

# Einfluss der Weichen Zone auf die mechanischen Eigenschaften hochfester Schweißverbindungen

- Maurer W.<sup>1</sup>, Ernst W.<sup>1</sup>, Rauch R.<sup>1</sup>, Vallant R.<sup>2</sup>, Enzinger N.<sup>2</sup>
- <sup>1</sup> voestalpine Stahl GmbH, voestalpine-Straße 3, 4031 Linz, Austria
- <sup>2</sup> TU Graz, Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, Kopernikugasse 24, 8010 Graz, Austria

## Kurzfassung

*Diese Untersuchung beschäftigt sich mit dem Thema der Weichen Zone, wie sie bei Schweißungen von hochfesten Feinkornbaustählen in der Wärmeeinflusszone (WEZ) auftreten kann. Das Hauptaugenmerk der Untersuchung lag dabei auf der Beeinflussung der quasi-statischen mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung, dabei kamen reale Schweißversuche und numerische Methoden zum Einsatz. Mit Hilfe der numerischen Methoden konnte eine unabhängige Variation und Bewertung der festigkeitswirksamen Einflussgrößen (Festigkeitsniveau des Schweißgutes, Festigkeitsniveau der WEZ, Breite der Weichen Zone,...) vorgenommen werden.*

## 1 Einleitung

Thermomechanisch gewalzte Feinkornbaustähle zeichnen sich durch eine besonders gute Schweißbeignung und Kaltumformbarkeit aus, wodurch sich ein breites Anwendungsgebiet (Kranbau, Stahlbau,...) für diese Stahlgruppe ergibt [1]. Es kann jedoch bei der schweißtechnischen Verarbeitung dieser Stähle in Abhängigkeit der Parameter zu örtlich beschränkter Erweichung im Bereich der WEZ kommen, welche die mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung beeinflussen kann. Diese Erweichung im Bereich der WEZ zeigt keine negativen Auswirkungen auf die globale Festigkeit bei einer Belastung quer zur Verbindung, wenn die Breite der Weichen Zone auf ein bestimmtes Maß begrenzt wird. Wallner et al. [2] definiert diese Breite, bei der eine äquivalente Festigkeit zum Grundwerkstoff erreicht wird, mit einem Viertel der Blechdicke des Grundwerkstoffes. Allerdings wird dabei vorausgesetzt, dass die Festigkeit des Schweißgutes mindestens der des Grundwerkstoffes entspricht. Der Grund für das Erreichen der äquivalenten Grundwerkstofffestigkeit liegt im Auftreten der sogenannten Stützeffekte. Es wird die plastische Verformung in der Weichen Zone von den Schichten mit höherer Festigkeit (Grundwerkstoff und Schweißgut) behindert [3]. Diese Behinderung wirkt der lokalen Entfestigung entgegen und führt zum Erreichen von Verbindungsfestigkeiten, die über der Festigkeit des homogen erweichten Bereiches liegen. Der Abfall und die Größe der auftretenden Erweichung wird dabei beeinflusst von der chemischen Zusammensetzung, den Produktionsparametern, der Wärmeeinbringung bedingt durch den Schweißprozess und der auftretenden Abkühlrate der Schweißung, welche über die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  definiert ist [4]. Eine gesteigerte Abkühlzeit  $t_{8/5}$  senkt die Festigkeit bzw. Härte in der WEZ und im Schweißgut, wobei dies unabhängig vom aufgebrauchten Schweißprozess ist [5]. Der Einsatz eines Schweißgutes mit einer höheren Festigkeit als der Grundwerkstoff (Overmatching) erhöht ebenfalls die globale Festigkeit einer lokal erweichten Verbindung, da die

Stützwirkung aufgrund des Schweißgutes mit höherer Festigkeit erhöht wird. Die höhere Festigkeit im Schweißgut bewirkt eine Verlagerung der Dehnungskonzentration und der Einschnürung in den unbeeinflussten Grundwerkstoff, vorausgesetzt die Breite der Weichen Zone überschreitet nicht ein bestimmtes Maß [6]. Satoh et al. [7] definiert das Verhältnis Blechbreite zu Blechdicke als weitere Einflussgröße, die sich auf die Festigkeit einer Schweißverbindung ausüben kann. Ein großes Verhältnis von Blechbreite zu Blechdicke wirkt sich positiv auf die Festigkeit aus, da die Dehnungen in Richtung der Blechbreite praktisch vernachlässigt werden können.

