

# Besonderheiten beim Schweißen von hoch- und ultrahochfesten Feinkornstählen

P. Gerster, Ehingen

Hoch- und ultrahochfeste Feinkornstähle mit Streckgrenzen, mittlerweile bis zu 1300 N/mm<sup>2</sup>, verfügen dank moderner Stahl- und Walzwerktechnik über hervorragende Zähigkeitswerte, ein günstiges Verhalten beim Kaltumformen und eine gute Schweißbeignung. Stand früher vor allem der extreme Leichtbau im Vordergrund, so werden heute immer mehr auch aus wirtschaftlichen Gründen diese Stähle eingesetzt. In diesem Bericht werden Voraussetzungen für den Einsatz dieser Feinkornbaustähle, spezifische Verarbeitungsregeln wie Vorwärmung, Schweißen und Schweißzusätze, sowie Besonderheiten bei der Verarbeitung behandelt. Anwendungsbeispiele aus der Praxis mit Blick in die Zukunft runden diesen Vortrag ab.

## 1 Entwicklung der Stähle

Ständig steigende Anforderungen wie Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Zähigkeit, bis hin zu höchsten Festigkeitswerten bei guter Schweißbeignung, trieben die Entwicklung der Feinkornstähle immer weiter voran. Durch den Einsatz optimierter Sekundärmetallurgie, sowie der Vakuumentgasungstechnik, konnten die Gehalte unerwünschter Begleitelemente wie z. B. Schwefel, Phosphor, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff so weit reduziert werden, dass sich immer optimalere Werkstoffwerte einstellen ließen. Beispielsweise können heute Stähle mit definierten Schwefel- und Stickstoffgehalten von nur wenigen ppm hergestellt werden.

Heute wird bereits der wasservergütete Feinkornstahl mit einer Streckgrenze von 1300 N/mm<sup>2</sup> (S1300QL) im Mobilkranbau verwendet. Durch die Weiterentwicklung der thermomechanischen Walztechnik in Verbindung mit einer nachfolgenden Intensivkühlung und anschließender Anlassbehandlung bewegen sich neueste Entwicklungen bei TM-Stählen bis hin zu Streckgrenzen von 1100 N/mm<sup>2</sup>, Bild 1. Alle diese Stähle sind hochzäh und unter Beachtung von einschlägigen Verarbeitungsregeln gut schweißbar.

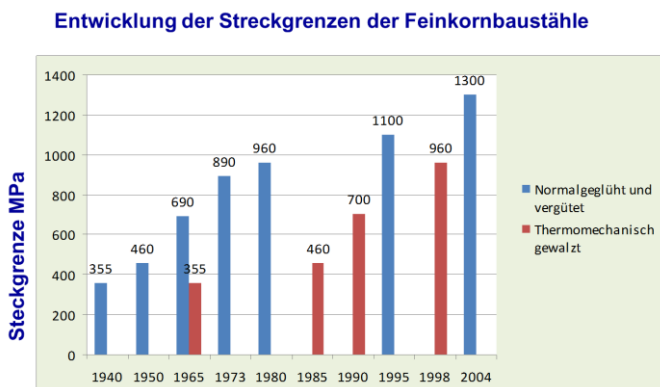


Bild 1. Stahlentwicklung (Quelle: DVS-Merkblatt 0916)

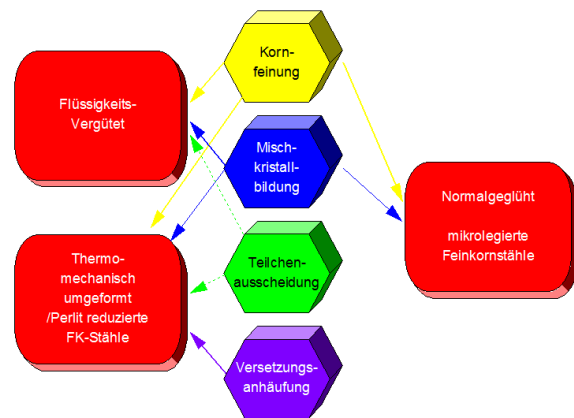


Bild 2. Methoden der Festigkeitssteigerung

Bei steigenden Festigkeiten ist die reine Mischkristallbildung bei C/Mn-Stählen nicht mehr einsetzbar, da die Grenzen der Schweißbarkeit schnell erreicht werden. In der weiteren Entwicklung wurden also andere festigkeitssteigernde Maßnahmen wie Kornfeinung, Teilchenausscheidung oder Versetzungsanhäufung einzeln oder in Kombination eingesetzt Bild 2 [1].

Die Herstellung der wasservergüteten Feinkornbaustähle ist Energie intensiv (Erwärmen nach dem Walzen auf Austenittemperatur, Abschrecken/Härten, Anlassen bei höheren Temperaturen), dementsprechend sind diese Stähle teuer. Von den Stahlverarbeitern kam deshalb die Forderung, Feinkornbaustähle zu entwickeln, die neben einer hohen Streckgrenze ein feinkörniges Gefüge, eine gute Zähigkeit besitzen, gut schweißbar und auch kostengünstiger sind.

