



Härte in der WEZ – Wirkung der chemischen Zusammensetzung des Stahls, der Schweißbedingungen und des Spannungsarmglühens

Frank Hanus, Dillingen

1. Einleitung

Die Härte der Wärmeeinflusszone (WEZ) von Schweißverbindungen kann als Merkmal der Fertigungsqualität herangezogen werden und wird daher bei Schweißverfahrensprüfungen und Arbeitsproben gemessen. Schweißtechnische Normen, anwendungsbezogene Regelwerke und Lastenhefte legen Obergrenzen der Härte fest. Der Schweißfachingenieur und Schweißer haben die Schweißbedingungen darauf abstimmen, so dass eine zu hohe Härte vermieden wird. Besonders strenge Anforderungen können es auch erforderlich machen, dass die chemische Zusammensetzung des Stahles gegenüber den Grenzen der Liefernorm eingeschränkt werden muss.

Im Folgenden werden die metallkundlichen Zusammenhänge erläutert, die die Härte der WEZ bestimmen. Formeln zu ihrem Berechnen werden angegeben und anhand eigener Ergebnisse überprüft.

2. Grundlagen

Beim Schmelzschweißen wird der an das Schweißgut angrenzenden Grundwerkstoff hohen Temperaturen ausgesetzt. Dabei wachsen die Austenitkörner. Da das gröbere Gefüge beim Abkühlen zu einer erhöhten Härte führt, weist die Grobkornzone neben der Schmelzlinie die höchste Härte auf. Dieser Bereich wird hier ausschließlich behandelt.

2.1 Einfluss der Abkühlgeschwindigkeit

Für eine gegebene Stahlanalyse hängt die Härte der Grobkornzone von der Abkühlgeschwindigkeit ab (Bild 1). Schnelle Abkühlung führt zu einem martensitischen Gefüge hoher Härte, langsamere Abkühlung lässt zunehmend Zeit für eine diffusionsgesteuerte Umwandlung, bei der weichere Gefüge wie Zwischenstufe (Bainit) und Ferrit entstehen.

Zur Kennzeichnung des Abkühlvorgangs beim Schweißen eignet sich die Abkühlzeit $t_{8/5}$, die Zeitspanne der Abkühlung von 800°C auf 500°C. Diese Größe lässt sich bei Kenntnis der Schweißparameter und der Nahtgeometrie berechnen¹).

2.2 Einfluss der chemischen Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung des Stahles verändert das Umwandlungsverhalten. Sie bestimmt für die jeweilige Abkühlgeschwindigkeit den Anteil der sich bildenden Gefüge. Wie sich einzelne Legierungselemente in Abhängigkeit von der Abkühlzeit auf die Härte auswirken, ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Kohlenstoff und Legierungselemente wie Molybdän, Mangan und Chrom erhöhen die Härte und verschieben dadurch den Härteabfall zu langsamerer Abkühlung, d.h. längerer $t_{8/5}$ -Zeit.

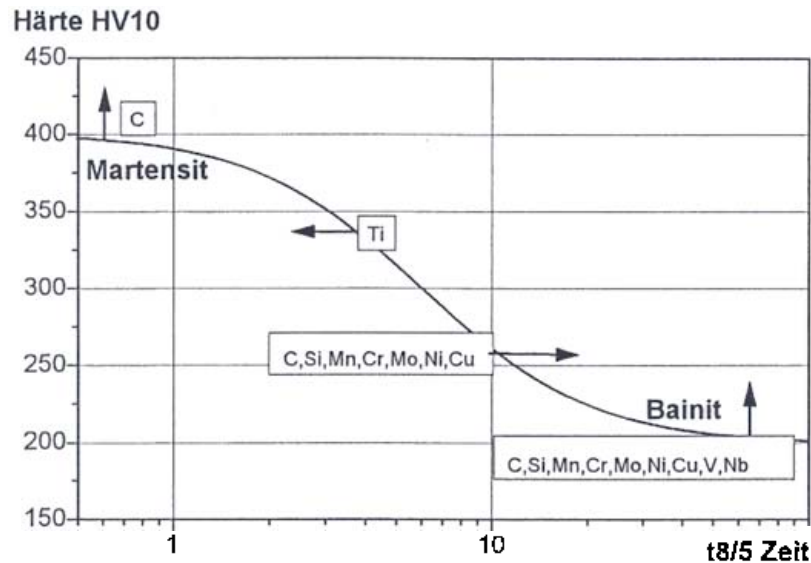


Bild 1 : Einfluss der Legierungselemente und der Abkühlzeit auf die Härte in der WEZ

