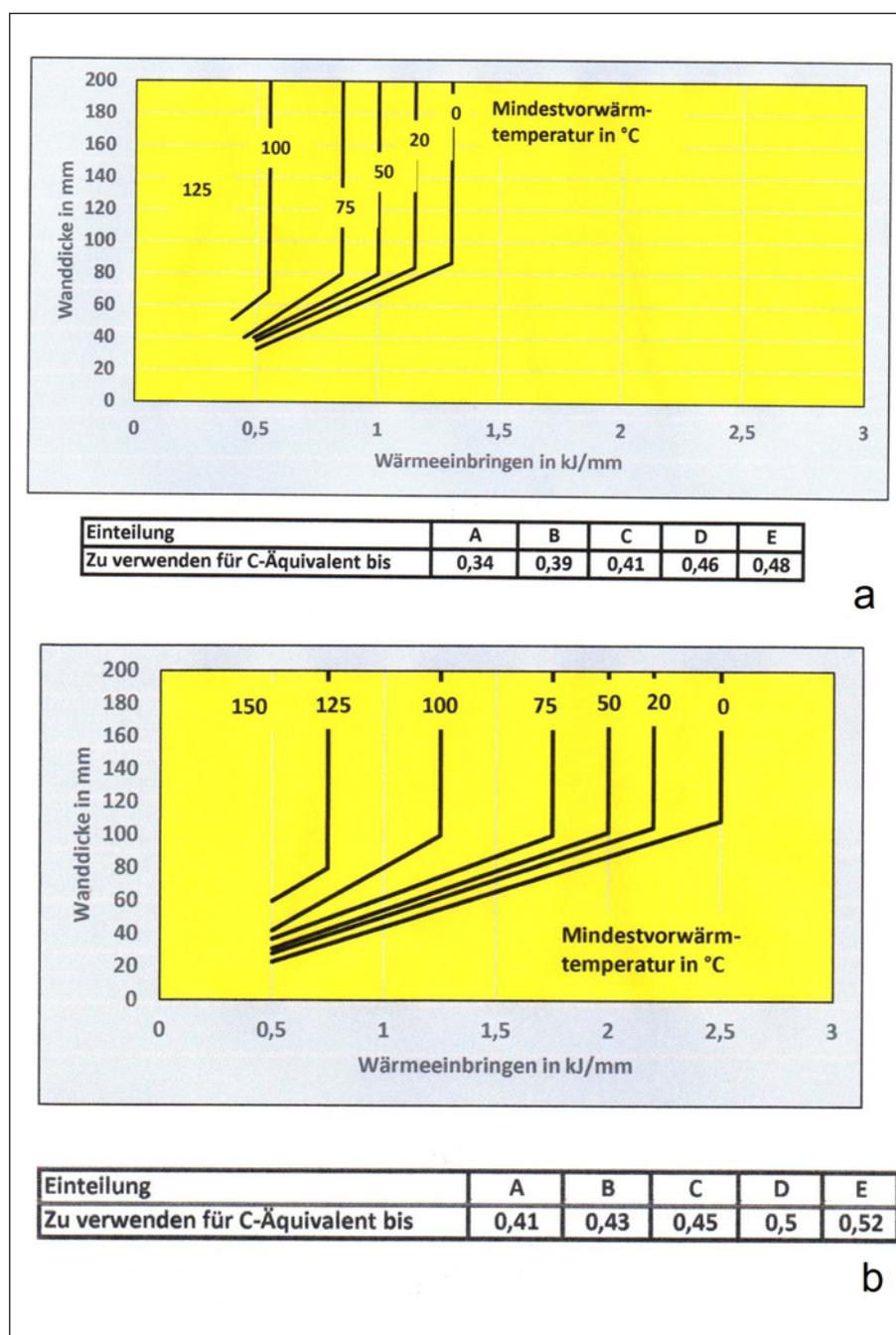
Die Vorwärmtemperatur wird in Abhängigkeit von der zu verschweißenden Wanddicke und den zum Einsatz kommenden Schweißverfahren unter Berücksichtigung der Aufhärtnungsneigung des Stahls bestimmt. Anhaltswerte für die Vorwärmtemperatur können dabei aus der DIN EN 1011-2 „Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen“ [2] gewonnen werden. In dieser Norm werden für diese Werkstoffgruppe zwei Verfahren zum Ermitteln von Vorwärmtemperaturen beschrieben. Die dazu benötigten Parameter sind in **Tabelle 1** wiedergegeben. Während für das Schweißen mit dem Wolfram-Inertgas(WIG)-, Metall-Inertgas-/Metall-Aktivgas(MIG-/MAG)- oder Unterpulver(UP)-Verfahren das Wärmebringen mit der in **Tabelle 1** aufgeführten Formel berechnet werden kann, enthält die DIN EN 1011-2 zahlreiche Tabellen, mit deren Hilfe das Wärmebringen für das Lichtbogenhandschweißen in Abhängigkeit von der Ausziehlänge und der Ausbringung ermittelt wird. Während für Methode A abhängig von den zu erwartenden Wasserstoffgehalten HD im Schweißgut ein Wasserstoffwert ermittelt werden muss (**Tabelle 2**), arbeitet die Methode B ausschließlich mit den HD-Gehalten. Die zu erwartenden Wasserstoffgehalte des Schweißguts können den Datenblättern von Schweißzusatzwerkstoffherstellern entnommen oder durch Entgasen von Schweißproben nach der Quecksilbermethode (siehe DIN EN ISO 3690 [3]) gemessen werden.