Bei den thermomechanisch gewalzten Stählen (auch perlitarme Stähle, „PAS“ genannt) wird das feinkörnige Gefüge direkt beim Walzen ohne weitere Wärmenachbehandlung erzeugt. Hierbei wird ab einer bestimmten Blechdicke die Walztemperatur abgesenkt und somit die Rekristallisation unterbunden. Dadurch wird erreicht, dass am Ende der einzelnen Walzvorgänge ein feinkörniges Gefüge vorliegt. Beim Walzen im niedrigeren Temperaturbereich entstehen höhere Umformkräfte, dadurch werden die Walzgerüste höher beansprucht. Die Herstellung dieser Stähle beruht auf einer Kombination zwischen Umformvorgängen mit einer genauen Temperaturführung im Austenitgebiet. Diese Umformvorgänge finden in Form von mechanischen Walzprozessen vor, während, oder nach der  $\gamma$ - $\alpha$  Phasenumwandlung. Die Festigkeits- bzw. Zähigkeitseigenschaften werden durch eine Überlagerung der Feinkornbildung und der Ausscheidungshärtung erreicht.

Thermomechanisch gewalzte Stähle gibt es im Streckgrenzenbereich 260 bis 890 N/mm<sup>2</sup>. Ultrahochfeste Sorten bis zu 1100 N/mm<sup>2</sup> sind von bestimmten Stahlwerken bereits erhältlich.

Die Intensivkühlung mit Anlassbehandlung wird bei TM-Stählen bei höheren Festigkeiten ab  $R_p 0,2 > 700 \text{ N/mm}^2$  angewandt.

Im ultrahochfesten Bereich werden fast ausschließlich wasservergütete Feinkornstähle eingesetzt. Hierbei wird im vor allem im Mobilkranbereich aus Gewichtsgründen immer mehr der S1100QL und teilweise sogar der S1300QL verwendet. Bei diesen Stahltypen ist es jedoch besonders wichtig zur Erreichung der entsprechenden mechanisch-technologischen Eigenschaften die richtige Wärmeeinbringung zu wählen.

## 2 Wirtschaftliche Kriterien f. den Einsatz höherfester Stähle in Stahlkonstruktionen

Aufgrund des hohen Kosten- und Wettbewerbsdruckes sind besonders die Hersteller schweißintensiver Produkte gezwungen, ständig ihre Fertigungsprozesse zu optimieren und die Produktion leistungsfähiger zu gestalten. Der Schlüssel dazu ist die Umsetzung neuer Technologien und damit die Erhöhung der Produktivität, beispielsweise durch den Einsatz neuer Werkstoffe. Dabei sind bei Stahlbaukonstruktionen hochfeste Stähle unverzichtbar und werden sich auch in Zukunft vermehrt durchsetzen. Dies gilt auch für den bauaufsichtlichen Bereich [3], wo bisher, neben den normalen Baustählen, nur normalisierend gewalzte Stähle mit  $460 \text{ N/mm}^2$  Streckgrenze und vergütete Stähle mit  $690 \text{ N/mm}^2$  Streckgrenze zugelassen sind. Im Wesentlichen sind folgende Kriterien für den Einsatz hochfester Werkstoffe ausschlaggebend:

### 2.1 Erhöhung des Leistungsgewichtes Nutzlast / Eigengewicht

Durch den Einsatz höherer Streckgrenzen können insbesondere im Fahrzeugbau Energiekosten (Treibstoff) durch geringeres Eigengewicht eingespart werden. Im Mobilkransektor kann durch den Einsatz sogenannter Taxikrane, welche die Ausrüstung und das benötigte Gegengewicht am Fahrzeug transportieren, auf ein Begleitfahrzeug verzichtet werden. Außerdem werden Transportwege reduziert, da höhere Nutzlasten/Fahrzeug bewegt werden. Andererseits können höhere Nutzlasten bei gleichem Eigengewicht realisiert werden, was sich positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit auswirkt.

### 2.2 Verringerung der Material- und Fertigungskosten

Die Verwendung höherfester Werkstoffe führt zu einer der Streckgrenze proportionalen Verringerung der Blechdicke. Bild 3 zeigt beispielhaft die mögliche Kostenreduktion. Obwohl z.B. ein Stahl mit  $960 \text{ N/mm}^2$  Streckgrenze im

Einkauf ca. das Doppelte pro Tonne im Vergleich mit S355J2C kostet, fallen aufgrund des geringeren Gewichtes geringere Materialkosten an. Ein Vielfaches geringer ist dabei auch das einzubringende Schweißgut und die Laserschneidzeit wird deutlich verkürzt. Somit werden die anfallenden Lohnkosten deutlich reduziert.