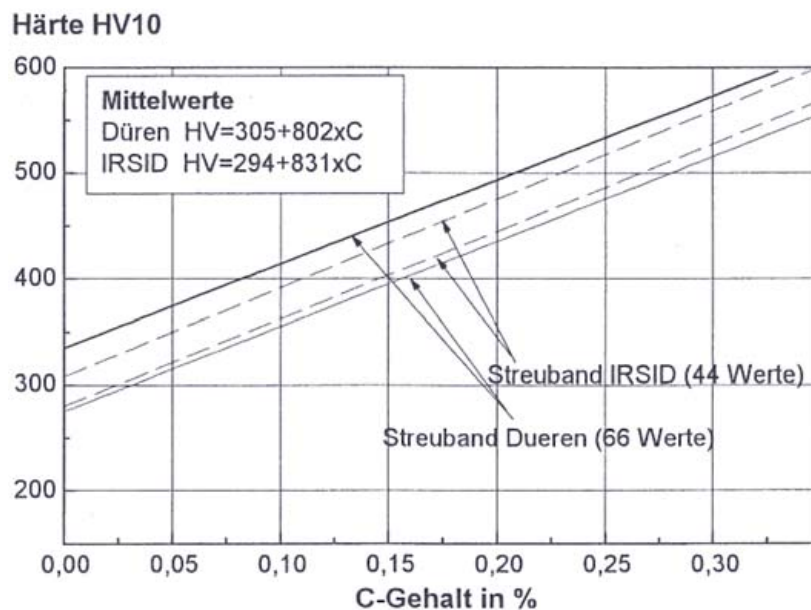


Bild 2 : Einfluss des Gehaltes an Kohlenstoff auf die Härte des Martensit

Auch die Härte der einzelnen Gefüge wird durch die chemische Zusammensetzung beeinflusst. Der Gehalt an Kohlenstoff bestimmt die Härte des Martensit. Wie Bild 2 zeigt, nimmt die Härte hierbei linear mit steigendem Kohlenstoffgehalt zu ^{2]} ^{3]}. Das Härteniveau der Zwischenstufe hängt auch von anderen Legierungselementen ab.

Höherfeste Feinkornbaustähle können zur Festigkeitssteigerung mit Niob (bis 0,05%) und/oder Vanadin (S460N bis 0,20 %) mikrolegiert sein. Im Grundwerkstoff liegen die Mikrolegierungselemente als Karbide und Nitride in Auscheidungen gebunden vor. Nahe der Schmelzlinie lösen sich diese aufgrund der hohen Temperaturen vollständig auf. Bei schnellem Abkühlen wird ein erneutes Ausscheiden unterdrückt, so dass die Atome in übersättigter Lösung im Gitter verbleiben. Bei langsamerer Abkühlung kann sich bereits ein Teil während des Schweißtemperaturzyklus wieder ausscheiden. Hierbei entstehen sehr fein verteilte Karbide und Nitride, die die Härte steigern. Zunächst in Zwangslösung verbliebene Atome können sich in mehrlagigen Schweißverbindungen durch die Wärmewirkung von Folgelagen^{4]} oder im Verlauf einer nachfolgenden Wärmebehandlung ausscheiden.

3. Härteprüfung in der WEZ und Anforderungen

Wie die Härte in der Schweißverbindung gemessen werden soll, gibt DIN EN 1043-1^{5]} an. Es werden insbesondere die Positionen der Härteeindrücke für einzelne Nahtkonfigurationen vorgeschrieben.