Das Bestimmen einer Vorwärmtemperatur erfolgt dann für beide Methoden anhand von Diagrammen. Nach Methode A kann abhängig von den Parametern der **Tabelle 1** die

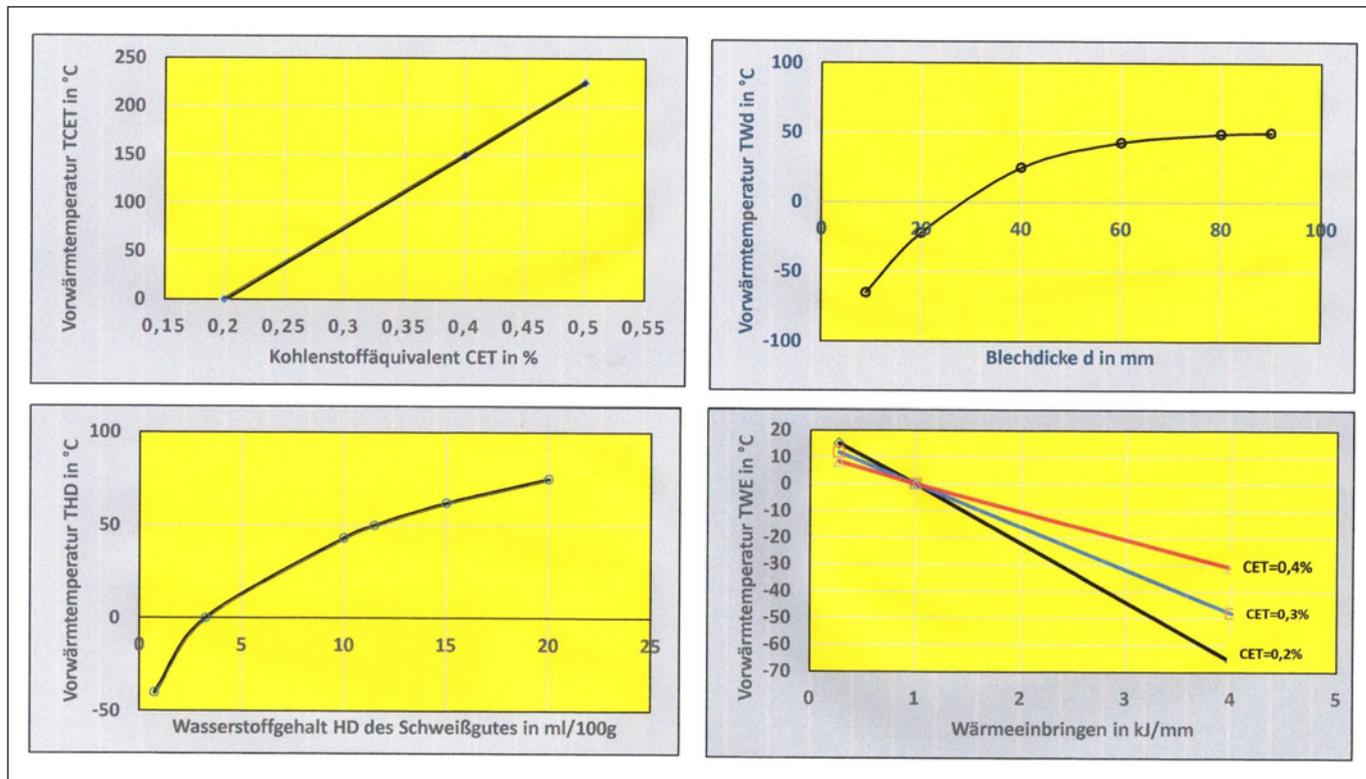
Vorwärmtemperatur aus einem Diagramm abgelesen werden (**Bild 1**). Bei Verwendung von Methode B ergibt sich die Vorwärmtemperatur T_V durch Addition von Temperaturen, die aus vier Diagrammen (**Bild 2**) ermittelt wurden: $T_V = T_{CET} + T_{WD} + T_{HD} + T_{WE}$.