Im Anschluss sind die Faktoren nochmals zusammen gefasst, welche die quasi-statische Festigkeit einer Schweißverbindung beeinflussen:

- Breite der Weichen Zone
- Verhältnis von Blechbreite zu Blechdicke
- Abfall der Festigkeit in der Weichen Zone
- Schweißgutfestigkeit
- Lokale Orientierung der Weichen Zone in Hinblick auf die Belastungsrichtung

Die folgende Studie wurde mit einem thermomechanisch gewalzten Warmband mit der Normbezeichnung S 700MC laut DIN EN 10149-2 [8] durchgeführt, wobei das Hauptaugenmerk der Untersuchung auf der lokalen Erweichung in der WEZ und deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften lag. Aus diesem Grund kamen MAG-Schweißversuche mit Variation der Schweißparameter und -zusätze zum Einsatz. Für eine objektive Beurteilung der zuvor angeführten festigkeitswirksamen Einflussgrößen einer Schweißverbindung wurde auf numerische Verfahren zurückgegriffen. Mit Hilfe der FE-Methode können alle der angeführten Faktoren unabhängig voneinander systematisch variiert werden. Dadurch wird eine Evaluierung der Faktoren nach Größe des Einflusses auf die Festigkeit der Verbindung möglich. Die Eingabeparameter für die FE-Simulation wurden mittels einer physikalischen WEZ-

Simulation des Grundwerkstoffes ermittelt. Die Ergebnisse wurden im Anschluss mit statistischen Methoden ausgewertet, um eine Beurteilung unabhängig von der Interaktion zwischen den Einflussgrößen durchführen zu können.

## 2 Experimentelle Herangehensweise

Die experimentelle Herangehensweise besteht dabei aus den realen Schweißversuchen und der numerischen Simulation.

### 2.1 Grundwerkstoff

Für die Schweißversuche wurde ein niedriglegierter hochfester thermomechanisch gewalzter Stahl S 700MC laut DIN EN 10149-2 [8] mit einer Blechdicke von 6mm verwendet. Der Werkstoff ist mit Ti und Nb mikrolegiert und weist aufgrund seines geringen Kohlenstoffäquivalentes eine ausgezeichnete Schweißbarkeit auf. Die hohe Festigkeit wird dabei durch Kornverfeinerung und Ausscheidungshärtung und in geringen Maßen durch Umwandlungshärtung erzielt. Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Eigenschaften sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des S 700MC laut DIN EN 10149-2

C	Mn	Si	Nb <sup>1)</sup>	Ti <sup>1)</sup>	V <sup>1)</sup>	Mo	B
< 0.12	< 2.10	< 0.60	< 0.09	< 0.22	< 0.20	< 0.50	< 0.005

<sup>1)</sup> Nb + Ti + V < 0.22

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften des S 700MC

Mechanische Eigenschaften Grundwerkstoff		
Dehngrenze R <sub>p0.2</sub> [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Gleichmaßdehnung [%]
854	821	8.7

Die mechanischen Eigenschaften wurden an Normproben laut Norm DIN EN ISO 6892-1 [9] quer zur Walzrichtung bestimmt.