Es hat sich in der Praxis bewährt, die WEZ-Härte an Schlifflinien mittels HV5- oder HV10-Messungen zu prüfen. Hierbei ergeben sich Härteeindrücke, die klein genug sind, lediglich die Grobkornzone zu treffen, gleichzeitig aber ausreichend groß, einen zuverlässigen Mittelwert des Gefüges in der Grobkornzone zu erfassen. Zu kleine Eindrücke führen zu stark streuenden Werten, denn hierbei wird zunehmend die Härte der einzelnen Gefügebestandteile gemessen. Mit zu hohen Prüflasten (z.B. HV30) werden größere Eindrücke erzeugt. Wenn diese gleichzeitig verschiedene Bereiche der WEZ bis zum Grundwerkstoff erfassen, werden zu tiefe Härtewerte bestimmt. Über vergleichende Untersuchungen zum Einfluss der Prüfmethodik wurde in einem IIW-Dokument ^{6]} berichtet.

Zulässige Härtewerte sind z.B. in DIN EN 288-3 "Schweißverfahrensprüfungen für das Lichtbogenschweißen von Stählen" ^{7]} definiert. Die Vorgaben richten sich nach den Stahlgruppen. Sie unterscheiden zwischen einlagig und mehrlagig geschweißten Nähten und berücksichtigen, ob nach dem Schweißen eine Wärmehandlung durchgeführt wurde (Tabelle 1).

Die Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter hat für den Geltungsbereich der AD-Merkblätter die WEZ-Härte grundsätzlich auf maximal 350 HV10 beschränkt ^{8]}. Allerdings wird zugestanden, dass darüber hinausgehende Härtespitzen in schmalen Übergangszonen nicht zu beanstanden sind, wenn das Ergebnis der technologischen Prüfungen den Anforderungen genügt.

Tabelle 1 Zulässige höchste Härtewerte, HV10 nach DIN EN 288

| Stahlgruppen Einteilung nach EN 288 | Einzelraupe | | mehrlagige Naht | |
|---|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | Schweißzustand | wärmebehandelt | Schweißzustand | wärmebehandelt |
| 1, 2 | 380 | 320 | 350 | 320 |
| 3 | 450 | vereinbaren | 420 | vereinbaren |
| 4, 5 | vereinbaren | 320 | vereinbaren | 320 |
| 6 | vereinbaren | 350 | vereinbaren | 350 |
| 7 (Ni _≤ 4%) | vereinbaren | 300 | 320 | 300 |
| 7 (Ni _{>} 4%) | vereinbaren | vereinbaren | 400 | vereinbaren |

Gruppe1 Re ≤ 355 MPa, (Härteprüfung nicht immer gefordert)
 Gruppe2 Feinkornbaustähle im Lieferzustand N und TM mit ReH>355,
 Gruppe3 Vergütete Feinkornbaustähle mit ReH>500MPa,
 Gruppe4-6 warmfeste Kesselbleche mit zunehmendem Legierungsgehalt,
 Gruppe7 kaltzähe Ni-Stähle bis 9 % Ni

4. Berechnen der WEZ-Härte

Anhand systematischer Untersuchungen und durch Regressionsanalyse einer Vielzahl von Ergebnissen wurden Formeln hergeleitet, mit deren Hilfe die WEZ-Härte in Abhängigkeit von chemischer Zusammensetzung und $t_{8/5}$ -Zeit berechnet werden kann. Eigene Untersuchungsergebnisse wurden mit den Vorhersagen gemäß der Formeln von Düren [2] und Yurioka [9] verglichen. Hierzu werden diese beiden Ansätze vorgestellt.

In Dürens Ansatz wird der Verlauf der WEZ-Härte in Abhängigkeit von der Abkühlzeit durch drei lineare Kurvenabschnitte beschrieben. Die Martensit- und Bainithärte wird unabhängig von der $t_{8/5}$ -Zeit konstant angenommen. Im Übergangsbereich nimmt die Härte linear mit dem Logarithmus der $t_{8/5}$ -Zeit ab. Die Formeln sind in Tabelle 2 angegeben. Die Martensithärte wird lediglich durch den Kohlenstoffgehalt beeinflusst, während für die Härte des Bainits weitere Legierungselemente in Form eines Kohlenstoffäquivalentes berücksichtigt werden. Die Formeln wurden mittels Regressionsanalyse ausgehend von 930 Messungen an 110 Stählen aufgestellt. Hierfür ermittelte Düren eine Standardabweichung von 16 HV.