Im Folgenden sollen anhand eines Beispiels die Mindestvorwärmtemperaturen nach beiden Methoden bestimmt und die Ergebnisse miteinander verglichen werden. Folgendes Beispiel wurde gewählt: Lichtbogenschweißen von 60 mm dicken Blechen, wobei

die Wurzelschweißung sowie zwei Stützlagen als Badsicherung mit dem Lichtbogenhandschweißverfahren und rutil-basischer Elektrode gefertigt werden sollen. Das Schweißen der anderen Lagen erfolgt dann durch UP-Schweißen mit basischem Pulver. Als Grundwerkstoffe sollen die Stähle P265GH (1.0425), P355GH (1.0473) und 20MnMoNi4-5 (1.6311) betrachtet werden. Die chemischen Zusammensetzungen sowie die daraus resultierenden Kohlenstoffäquivalente CE und CET sind **Tabelle 3** zu entnehmen.



▲ Bild 1. Beispieldiagramme zur Ermittlung einer Mindest-Vorwärmtemperatur nach Methode A der DIN EN 1011-2 – a) Werkstoff P265GH, b) Werkstoff P355GH



▲ Bild 2. Diagramme zur Ermittlung einer Mindest-Vorwärmtemperatur nach Methode B der DIN EN 1010-2

Die für beide Methoden zur Ermittlung der Vorwärmtemperaturen benötigten Parameter ergeben sich wie folgt:

- Lichtbogenhandschweißen: Elektroden-durchmesser 2,5 mm, Ausziehlänge 95 mm, Wärmeeinbringen 1 kJ/mm, H₂-Gehalt (HD) = 12 ml/100g abgeschmolzenem Schweißgut, Wasserstoffwert B;
- UP-Schweißen: Schweißstrom 650 A, Spannung 40 V, Schweißgeschwindigkeit 40 cm/min, Wärmeeinbringen 4 kJ/mm,

H₂-Gehalt (HD) = 6 ml/100g abgeschmolzenem Schweißgut, Wasserstoffwert C.

Für eine Blechedicke von 60 mm ergeben sich dabei für die drei untersuchten Grundwerkstoffe die in **Tabelle 4** dargestellten Mindest-Vorwärmtemperaturen.