Aufgrund des konstanten E-Moduls ist die elastische Durchbiegung der Konstruktion oft aus funktionsbedingten und / oder psychologischen Gründen (Kranausleger, Fahrwerke) begrenzt. So sind die Konstrukteure gefordert die nötige Steifigkeit über die Bauteilgestaltung zu realisieren. Die dabei erhöhten Kosten, z.B. durch mehr Versteifungsrippen müssen bei einer Wirtschaftlichkeitsrechnung gegen gerechnet werden.

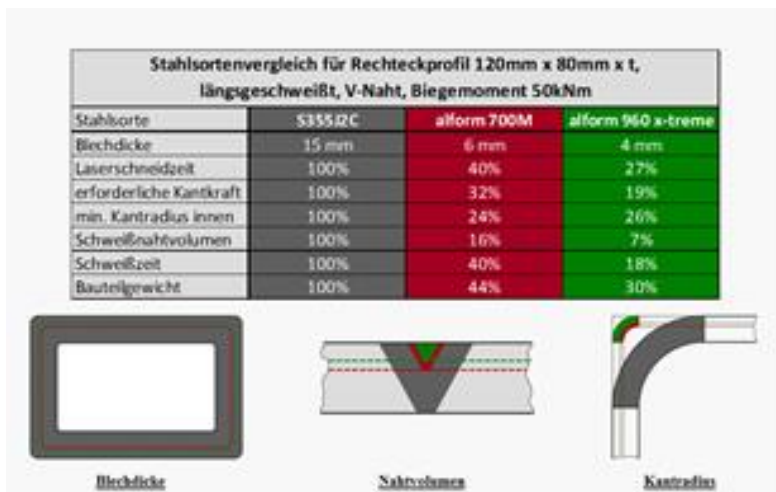


Bild 3. Kostenreduktion durch Leichtbau

Trotzdem sind aufgrund der höheren Leistungs- und Kostenvorteile höchstfeste Feinkornbaustähle nicht mehr wegzudenken. Die Herstellung moderner Mobil- und Raupenkrane mit Nutzlasten bis zu 3000 t und mehr ist ohne diese Werkstoffe nicht möglich.

## 3 DVS-Merkblatt 0916 „Metall-Schutzgasschweißen von Feinkornbaustählen“ und SEW 088

Dieses Merkblatt zum MAG-Schweißen von Stählen ist unter Mitwirkung der Anwender und Hersteller von Werkstoffen und Schweißzusatzwerkstoffen entstanden. Es enthält praxisnahe Anweisungen auf der Grundlage von der DIN EN 1011 Teil 1 und 2 sowie Stahl-Eisen-Werkstoffblatt (SEW) 088, die aufgrund ihrer metallurgischen und mechanisch-technologischen Eigenschaften unter besonderer Wärmeführung zu schweißen sind, insbesondere Feinkornbaustähle. Die Basis für die Wärmeführung beim Schweißen dieser Stähle finden Sie in dem Stahl-Eisen-Werkstoffblatt SEW 088 das neu überarbeitet wurde und im Oktober 2017 als 5. Ausgabe erschienen ist.

#### 4 Schweißzusätze nach DIN EN ISO Normen

Da von den Schweißzusätzen bzw. der Schweißverbindung in der Regel die gleichen mechanisch-technologischen Eigenschaften erwartet werden, wie beim Grundwerkstoff, müssen diese entsprechend der Festigkeitsklasse legiert sein. Bei Wurzellagen und einlagigen Kehlnähten findet eine Auflegung des Schweißgutes durch den Grundwerkstoff statt. Streckgrenze und Zugfestigkeit werden dadurch im Vergleich zum „reinen“ Schweißgut erhöht. Zum Heften hochfester Grundwerkstoffe werden erfahrungsgemäß Schweißzusätze mit geringerer Festigkeit verwendet. Die Anwendung „weicher“ Schweißzusätze wirkt sich hinsichtlich der Kaltrissicherheit vorteilhaft aus, sodass mit einer abgesenkten Vorwärmtemperatur bzw. je nach Randbedingungen häufig auch ohne Vorwärmung gearbeitet werden kann. Aufgrund der wesentlich höheren Bruchdehnung ist deshalb auch die Rissgefahr zusätzlich herabgesetzt (s. Punkt 7.1 DVS-Merkblatt 0916) .

Man verwendet deshalb, vor allem bei ultrahochfesten Stählen, für Wurzellagen und einlagige Kehlnähte üblicherweise niedriger legierte Schweißzusätze als für Füll- und Decklagen (s. Punkt 7.2 DVS-Merkblatt 0916 und 4.5.1 im SEW 088). Zum Beispiel kann für Wurzelschweißungen bei mehrlagigen Schweißnähten für die Festigkeitsbereiche S690 und höher bei Blechdicken  $\geq 14$  mm der Zusatzwerkstoff G4Si1 nach DIN EN ISO 14341-A eingesetzt werden.