Tabelle 2: Formeln zur Berechnung der WEZ-Härte nach Düren

Martensithärte HV_M :

$$HV_M = 802 \times C + 305 \quad (1)$$

Bainithärte HV_B :

$$HV_B = 350 \times CE^* + 101 \quad (2)$$

$$CE^* = C + Si/1 + Mn/8 + Cu/9 + Cr/5 + Ni/17 + Mo/6 + V/3$$

Mischhärte :

$$HV = 2019 \times [C(1 - \log t_{8/5}) + 0,3(CE^* - C)] + 66 \times [1 - \log t_{8/5}]$$

Das Modell Yuriokas geht gleichermaßen von konstanter Härte für 100% Martensit und 100% Bainit aus. Den Übergang modelliert es durch eine Arcustangens-Funktion. Tabelle 3 gibt die betreffenden Formeln an.

Tabelle 3 : Berechnung der WEZ-Härte nach Yurioka

$$HV = 0,5 (HV_M + HV_B) - 0,455 (HV_M - HV_B) \arctan t^* \quad (5)$$

$$HV_M = 884 \times C (1 - 0,3 C^2) + 294 \quad (6)$$

$$HV_B = 145 + 130 \times \tanh (2,65 CE_2 - 0,69) \quad (7)$$

$$CE_1 = C + Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/12 + Cr/8 + Mo/4 \quad (8)$$

$$CE_2 = C + Si/24 + Mn/5 + Cu/10 + Ni/18 + Cr/5 + Mo/2,5 + Nb/3 + V/5 \quad (9)$$

$$CE_3 = C + Mn/3,5 + Cu/20 + Cr/5 + Ni/9 + Mo/4 \quad (10)$$

$$t^* = 4 (\ln t_{8/5} - \ln t_{nb}) / (\ln t_{nm} - \ln t_{nb}) - 2 \quad (11)$$

$$t_{nb} = \exp (10,6 \times CE_1 - 4,8) \quad (12)$$

$$t_{nm} = \exp (6,2 \times CE_3 + 0,74) \quad (13)$$

5. Vergleich berechneter Härtewerte mit Messungen

Um die Vorhersagegenauigkeit der genannten Formeln zu überprüfen, wurden eigene Härtmessungen mit nach obigen Formeln berechneten Werten verglichen. Die untersuchten Stähle reichten von Feinkornbaustählen unterschiedlicher Streckgrenzenklassen bis zu warmfesten Stählen 10CrMo9-10. Die Härten wurden an Auftragschweißungen gemessen. Die $t_{8/5}$ -Zeiten waren beim Schweißen durch unterschiedliches Wärmeeinbringen variiert worden.