Vorwärmen von Feinkornbaustählen

Feinkornbaustähle sind auf dem Stahlmarkt unter anderem als normalgeglühte,

wasservergütete oder thermomechanisch gewalzte Güten erhältlich. Allen Feinkornbaustählen gemeinsam ist ein vergleichsweise niedriger Kohlenstoffgehalt von $\leq 0,2\%$. Die guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften werden dabei durch das Kombinieren mehrerer Mechanismen, zum Beispiel durch Ausscheidungshärtung von Nitriden und/oder Karbiden, durch Kaltverfestigung, durch Mischkristallverfestigung, durch Kornfeinerung und durch Härtung bei wasservergüteten Feinkornbaustählen, erzielt. Beim Lichtbogenschweißen von Feinkornbaustählen besteht die Gefahr, dass die guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften vor allem in der WEZ verloren gehen. Daher sind die Schweißparameter derart aufeinander abzustimmen, dass die Gefügezone mit Grobkornbildung sowie grober Ausscheidungsstruktur in der WEZ möglichst klein bleibt.

Durch zahlreiche Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Abkühldauer von 800°C auf 500°C ($t_{8/5}$ -Zeit) die Eigenschaften der WEZ von Feinkornbaustählen maßgeblich beeinflusst. Ein zu schnelles Abkühlen führt zu unzulässigen Härtewerten in der WEZ, wohingegen ein zu langsames Abkühlen die Zähigkeit verringert [4]. Die $t_{8/5}$ -Zeit wird in erster Linie vom Wärmeeinbringen,

▼ Tabelle 3. Chemische Zusammensetzung von drei Beispielwerkstoffen

Werkstoffbezeichnung	Werkstoffnummer	chemische Zusammensetzung (Gewichtsanteil in %)					C-Äquivalent	
		C	Mn	Mo	Cr	Ni	CE	CET
P265GH	1.0425	0,15	1,1	-	-	-	0,36	0,26
P355GH	1.0473	0,17	1,4	-	-	-	0,43	0,31
20MnMoNi4-5	1.6311	0,18	1,3	0,50	0,20	0,60	0,58	0,39

▼ Tabelle 4. Ergebnisse von Vorwärmtemperaturbestimmungen für un- und niedriglegierte Stähle nach DIN EN 1010-2

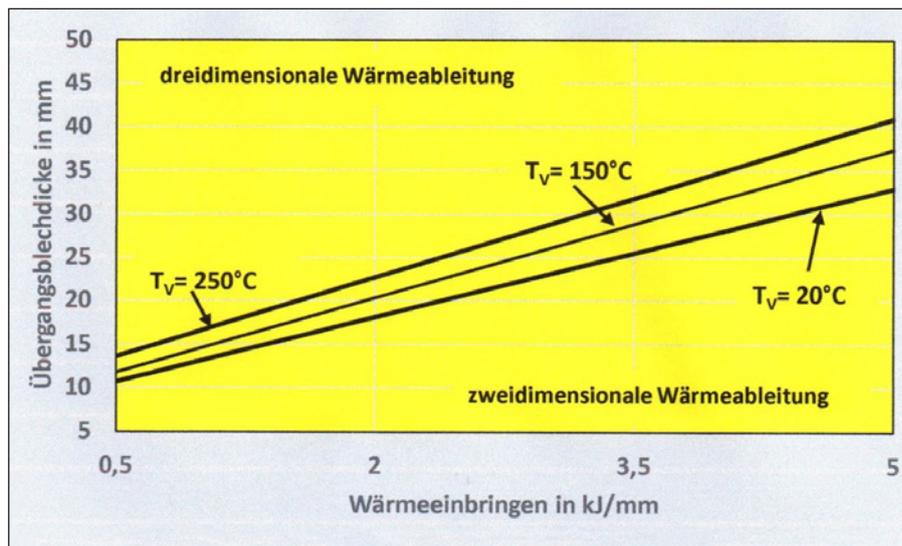
Grundwerkstoff	Lichtbogenhandschweißen		UP-Schweißen	
	T _{Vmin} Methode A	T _{Vmin} Methode B	T _{Vmin} Methode A	T _{Vmin} Methode B
P265GH	RT	140°C	RT	40
P355GH	75°C	175°C	RT	90
20MnMoNi4-5	175°C	230°C	RT	160