**Tabelle 1.** DIN EN ISO-Normen für Kombinationen von Schweißzusätzen und Schweißverfahren.

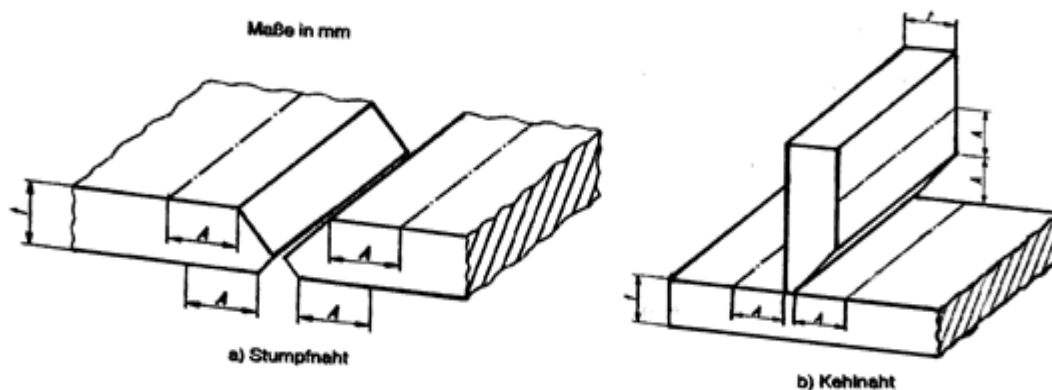
	<b>GAS</b>	<b>LBH</b>	<b>UP</b>	<b>WIG</b>	<b>MAG / MIG</b>	<b>MSG / FD</b>
<b>unleg. und Feinkornstähle</b>	DIN EN ISO 20378	DIN EN ISO 2560	DIN EN ISO 14171	DIN EN ISO 636	DIN EN ISO 14341	DIN EN ISO 17632
<b>hochfeste <math>Re &gt; 500</math> N/mm<sup>2</sup></b>		DIN EN ISO 18275	DIN EN ISO 26304	DIN EN ISO 16834		DIN EN ISO 18276
<b>Schutzgase / Pulver</b>			DIN EN ISO 14174	DIN EN ISO 14175		
<b>Lieferbedingungen</b>	DIN EN ISO 544					

Mittlerweile wurden alle relevanten EN Normen für diese Schweißzusätze durch internationale Normen ersetzt. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die neuen DIN EN ISO – Normen für Feinkornstähle in Abhängigkeit vom Schweißverfahren.

#### 5 Schweißtechnische Voraussetzungen

Beim Schweißen von Feinkornbaustählen sind unbedingt an jedem Arbeitsplatz Möglichkeiten für das Vorwärmen zu schaffen. In der **DIN EN ISO 13916** vom März.2018 [3] sind die verschiedenen Definitionen sowie Temperaturmesspunkte beschrieben. Hierbei wird zwischen Vorwärmtemperatur  $T_p$ , Zwischenlagentemperatur  $T_i$  und Halte-temperatur  $T_h$  unterschieden.

Die Kontrolle der Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur kann mit Temperaturmessstiften (TS), Kontaktthermometer (CT), digitalen Temperaturmessgeräten (TE) oder berührungslos messende optische oder elektrische Geräte (TB) erfolgen. Die Lage der Messpunkte ist in Bild 4 dargestellt.



**Bild 4.** Lage der Messpunkte:  $t \leq 50$ :  $A = 4x t$ , max.50 mm  $t > 50$ :  $A = 75$  mm

Nach **DIN EN 1011-2** gilt jedoch bei allen Dicken mindestens  $A= 75$  mm von der Nahtmitte

Vor Beginn der Schweißarbeiten ist der Nahtbereich zu säubern. Schneidenschlacke, Zunder und Rost sind dabei durch Bürsten, Schleifen oder am besten durch Strahlen zu entfernen. Durch Trocknen oder Vorwärmen ist außerdem sicherzustellen, dass der Nahtbereich feuchtigkeitsfrei ist.

## 6 Vermeidung von Kaltrissen

Kaltrisse treten in der Regel als Querrisse in der Schweißnaht auf und werden verursacht durch den Wasserstoffgehalt im Schweißgut (siehe Bilder 5 und 6). Ein wirksames Mittel zur Vermeidung ist das Vorwärmen. Es verzögert die Abkühlung des Nahtbereiches und begünstigt die Wasserstoffeffusion. Das Kaltrissverhalten von Stählen hat wesentlichen Einfluss auf die Schweißkosten. Es besteht deshalb großes Interesse, Stähle hinsichtlich ihres Kaltrissverhaltens einzustufen. In der DIN EN 1011-2 Ausgabe Mai 2001 sind im Anhang C zwei Methoden zur Vermeidung von Wasserstoffrissen in unlegierten Stählen, Feinkornbaustählen und niedriglegierten Stählen beschrieben:

### Methode A (C.2)

Hier wird das Kohlenstoffäquivalent CE zu Beurteilung herangezogen. Es lautet:

$$CE [\%] = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V) / 6 + (Ni + Cu) / 15$$

Dieses CE basiert auf der Härtebarkeit des Stahles und berücksichtigt weniger die Kaltrissempfindlichkeit der hochfesten Feinkornbaustähle.