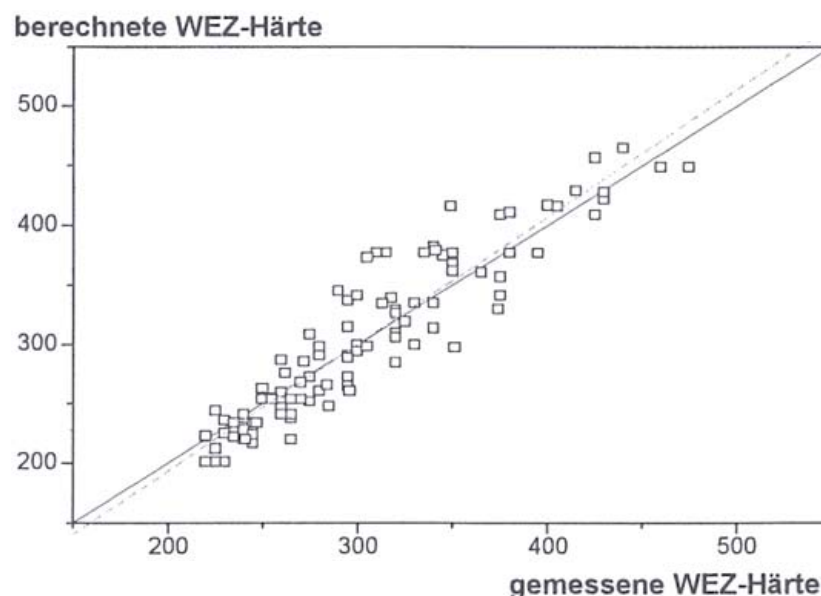


Bild 3 : Vergleich der gemessenen mit der nach Düren berechneten WEZ-Härte

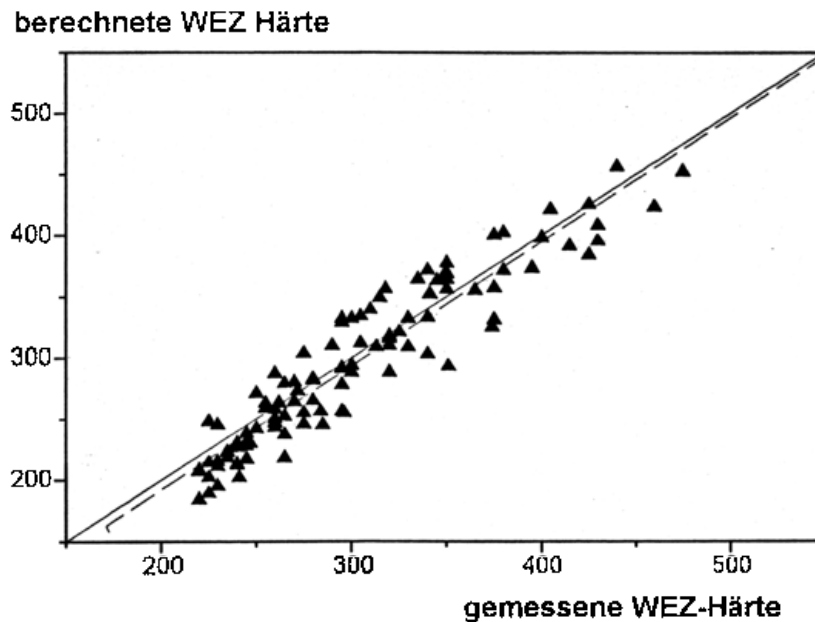


Bild 4 Vergleich zwischen gemessener und nach Yurioka berechneter WEZ-Härte

In Bild 3 sind die nach Düren berechneten Werte gegen die gemessenen Werte aufgetragen. Im Falle der unlegierten Stähle wurde eine gute Übereinstimmung gefunden, mit zunehmendem Legierungsgehalt nahmen die Abweichungen zu. Die nach Yurioka berechnete WEZ-Härte stimmte generell gut mit den Messwerten überein (Bild 4).

5. Wirkung eines Spannungsarmglühens

Außerhalb des Stahlbaus ist nach dem Schweißen dickwandiger Konstruktionen vielfach ein Spannungsarmglühen vorgeschrieben. Neben dem Abbau von Eigenspannungen bewirkt es ein Anlassen der Schweißnaht. Die Wirkung von Temperatur und Dauer der Wärmebehandlung auf die mechanischen Eigenschaften lässt sich im Holloman-Parameter ^{109]} zusammenfassen:

$$HP = T/1000 \times (20 + \log t) \quad (16)$$

Hierin ist T die Glüh Temperatur in Kelvin und t die Haltezeit in Stunden. Bild 5 zeigt am Beispiel eines CMn-Stahles, dass der Härteabfall mit zunehmendem Martensitanteil des Ausgangsgefüges linear zunimmt. Ansteigende HP-Werte (höhere Temperaturen, längere Glühzeiten) verstärken die Anlasswirkung. Der gleiche Zusammenhang gilt für den warmfesten Stahl 15NiCuMoNb5, allerdings auf höherem Härteniveau (Bild 6).