von der Vorwärmtemperatur und von der zu verschweißenden Blechdicke (zwei- oder dreidimensionale Wärmeableitung) bestimmt. In verschiedenen VdTÜV-Werkstoffblättern für Feinkornbaustähle werden beispielsweise alle Schweißparameterkombinationen, die $t_{8/5}$ -Zeiten zwischen 10 und 25 s gewährleisten, als geeignet angesehen [5]. $t_{8/5}$ -Zeiten können zum Beispiel durch Berechnungen, Thermoelementmessungen oder anhand von Diagrammen ermittelt werden. Letztere Methode wird ausführlich in DIN EN 1011-2 beschrieben. Im Folgenden wird das Bestimmen von Vorwärmtemperaturen anhand von Diagrammen vorgestellt.

Als erstes gilt es zu klären, ob bei der vorliegenden Schweißarbeit eine zwei- oder eine dreidimensionale Wärmeableitung stattfindet. Dies lässt sich unter Berücksichtigung des Wärmeeinbringens und der Blechdicke aus **Bild 3** ableiten. Der Auftragung in **Bild 3** kann entnommen werden, dass für das im Abschnitt „Vorwärmen von un- und niedriglegierten Baustählen“ vorgestellte Beispiel bei einer Blechdicke von 60 mm sowohl für ein Wärmeeinbringen von 1 kJ/mm (Lichtbogenhandschweißung) als auch für die UP-Schweißung mit 4 kJ/mm immer von einer dreidimensionalen Wärmeableitung ausgegangen werden kann.

Für eine dreidimensionale Wärmeableitung ist der Zusammenhang zwischen der Abkühlzeit $t_{8/5}$, dem Wärmeeinbringen und der Vorwärmtemperatur in **Bild 4** wiedergegeben. Die in **Bild 4** dargestellten Zusammenhänge beschreiben dabei den einfachen Fall einer Aufschweißraupe (Blindraupe) auf ein Blech. Soll dieses Diagramm zum Beispiel für die Bestimmung einer Abkühlzeit bei einer V-Nahtvorbereitung angewendet werden, so muss das Wärmeeinbringen mit einem Formfaktor (0,9 bei V-Nahtvorbereitung) multipliziert werden.

Für das im Abschnitt „Vorwärmen von un- und niedriglegierten Baustählen“ gewählte Beispiel ergeben sich daraus folgende Erkenntnisse für die Wahl von Vorwärmtemperaturen, die die Forderungen der VdTÜV-Werkstoffblätter nach Abkühlzeiten $t_{8/5}$ von 10 bis 25 s erfüllen. Das Schweißen der Wurzel- und Stützlagen nach dem Lichtbogenhandschweißverfahren muss demnach mit einer Mindestvorwärmtemperatur von etwa 250°C erfolgen, wobei für die gewählte V-Nahtvorbereitung



▲ Bild 3. Übergangsblechdicke von der dreidimensionalen zur zweidimensionalen Wärmeableitung in Abhängigkeit vom Wärmeeinbringen und von verschiedenen Vorwärmtemperaturen

ein korrigiertes Wärmeeinbringen $W = 0,9$ kJ/mm berücksichtigt wurde.

Für das Schweißen der Füll- und Decklagen mit dem UP-Verfahren und einem korrigierten

Wärmeeinbringen von 3,6 kJ/mm kann dagegen auf ein Vorwärmen verzichtet werden.

Gemäß den Auftragungen in **Bild 4** beträgt dann die Abkühlzeit $t_{8/5}$ etwa 20 s, sodass die

Anzeige

Alles aus einer Hand: Die Komplettlösung für Draht und Drahtführung

Robostraight Gerader Draht für sichere Schweißprozesse.