### 2.2 Schweißzusatz

Für die Schweißversuche wurden drei verschiedene Zusatzwerkstoffen verwendet um unterschiedliche Matching-Verhältnisse zu realisieren. Das Matching-Verhältnis bezieht sich dabei auf die Zugfestigkeit des Schweißgutes bzw. des Grundwerkstoffes. Es wurden einerseits Zusatzwerkstoffe für hochfeste niedriglegierte Stähle (Zusatz A, Zusatz B) verwendet, andererseits wurde für die Realisierung von höheren Matching-Verhältnissen aufgrund der Aufmischung mit dem Grundwerkstoff auf einen hochlegierten Schweißzusatz (Zusatz C) zurückgegriffen. Bei den angeführten Zusatzwerkstoffen handelt es sich um Massivdrähte mit einem Durchmesser von 1,2 mm. Die chemische Zusammensetzung und die mechanischen Kennwerte wurden aus den Datenblättern der Schweißguthersteller entnommen (Tabelle 3 und Tabelle 4).

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung Schweißzusätze

Chemische Zusammensetzung (Analyse in Masse-%)						
Chemische Elemente	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Zusatz A <sup>1)</sup>	0,1	0,8	1,8	0,35	2,25	0,6
Zusatz B <sup>2)</sup>	0,09	0,7	1,7	0,3	1,85	0,6
Zusatz C <sup>3)</sup>	0,01	0,65	0,7	12,2	4,8	0,5

<sup>1)</sup> Massivdraht G 89 6 M Mn4Ni2CrMo nach Norm DIN EN ISO 16834 [10]  
<sup>2)</sup> Massivdraht G 79 5 M Mn4Ni1,5CrMo nach Norm DIN EN ISO 16834 [10]  
<sup>3)</sup> Massivdraht G 13 4 nach Norm DIN EN ISO 14343-A [11]

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften Schweißzusätze

Mechanische Eigenschaften			
	Streckgrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
	Re [MPa]	[MPa]	[%]
Zusatz A	915	960	20
Zusatz B	770	880	16
Zusatz C	950	1210	12

### 2.3 Schweißungen

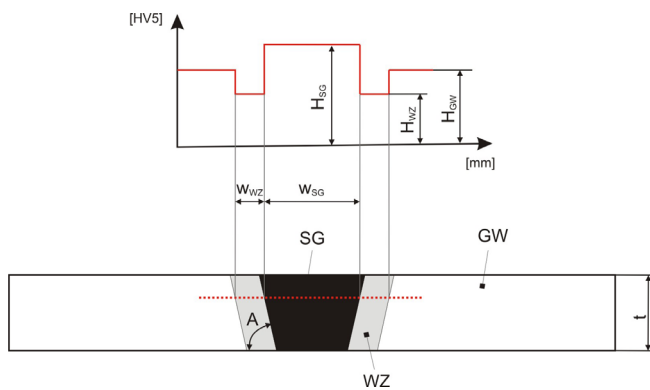
Für die Schweißungen kam das Metallaktivgasschweißen zur Anwendung, dabei diente ein Mischgas mit der Normbezeichnung M21 laut DIN EN ISO 14175 [12] als Schutzgas. Darüber hinaus kam eine gepulste Gleichstromquelle mit einem Linearfahrwerk für den Schweißbrenner zum Einsatz. Die Schweißparameter wurden bei den Versuchsschweißungen variiert, um unterschiedliche Ausprägungen und mechanische Eigenschaften in der WEZ und im Schweißgut zu erzielen. Dabei wurde die Streckenergie in den Grenzen zwischen 0,56 und 2,68 kJ/mm verändert, um unterschiedliche Energieeinträge in den Werkstoff zu simulieren.

### 2.4 FE-Modell

Für die numerische Simulation kam ein einfaches Modell einer Schweißverbindung zum Einsatz, wobei die Verbindung auf drei Zonen (Grundwerkstoff, WEZ, Schweißgut) mit unterschiedlichen Materialeigenschaften vereinfacht wurde. In Abbildung 1 ist das vereinfachte FE-Modell angeführt. Neben den Materialeigenschaften in den unterschiedlichen Zonen wurden die Breiten der einzelnen Zonen und zusätzlich der Schweißgutflankenwinkel A variiert. Somit sollte der Einfluss der unten angeführten Parameter auf die globale Festigkeit der Schweißverbindung untersucht werden, wobei mit Hilfe der Simulation die Faktoren unabhängig voneinander beeinflusst werden können.