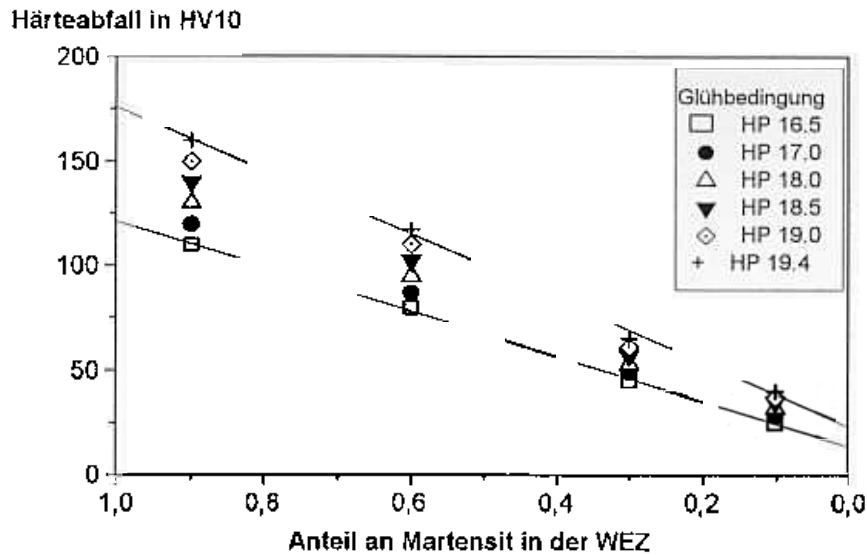


Bild 5 : Härteabfall in der WEZ eines CMn-Stahles beim Spannungsarmglühen in Abhängigkeit von Ausgangsgefüge und Glühbedingungen

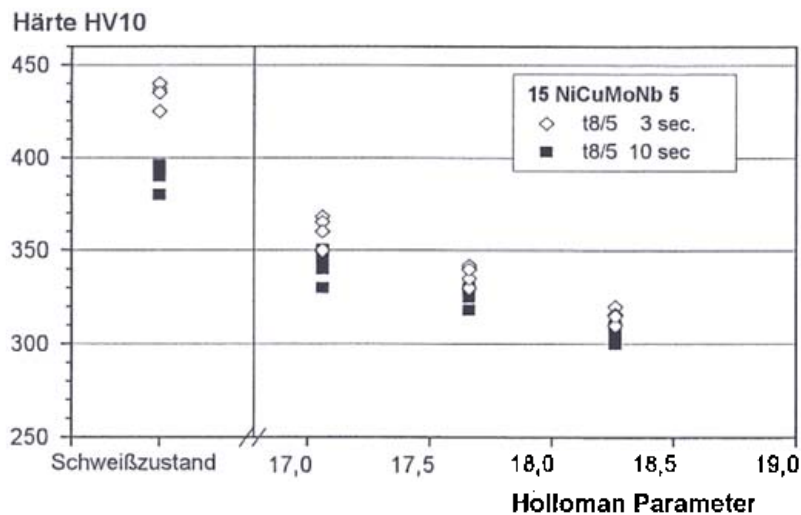


Bild 6 : Wirkung unterschiedlicher Bedingungen des Spannungsarmglühens auf die Härte in der WEZ des Stahles 15NiCuMoNb5

Der Intensität des Spannungsarmglühens sind durch den Grundwerkstoff Grenzen gesetzt. Mit zunehmendem HP-Wert der Wärmebehandlung verändern sich die Eigenschaften des Grundwerkstoffes. Die französische Norm NF A 36-200 ^{11]} gibt für CMn- und CMnNb-Stähle die zu erwartende Abnahme der Festigkeitseigenschaften an.

Für das Berechnen der WEZ-Härte nach dem Spannungsarmglühen schlägt Okumura ^{12]} eine Formel vor. Ausgehend von der berechneten Härte im Schweißzustand wird abhängig vom HP-Wert der Glühung die Anlasswirkung berechnet. Hierbei berücksichtigt die Formel unter anderem eine mögliche Ausscheidungshärtung durch die Legierungselemente Niob, Vanadin und Molybdän.