MADE IN GERMANY
KNOW HOW FOR EXCELLENCE
By MIGAL.CO

MIGAL.CO
WIR SIND AUF DRAHT!

MIGAL.CO GmbH
D-94405 Landau/Isar, Wattstraße 2
Fon +49(0)9951/69 0 59-0
Fax +49(0)9951/69 0 59-3900
info@migal.co
www.migal.co

Forderung aus dem VdTÜV-Werkstoffblatt 257 erfüllt wird. Allerdings bleibt anzumerken, dass beim UP-Schweißen die Zwischenlagentemperatur auf etwa 100°C begrenzt werden muss, da andernfalls die $t_{8/5}$ -Zeit den festgelegten Maximalwert von 25 s überschreiten würde. Im Übrigen wird in DIN EN 1011-2 die Anwendung der $t_{8/5}$ -Methode auch für CMn-Stähle, die nicht der Gruppe der Feinkornbaustähle angehören, nicht ausgeschlossen.

Vorwärmen von warmfesten CrMo-legierten Stählen

Hierzu bleibt anzumerken, dass die im Abschnitt „Vorwärmen von un- und niedriglegierten Baustählen“ zur Bestimmung einer Vorwärmtemperatur beschriebenen Methoden A und B gar nicht bzw. nur bedingt auf die warmfesten CrMo-Stähle angewendet werden können. So ist der Gültigkeitsbereich der Methode A auf Cr-Gehalte von höchstens 0,9% beschränkt. Dieser Grenzwert wird von Stählen der Güte 13CrMo4-5 in der Regel bereits überschritten. Dagegen reicht der Gültigkeitsbereich der Methode B bis zu Cr-Gehalten von höchstens 1,5%. Dementsprechend lässt sich das Verfahren aus Methode B durchaus für CrMo-legierte Stahlqualitäten wie 13CrMo4-5 oder 13CrMoSi5-5 verwenden. Der häufig zur Anwendung kommende Stahl 10CrMo9-10 liegt dagegen schon außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Methode B. Als Hilfestellung zur Ermittlung von Mindestvorwärmtemperaturen

▼ Tabelle 5. Beispiele von Mindestvorwärmtemperaturen für warmfeste Stähle nach DIN EN 1011-2

Stahlsorte	Dicke (mm)	Mindestvorwärmtemperatur		
		Wasserstoffwert D ≤5 ml/100g (°C)	Wasserstoffwert C 5 ≤ 10 ml/100g (°C)	Wasserstoffwert A >15 ml/100g (°C)
16Mo3	≤15	20	20	100
	>15 ≤ 30	75	75	100
	>30	75	100	nicht anwendbar
13CrMo4-5 13CrMoSi5-5	≤15	20	100	150
	>15	100	150	nicht anwendbar
10CrMo9-10 12CrMo9-10	≤15	75	150	200
	>15	100	200	nicht anwendbar
X12CrMo5	alle	150	200	nicht anwendbar