Durch umfangreiche Untersuchungen zum Kaltrissverhalten von Stählen beim Schweißen der Fa. Thyssen hat sich das Kohlenstoffäquivalent CET ergeben. Dieses Konzept fand seinen Niederschlag im SEW 088 und wurde als Methode B übernommen.

### Methode B (C.3)

Spezielle Kaltrisstests auch an Schweißverbindungen [4] ermöglichen ein genaueres Bestimmen der notwendigen Vorwärmung durch das abgeleitete Kohlenstoffäquivalent CET. Es lautet:

$$CET [\%] = C + (Mn + Mo) / 10 + (Cr + Cu) / 20 + Ni / 40$$

Das Kaltrissverhalten von Schweißverbindungen wird außer von der chemischen Zusammensetzung des Grundwerkstoffes und des Schweißgutes CET auch von der Blechdicke  $d$ , dem Wasserstoffgehalt des Schweißgutes HD und dem Wärmeeinbringen  $Q$  beim Schweißen sowie dem Eigenspannungszustand der Verbindung maßgebend bestimmt.



Bild 5. Kaltrisse in der Schweißnaht

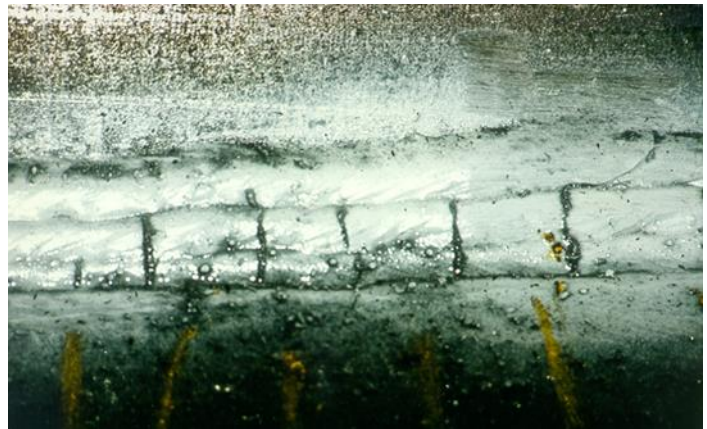


Bild 6. Kaltrisse in der zuletzt geschweißten Raupe

Ein Vergleich der verschiedenen genormten Verfahren zur Vermeidung von Kaltrissen finden Sie in der deutschen Fassung von CEN ISO/TR17844:2004.

Beim Auftreten von Kaltrissen stellt man immer wieder fest, dass zwar die richtige Vorwärmtemperatur gewählt, jedoch die tatsächliche Wärmeableitung am Bauteil nicht richtig eingeschätzt wurde. Zum einen muss die Vorwärmtemperatur in ausreichendem Abstand von der Schweißnaht gemessen werden, zum anderen muss natürlich an Stellen, wo mehrere Schweißnähte zusammentreffen und damit neben der höheren Wärmeableitung noch dreidimensionale Spannungszustände auftreten können, welche die Kaltrissbildung zusätzlich begünstigen, auch sorgfältiger vorgewärmt werden.

## 7 Mechanisch-technologische Eigenschaften

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Schweißverbindungen werden in erster Linie bestimmt durch die chemische Zusammensetzung von Stahl und Schweißgut sowie die beim Schweißen auftretenden Temperaturzyklen. Die wichtigsten Einflussgrößen bezüglich der Temperaturzyklen sind das Schweißverfahren, die Vor-



wärmtemperatur, die Streckenenergie sowie die Werkstückdicke und die Nahtgeometrie. Diese verfahrenstechnischen Einflussgrößen fasst man zu einer für den Temperatur-Zeit-Verlauf beim Schweißen charakteristischen Kenngröße, die **Abkühlzeit t 8/5** zusammen.

Eine zu schnelle Abkühlung der Schweißraupen aus dem Austenitgebiet wirkt sich ungünstig auf das Verformungsverhalten der Verbindung aus. Es besteht außerdem die Gefahr von Kaltrissen. Infolge des niedrigeren Wasserstoffgehaltes (HD ca. 2-3) beim MAG-Schweißen liegt die Mindestabkühlzeit t 8/5 zur Vermeidung von Kaltrissen hier bei 5 s.

Eine zu langsame Abkühlung der Schweißraupen aus dem Austenitgebiet hat dagegen zur Folge, dass die Festigkeitseigenschaften des Schweißgutes nicht mehr denen des Grundwerkstoffes entsprechen. Es besteht dabei außerdem die Gefahr, dass die WEZ eine zu niedrige Zähigkeit aufweist. Bei hochbeanspruchten Konstruktionen empfiehlt sich deshalb, die Abkühlzeit t 8/5 entsprechend nach oben zu begrenzen.