Die Eingabedaten für die FE-Simulation in Form von Fließkurven der WEZ wurden mit Hilfe der physikalischen WEZ Simulation generiert, dabei kam der Feinkornzyklus mit einer Spitzentemperatur von 950°C zur Anwendung, da dieser den größten Festigkeitsabfall über sämtliche Abkühlzeiten  $t_{8/5}$  aufwies. Um die Festigkeit dieser Zone im FE-Modell zu beeinflussen,

wurde die Abkühlzeit  $t_{8/5}$  in der physikalischen WEZ- Simulation variiert, wodurch sich unterschiedliche Festigkeitsniveaus der Fließkurven realisieren ließen. Die Fließkurve für das Schweißgut wurde mit Hilfe einer Sonderzugprobe aus dem Schweißgut (Zusatz A) bei einer mittleren Abkühlzeit  $t_{8/5}=15s$  ermittelt. Die Variation der Fließkurvenfestigkeit wurde per Multiplikation mit einem konstanten Faktor durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der numerischen Simulation inklusive der Bestimmung der Eingabeparameter und der Verifikation der Untersuchungsmethode mit Realschweißungen wurde von Maurer et al. [13] bei der Tagung „10<sup>th</sup> International Seminar Numerical Analysis of Weldability“ vorgestellt.



Relative WZ Festigkeit:

$$S_{WZ} = \frac{H_{WZ}}{H_{GW}}$$

Relative WZ Breite:

$$X_{WZ} = \frac{w_{WZ}}{t}$$

Relative SG Festigkeit:

$$S_{SG} = \frac{H_{SG}}{H_{GW}}$$

Relative SG Breite:

$$X_{SG} = \frac{w_{SG}}{t}$$

Abbildung 1: FE- Modell einer vereinfachten Schweißverbindung

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Schweißversuche

In Abbildung 2 und Abbildung 3 wurden Härtemappings von Schweißungen (Zusatz A) mit unterschiedlichen Wärmeeinbringungen (Streckenenergien) angeführt. Es ist eine deutlich unterschiedlich große Ausbildung der Weichen Zone in der WEZ erkennbar. Unter der Berücksichtigung der unterschiedlichen Maßstäbe (Härte HV1) lässt sich das niedrigere Härteniveau (Festigkeitsniveau) bei größerer Wärmeeinbringung feststellen. Mit Hilfe der Mappings bzw. von zwei Härtespuren über die Verbindung wurde die Ausdehnung der Weichen Zone ermittelt, um die festigkeitswirksame Beeinflussung dieser lokalen Erweichung beschreiben zu können.