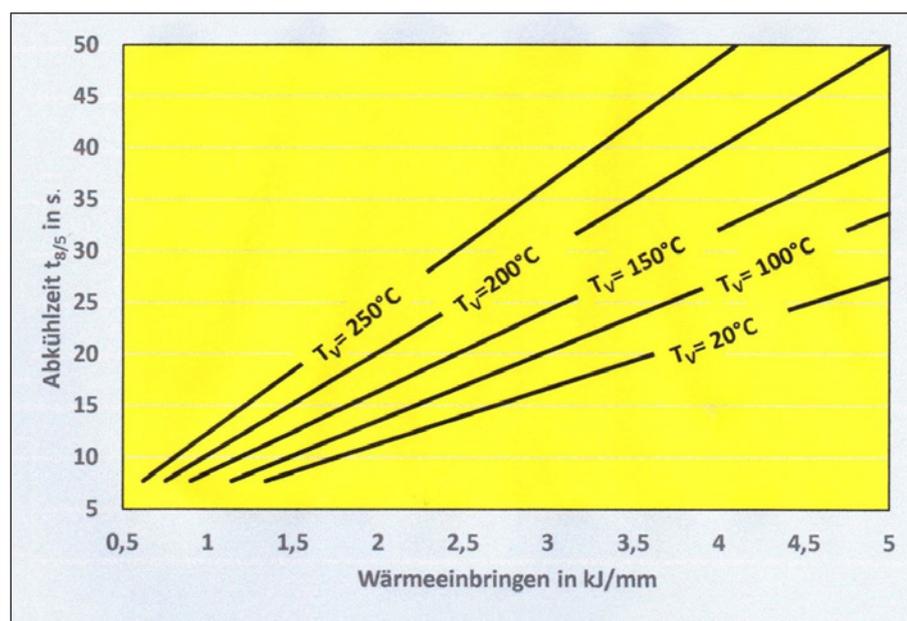
für warmfeste CrMo-Stähle enthält die DIN EN 1011-2 eine Tabelle mit den wichtigsten Vertretern dieser Werkstoffgruppe (siehe **Tabelle 5**).

Ermittelt man die Mindestvorwärmtemperatur nach Methode B für einen Stahl 13CrMo4-5 (CET = 0,29) unter Berücksichtigung der im Abschnitt „Vorwärmen von un- und niedriglegierten Baustählen“ gewählten Randbedingungen, so ergibt sich für die durch Lichtbogenhandschweißen gefertigte Wurzel- und Stützlagenschweißung eine Vorwärmtemperatur von etwa 160°C. Für die UP-Schweißung ergibt sich dabei ein Wert von etwa 75°C. Für die UP-Schweißung besteht also eine Diskrepanz zu den Werten für 13CrMo4-5 der **Tabelle 5**, in der eine Mindestvorwärmtemperatur von 150°C unabhängig vom jeweiligen Schweißverfahren gefordert wird.

Vier Methoden für die Vorwärmung – Fachwissen und Erfahrungsschatz entscheidend

Das Einstellen einer geeigneten Vorwärmtemperatur ist ein wesentlicher Faktor zum Erzielen von rissfreien Schweißnähten mit guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften. Allerdings zeigt die tägliche Praxis, dass bei der Festlegung von Vorwärmtemperaturen sehr viel Erfahrungswissen im Spiel ist. Hier bieten die in der DIN EN 1011-2 beschriebenen Verfahren Möglichkeiten, mit einem genormten Vorgehen Anhaltswerte für „Mindestvorwärmtemperaturen“ zu bestimmen. Wie in den vorherigen Ausführungen dargestellt, unterscheiden sich jedoch die mit den vier Verfahren ermittelten Vorwärmtemperaturen erheblich. In dem gewählten Beispiel liegen die nach Methode A ermittelten Vorwärmtemperaturen unabhängig vom Grundwerkstoff immer deutlich unterhalb der nach Methode B bestimmten Temperaturen. Inwieweit es Sinn macht, ein 60 mm dickes Blech aus P265GH (Kesselblech HII) ohne Vorwärmung zu schweißen, darf bezweifelt werden. Glücklicherweise muss im Druckgerätebau die Eignung dieses Parameters mit einer Verfahrensprüfung nachgewiesen werden. Bezogen auf den Hersteller von Druckgeräten, sind die nach Methode A ermittelten Vorwärmtemperaturen vorteilhaft, da kostengünstig. Die Kunden-/Betreiberseite wird sich eher für die Vorwärmtemperaturen der Methode B entscheiden.