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften werden also hauptsächlich von t 8/5 beeinflusst.

## 8 Programm-Software für Schweißen in Zwangslagen und sehr dünnen Blechen

Beim Schweißen von Zwangslagen z.B. Steignacht hat man in der Regel beim Standard-Schweißverfahren sehr schnell das Problem zu hoher Wärmeinbringung. Aus diesem Grund ist es auch schwierig, die Streckgrenze von 960 MPa zu erreichen (siehe auch die Ergebnisse in Tabelle 2. Mittlerweile haben fast alle Gerätehersteller entsprechende Programme für ein wärmereduziertes Intervallschweißen zwischen 2 Arbeitspunkten (Hochstrom- und Niederstromphase ist frei einstellbar). Bei EWM nennt sich das Programm „Positionweld“. Damit ist es möglich z. B. Steignächte ohne die Tannenbaum-Technik problemlos zu schweißen. Das Liebherr-Werk in Ehingen hat deshalb umfangreiche Untersuchungen mit diesem Programm durchgeführt. Die Ergebnisse von diesen Vergleichsschweißungen sind in den Tabellen 2 und 3 dargestellt.

**Tabelle 2.** Mechanisch-technologischen Werte beim Standard-Programm (Quelle: Liebherr).

Name	Kennz.	BZ	Rp0,2 [MPa] OG: --- Soll: --- UG: 960,00	Rm [MPa] OG: 1140,00 Soll: --- UG: 980,00	A [%] OG: --- Soll: --- UG: 12,00	a [mm]	b [mm]	L0 [mm]
Test 1	mit Naht	WEZ - GW	935,88	1022,88	8,54	10,000	25,000	89,334
Test 2	mit Naht	WEZ - GW	911,40	1017,63	8,34	10,000	25,000	89,334
Test 3	mit Naht	WEZ - GW	907,66	1020,89	7,62	10,000	25,000	89,334
Test 4	eingeebnet	WEZ	898,10	1012,78	6,96	10,000	25,000	89,334
Test 5	eingeebnet	WEZ	908,31	1006,04	6,37	10,000	25,000	89,334

**Tabelle 3.** Mechanisch-technologischen Werte beim Positionweld-Programm (Quelle Liebherr).

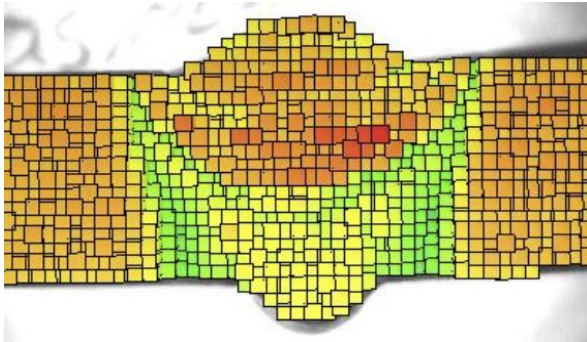
Name	Kennz.	BZ	Rp0,2 [MPa] OG: --- Soll: --- UG: 960,00	Rm [MPa] OG: 1140,00 Soll: --- UG: 980,00	A [%] OG: --- Soll: --- UG: 12,00	a [mm]	b [mm]	L0 [mm]
Test 4	eingeebnet	GW	968,17	1024,36	10,71	10,000	26,000	91,104
Test 5	eingeebnet	WEZ - GW	961,69	1022,60	9,55	10,000	26,000	91,104
Test 6	eingeebnet	GW	967,21	1024,75	10,79	10,000	26,000	91,104
Test 3	mit Naht	GW	977,69	1025,25	9,45	10,000	26,000	91,104
Test 2	mit Naht	GW	979,34	1027,53	10,17	10,000	26,000	91,104

Die Ergebnisse in den Tabellen zeigen deutlich, dass beim Positionweld-Schweißen die Mindeststreckgrenze des Grundwerkstoffes von 960 MPa gut erreicht werden. Die Brüche treten praktisch alle im Grundwerkstoff auf, während beim Standard-Schweißverfahren in der Steignacht die Werte nicht erreicht werden.

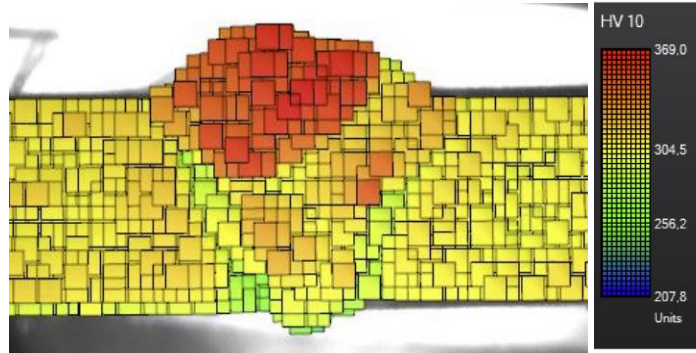
Aufgrund der geringeren Wärmeableitung lassen sich auch bei dünnen hochfesten Blechen z.B. 3mm die geforderten Streckgrenzenwerte mit dieser wärmereduzierten Schweißtechnologie sicher erreichen.