Tabelle 4 : Anlasswirkung des Spannungsarmglühens auf die WEZ-Härte nach Okumura (t^* und CE_2 aus Tabelle 3)

$$\begin{aligned} \Delta HV = & [884C+177-197CE_2+16,5(HP-21,5)] \times MM-7CE_2+26 \\ & + [18 (HP-18)^2 - 138] V^{1/2} \\ & + [20 (HP-18)^2 - 268] Nb^{1/2} \\ & + [25 (HP-17,3)^2 - 55] Mo^{1/2} \end{aligned} \quad (15)$$

$$MM = \text{Martensitanteil} = 0,5 - 0,455 \arctan t^* \quad (16)$$

Die Ergebnisse dieser Formel wird in Bild 7 mit eigenen Messwerten verglichen. Für CMn- und CMnNb-Stähle wurde eine gute Übereinstimmung gefunden. Für warmfeste Cr- und Mo-legierte Stähle wurde die Härte dagegen deutlich überschätzt. Inzwischen wurde eine eigene Formel entwickelt¹³, die diese Schwäche nicht aufweist (Bild 8). Die Formel wurden noch nicht veröffentlicht, sie dient zum Beantworten von Kundenanfragen.

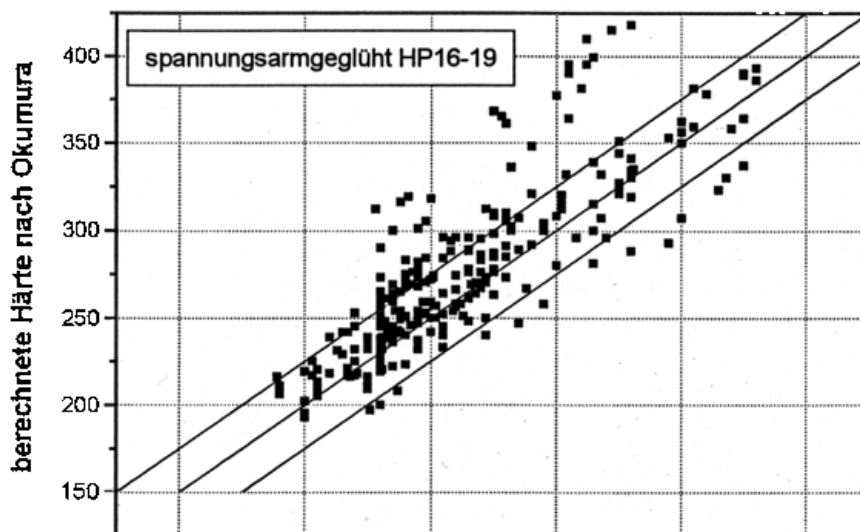


Bild 7 : Vergleich der gemessenen und der nach Okumura berechneten Härte (spannungsarmgeglüht)