Das in DIN EN 1011-2 beschriebene $t_{8/5}$ -Modell wird hauptsächlich für das Schweißen von Feinkornbaustählen angewendet. Eine Nutzung für C- und CMn-Stähle wird in dieser Norm jedoch nicht ausgeschlossen. Ob es allerdings Sinn macht, einen einfachen



▲ Bild 4. Abkühlzeit $t_{8/5}$ für dreidimensionale Wärmeableitung in Abhängigkeit vom Wärmeeinbringen und von verschiedenen Vorwärmtemperaturen (Bilder: Killing (nach DIN EN 1010-2))

Baustahl von 60 mm Dicke für die Wurzel- und Stützlagenschweißung auf 250°C vorzuwärmen, muss ebenfalls bezweifelt werden. Letztlich darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass aus Gründen der Vergleichbarkeit bei der Anwendung der Modelle an einem einheitlichen Wärmeeinbringen festgehalten wurde. So bewirkt eine Erhöhung des Wärmeeinbringens um 0,3 kJ/mm im Rahmen des $t_{8/5}$ -Modells beispielsweise eine Reduzierung der Vorwärmtemperatur um etwa 100°C. Ferner bleibt es dem Anwender dieser Methoden unbenommen, bei vorgegebener Vorwärmtemperatur ein geeignetes Wärmeeinbringen zu bestimmen. Bei Verwendung der Methode B wären dann die Parameter CET, Blechdicke und Vorwärmtemperatur als Konstante anzusehen, und der Wasserstoffgehalt könnte so variiert werden, dass ein praxisingerechtes Wärmeeinbringen erzielt wird.

Inwieweit es sinnvoll ist, in einer Norm gleich vier Methoden zur Ermittlung von Vorwärmtemperaturen aufzuführen, darf mit Recht diskutiert werden, zumal die einzelnen Verfahren zu gänzlich unterschiedlichen Ergebnissen führen. Letztendlich muss das Fachwissen und der Erfahrungsschatz der Schweißaufsichtsperson darüber entscheiden, welche Mindestvorwärmtemperatur für den jeweiligen Anwendungsfall zum Einsatz kommt. Hierbei sind zusätzlich die Parameter „Zwischentemperatur“ sowie die Randbedingungen einer etwaigen Wärmenachbehandlung zu berücksichtigen. ■



Dr.-Ing. Ulrich Killing,
Beratungsbüro für Schweiß-
und Werkstofftechnik,
Nerdlen,
beratungsbuero-killing@
t-online.de

Literatur

- [1] Boese, U.: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen – Teil 1 Grundlagen. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 44/1, S. 105 ff. DVS Verlag, Düsseldorf 1995.
- [2] DIN EN 1011-2: Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Stählen. Ausgabe: 2001-05.
- [3] DIN EN ISO 3690: Schweißen und verwandte Prozesse – Bestimmung des Wasserstoffgehaltes im Lichtbogenschweißgut. Ausgabe: 2018-12.
- [4] Boese, U.; Ippendorf: Das Verhalten der Stähle beim Schweißen – Teil 2 Anwendungen. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 44/2, S. 111 ff. DVS Media, Düsseldorf 2011.
- [5] VdTÜV-Werkstoffblatt 257: Hochfeste vergütete Feinkornbaustähle N-A-XTRA 56, N-A-XTRA 63, N-A-XTRA 70. Ausgabe: 2001-09-01.

Anzeige

SmartCell

Next Level Cobot to unleash
your welding potential.

Hohe Qualität und effiziente Schweißprozesse

Sie planen die zukunftssichere Ausrichtung Ihres Unternehmens in Zeiten von Industrie 4.0 und Fachkräftemangel? Mit der Fronius SmartCell gelingt auch kleinen und mittelständischen Unternehmen der einfache und innovative Einstieg in die automatisierte Produktion. Mit der kompakten All-in-one-Lösung steigern Sie die Wirtschaftlichkeit und Effizienz Ihrer Produktion. Die SmartCell verbindet ein intuitives und benutzerfreundliches Bedienkonzept mit reproduzierbar hoher Schweißqualität – so funktioniert Roboterschweißen ganz ohne Programmieren.



Mehr Informationen
finden Sie unter:
www.fronius.de/smartcell