## 9 Härtemapping – eine elegante Methode der Härteabmessung

Neuere Härteprüfmaschinen können über eine bedienerfreundliche Software (z.B. KB HardWin XL) sehr elegant über ein engmaschiges Netz die Härtewerte vollautomatisch über einen Makroschliff einer kompletten Schweißverbindung sowohl zwei- als auch dreidimensional darstellen. Die automatische Auswertung misst auch unter schlechten Oberflächenbedingungen hochgenau.



**Bild 7.** Härteabmessung mit Standard-Verfahren geschweißt



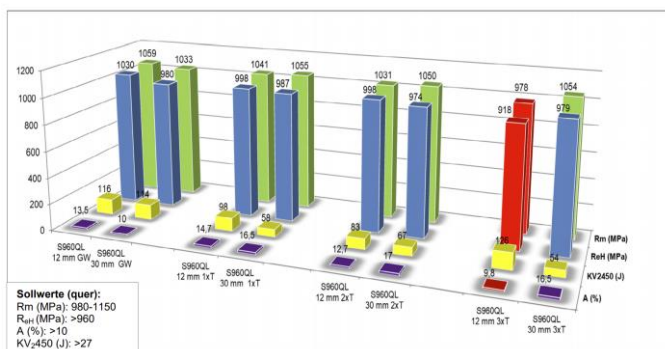
**Bild 8.** Härteabmessung Positionweld geschweißt (Quelle: Liebherr)

Bild 7 zeigt die Härteabmessung der kompletten Schweißverbindung mit dem Standard-Verfahren geschweißt. Deutlich ist die wesentlich größere Erweichungszone (grün) in der WEZ zu erkennen. Bild 8 zeigt die Härteabmessung der Schweißverbindung mit dem Programm „Positionweld“ geschweißt. Aufgrund der geringeren Wärmeeinbringung liegen die Härteabmessungen höher, als beim Standard-Schweißverfahren, was sich auch in den Festigkeitseigenschaften widerspiegelt (siehe vorhergehendes Kapitel).

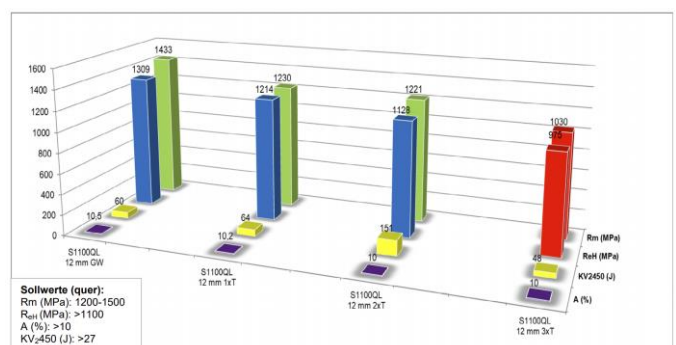
## 10 Flammrichten von ultrahochfesten Feinkornstählen

Das Thema Flammrichten dieser Stähle wird in der Praxis häufig sehr kontrovers diskutiert bis hin zur Ablehnung. Meine praktischen Erfahrungen und einige Untersuchungen in früheren Diplomarbeiten bestätigen jedoch, dass dies unter Beachtung einiger Regeln bezogen auf die Wärmeführung grundsätzlich möglich ist. Diese Stähle sind ja schweißbar und deshalb mit einer entsprechenden Abkühlzeit  $t_{8/5}$  (Wärmepunkte und -striche) ähnlich wie beim Schweißen auch flammrichtbar.

Diese Meinung wurde nun durch neuere Untersuchungen (Dissertation) von Dr.-Ing. Jörg Vogelsang von der GSI mbH in einem Vortrag auf der 14. Fachtagung „Fügen und Konstruieren im Schienenfahrzeugbau“ an der SLV Halle am 20.05.2021 unter dem Titel „Flammrichten von hochfesten vergüteten Baustählen der Güten S960QL und S1100QL. Was ist möglich und wie gut ist der Richterfolg“ bestätigt.



**Bild 9.** Kennwerte der flammgerichteten Proben S960QL (Quelle: Dr.-Ing. Vogelsang)



**Bild 10.** Kennwerte der flammgerichteten Proben S1100QL

Hierzu wurden Proben mit Werkstoffdicken von 10 und 20mm mit Flammrichtspurbreiten von ein- bis dreimal der Blechdicke gerichtet und anschließend die mechanisch-technologischen Gütebestimmungen bestimmt. Die mittels Thermographie ermittelten Maximaltemperaturen zeigen, dass bei der Durchführung der Flammrichtprozesse nach diesem Konzept die maximal gemessenen Temperaturen trotz eines manuellen Verfahrens 900 °C bei den durchgeführten Versuchen nicht überschritten haben. Eigene Versuche haben sogar bis zu Spitzentemperaturen von knapp über 1000 °C an der Oberfläche keinen negativen Einfluss gezeigt.