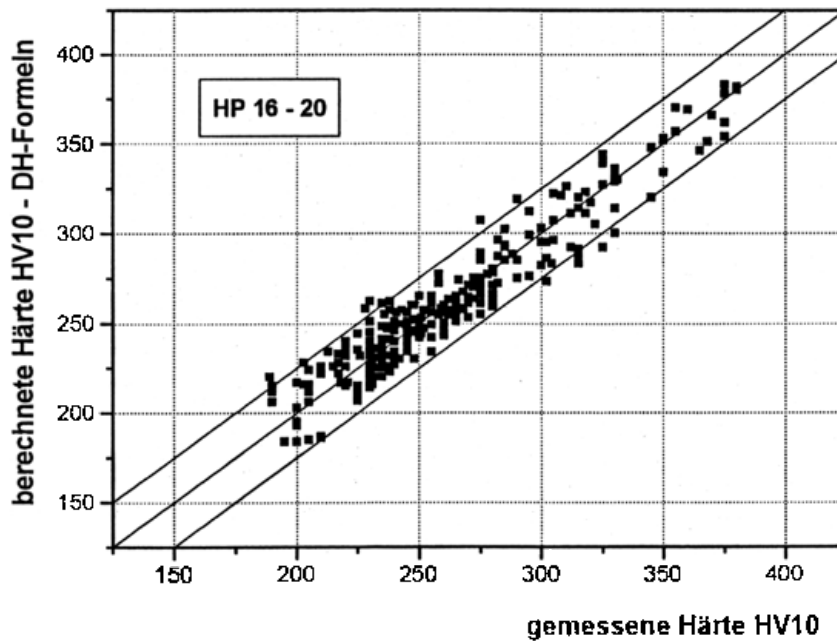


Bild 8 : Vergleich der gemessenen mit den nach eigenen Formeln berechneten Härte (spannungsarmgeglüht)

6. Zusammenfassung

Die metallkundlichen Zusammenhänge, die die Härte in der WEZ ferritischer Stähle beeinflussen, sind weitgehend bekannt; die Grundlagen wurden hier dargestellt.

Die WEZ-Härte lässt sich mit guter Genauigkeit berechnen. Die wesentlichen Größen sind:

- chemische Zusammensetzung des Stahles und
- Abkühlgeschwindigkeit (ausgedrückt durch die $t_{8/5}$ -Zeit)
- Bedingungen des Spannungsarmglühens

Leider begegnet man häufig überzogenen Härteeinschränkungen, die zu endlosen Diskussionen führen oder den Verarbeiter zu Maßnahmen zwingen, die nicht werkstoffgerecht sind. Eine tiefe WEZ-Härte ist nicht unbedingt ein Beweis für eine gute Schweißnaht - und umgekehrt.

Schrifttum:

- 1] STAHL-EISEN-Werstoffblatt (SEW) 088, Beiblatt 2 'Ermittlung der Abkühlzeit $t_{8/5}$ zur Kennzeichnung von Schweißtemperaturzyklen', (1993) Verlag Stahleisen, Düsseldorf
Düren, C.F.: 'Formulae for calculating the maximum hardness in the heat affected zone of welded joints', IIW-Doc.IX-1437-86, International Institute of Welding (1986)
- 3] Regnier, L.: 'Note sur le calcul des courbes dureté-paramètre de refroidissement', IRSID Raport 159 (1978)
- 4] Schmidtman, E., U. Zeiselmayer: 'Einfluß der thermischen Behandlung beim Schweißen auf das Auflösungs- und Ausscheidungsverhalten von Mikrolegierungselementen in der WEZ von Feinkornbaustählen', Arch. Eisenhüttenwesen 52(1981)10, S. 399-406
- 5] DIN EN 1043-Teil 1 (1995) - 'Härteprüfungen für Lichtbogenschweißverbindungen'
- 6] Mraz, L.: 'Hardness measurement in underbead HAZ of single pass welds', IIW-Doc. IX-1609-90 (1990)
- 7] DIN EN 288-Teil3 (1992) 'Schweißverfahrensprüfungen'
- 8] AD-Merkblätter Herstellung und Prüfung von Druckbehältern, HP 2/1 Verfahrensprüfung für Schweißverbindungen
- 9] Yourioka, N., M. Okumura: Measurement and prediction of HAZ hardness of low-carbon low-alloy steels. IIW Doc. IX-B-161-88 (1988).
Holloman J.H, L.D. Jaffe: 'Time Temperature Relations in Tempering Steels', Trans Am Inst Min Met Engrs (1945) 126, S. 223
- 11] AFNOR NF A 36-200: 'Influence des traitements thermiques après soudage sur les propriétés mécaniques des aciers pour chaudières et appareils à pression' (1982)
- 12] Okumura, M. u.a.: 'Prediction of HAZ-hardness after PWHT', IIW-IIS conference: Les traitement thermiques de relaxation des constructions soudées en acier, proceedings Sofia, Bulgarien, S.61-68.
- 13] Hanus, F., J. Schütz: 'Herleitung einer verbesserten Formel zur Berechnung der Härte in der WEZ von Feinkornbaustählen und warmfesten ferritischen Stählen', DILLINGER HÜTTE – Stahlverarbeitungszentrum Bericht 01/97 (1997).