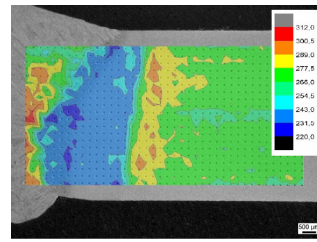


Abbildung 2: Härtemapping Zusatz A, effektive Streckenenergie 0,75 kJ/mm

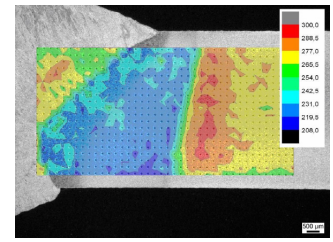


Abbildung 3: Härtemapping Zusatz A, effektive Streckenenergie 1,38 kJ/mm

Der Einfluss der Erweichung auf die quasi- statische Festigkeit einer Verbindung in Abhängigkeit der Breite der WEZ und der Festigkeit des Schweißgutes wurde in Abbildung 4 angeführt. Für eine unabhängige Darstellung vom Grundwerkstoff und der Blechdicke wurde auf Relativgrößen zurückgegriffen. Die Schweißzusätze A und B besitzen bei kurzen Abkühlzeiten  $t_{8/5}$  eine leicht Overmatching-Charakteristik (Festigkeit des Schweißgutes liegt über der des Grundwerkstoffes), bei längeren Abkühlzeiten  $t_{8/5}$  wird dasselbe Festigkeitsniveau des Grundwerkstoffes (Evenmatching) erreicht. Der Zusatz C weist im Gegensatz dazu starkes Overmatching auf. Bei der Betrachtung der Verbindungsfestigkeit zeigt sich, der zu erwartende Abfall der Festigkeit mit steigender Breite der Weichen Zone. Das Festigkeitsniveau einer vollständig homogenen Erweichung wird jedoch auch bei sehr langen Abkühlzeiten  $t_{8/5}$  (große Wärmeeinbringung) übertroffen. Mit Hilfe einer hohen Schweißgutfestigkeit (Zusatz C) kann bei konstanter WZ Breite eine höhere Festigkeit in der Verbindung erzielt werden, da die hohe Schweißgutfestigkeit eine höhere Stützwirkung auf den erweichten Bereich ausübt. Damit kann im Falle von hohem Overmatching (Zusatz C), die absolute Breite der WZ ca. die Hälfte der Blechdicke (relative WZ Breite  $X_{WZ}=0,5$ ) betragen und es wird immer noch eine dem Grundwerkstoff äquivalente Festigkeit erreicht. Im Gegensatz dazu beträgt die absolute Breite der WZ mit äquivalenter Festigkeit zum Grundwerkstoff bei leichtem Overmatching und Evenmatching nur mehr ein Viertel der Blechdicke (relative WZ Breite  $X_{WZ}=0,25$ ). Bei der verwendeten Blechdicken (6mm) beträgt die relative WZ Breite bei der Anwendung von praxisüblichen Parametern zwischen 0,3 und 0,7. Daraus ergibt sich bei Verwendung eines Evenmatching- Schweißgutes ein Abfall der Verbindungsfestigkeit um 7% im Vergleich zum unbeeinflussten Grundwerkstoff. Die laut DIN EN 10149 (8) geforderte Mindestzugfestigkeit für den unbeeinflussten Grundwerkstoff wird in der Verbindung nur bei sehr großer Erweichung ( $X_{WZ} = ca. 1,25$ ) in WEZ mit Zusatz A unterschritten. Dabei muss jedoch angemerkt werden, dass die Wärmeeinbringung bei diesem Versuch für MAG-Schweißungen gezielt hoch angesetzt wurde (gemessene Abkühlzeit  $t_{8/5}$  größer 40s) und außerhalb des empfohlenen Verarbeitungsfenster (Abkühlzeit  $t_{8/5}$  zwischen 5s und 25s) lag.

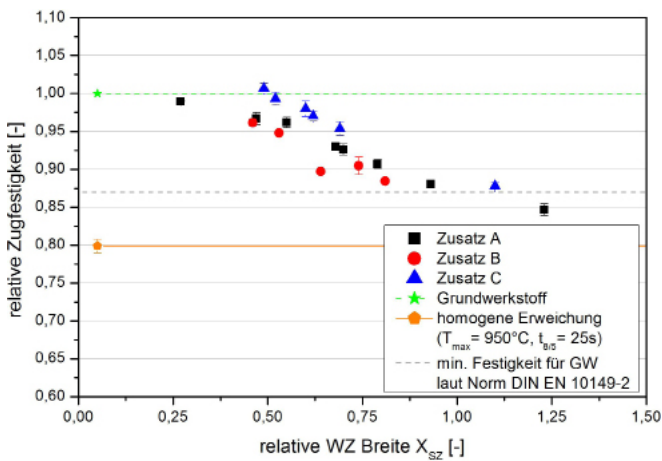


Abbildung 4: Relative Festigkeit der Schweißverbindung

### 3.2 Numerische Simulation

In der numerischen Simulation wurde eine unabhängige Variation der einzelnen Variablen durchgeführt, um deren Auswirkung auf die globale Festigkeit der Verbindung zu ermitteln.