Als Fazit aus diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass bis zu einer Flammrichtspurbreite von 2xT aller Proben der untersuchten Blechdicken die normativ geforderten mechanischen Kennwerte der Querkzugproben (siehe Bilder 9 und 10).

## 11 Signifikante Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit durch HFH/MFMI-Verfahren

Gemäß dem heute noch gültigen Eurocode ist die Ermüdungsfestigkeit unabhängig von der Festigkeit des eingesetzten Materials. Dies bedeutet, dass ein hochfester Feinkornbaustahl bei Ermüdungsbeanspruchung keinen Vorteil gegenüber den klassischen Baustählen bietet. Mit der Entwicklung des höherfrequenten Hämmerns (HFH) als Schweißnahtnachbehandlung, international als HFMI „High Frequency Mechanical Impact“ bekannt, stellten die Wissenschaftler durch umfangreiche Eigenspannungsmessungen fest, dass durch die eingebrachten Druckeigenstressungen im Nahtübergang die Lebensdauer deutlich erhöht wird. In vielen nationalen und internationalen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit umso größer ist, je höher die Festigkeit des Grundwerkstoffs ist. Bereits im Oktober 2016 sind die IIW-Empfehlungen für das höherfrequente Hämmern zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit erschienen, und zwar unter dem Titel:

**„IIW Recommendations for the HFMI Treatment.**

**For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints.“**

(erschieden im Springer-Verlag Okt. 2016)

Da es schwierig und zeitraubend ist einen Eurocode zu ändern, hat man in Deutschland beschlossen, ein nationales Dokument in Form einer „DAST-Richtlinie für das Höherfrequente Hämmern“ zu entwickeln. Hierzu wurde von den Universitäten Stuttgart und Karlsruhe bereits vor 4 Jahren ein Forschungsvorhaben mit dem Ziel die Entwicklung einer DAST-Richtlinie für HFH-Verfahren beantragt und genehmigt bekommen. In 2019 erschien dann die Richtlinie mit dem Titel: **Ermüdungsbemessung bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren**

## 12 Zukunftsaussichten der hochfesten Stähle

Zahlreiche Untersuchungen der Universität Stuttgart (KE) und der Universität Karlsruhe (KIT) zeigen das große Potenzial der HFH (HFMI) Verfahren bis zu den ultrahochfesten Stählen S1100. Da es geplant ist, die nächste Normengeneration des Eurocode 3 den Teil 1.9 um einen Anhang „Fatigue design of welded joints subjected to High Frequency Mechanical Impact Treatment“ zu erweitern, haben die beiden Universitäten einen Forschungsantrag gestellt mit dem Thema:

*„Kerbfalleinstufung von HFH-nachbehandelten höchstfesten Baustählen unter Berücksichtigung geometrischer Fertigungsunperfektionen im Stahlbau“*

Ziel ist es, durch die Entwicklung immer höherfesterer Stähle, für die auch im Bauwesen viele potenzielle Anwendungsgebiete existieren, den Gültigkeitsbereich des Eurocode 3 in Teil 1-12 bis einschließlich der Stahlsorte S960 zu erweitern.

### Schrifttum

- [1] Dr. Geyer, Ing. Mag. Rauch, Dipl.-Ing. Schütz, VOEST-ALPINE Stahl Linz GmbH Hochfeste Feinkornstähle mit optimierten Verarbeitungseigenschaften Tagungsband zum Fortbildungsseminar für Schweißfachleute an der Schweißtechnischen Zentralanstalt in Wien,
  - [2] DIN EN 10149-1, Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen,
  - [3] DIN EN ISO 13916 Anleitung zur –Messung der Vorwärm-, Zwischenlagen- und Haltetemperatur
  - [4] DIN EN 1011 Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe Teil 1: Allgemeine Anleitung für das Lichtbogenschweißen (2009-07 ) Teil 2: Lichtbogenschweißen von ferritischen Werkstoffen (2001-05)
  - [5] SEW 088, Schweißgeeignete Feinkornbaustähle, Richtlinien für das Verhalten, besonders für das Schmelzschweißen, Oktober 2017, Stahl-Eisen-Werkstoffblatt (SEW) des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute.
  - [6] DVS-Merkblatt 0916: Metall-Schutzgasschweißen von Feinkornbaustählen 04-2012.
  - [7] IIW Recommendations for the HFMI Treatment. For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. Springer-Verlag 2016
  - [8] DAST-Richtlinie 026: Ermüdungsbemessung bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren Deutscher Ausschuss für Stahlbau 2019
-