In Abbildung 5 wurde der Einfluss des Festigkeitsniveaus SWZ in der Weichen Zone dargestellt. Im Falle der angeführten relativen WZ Breite ( $X_{WZ}=0,4$ ) erhöht eine Steigerung der WZ Festigkeit um 10% die globale Festigkeit in einer linearen Abhängigkeit lediglich um 3%. Daraus lässt sich ableiten, dass im angegebenen Bereich ( $X_{WZ} = 0,4 / S_{SG} = 1,0 / X_{SG} = 0,66 / A = 90^\circ$ ) das Festigkeitsniveau der WZ nur eine untergeordnete Rolle einnimmt.

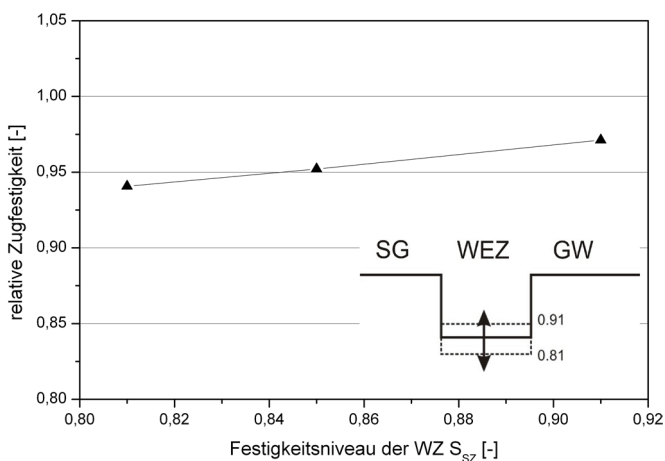


Abbildung 5: Einfluss der WZ Festigkeit auf die relative Zugfestigkeit,  $X_{WZ} = 0,4 / S_{SG} = 1,0 / X_{SG} = 0,66 / A = 90^\circ$

Die relative WZ Breite übt einen sehr großen Einfluss auf die globale Festigkeit aus (Abbildung 6). Die Verbindungsfestigkeit fällt sehr stark mit größer werdender relativer WZ Breite ab. Des Weiteren lässt sich eine Interaktion zwischen WZ Festigkeitsniveau und WZ Breite feststellen, da der Einfluss des WZ Festigkeitsniveaus bei größer werdender WZ Breite stark zunimmt.

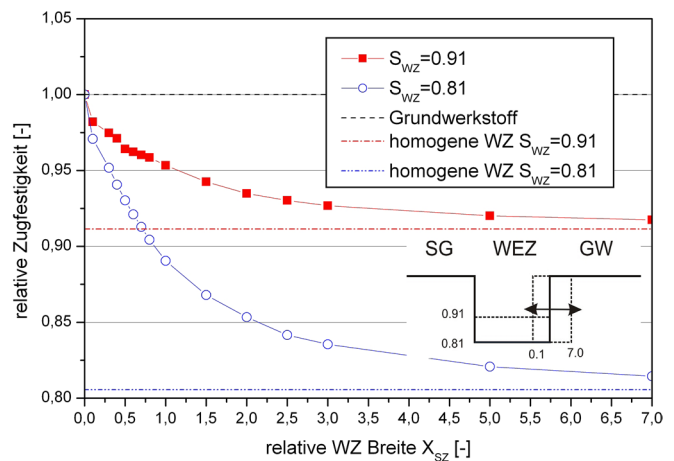


Abbildung 6: Einfluss der relativen WZ Breite auf die relative Zugfestigkeit,  $S_{SG} = 1,0 / X_{SG} = 0,66 / A = 90^\circ$

Abbildung 7 zeigt den Einfluss der Schweißgutfestigkeit auf die globale Festigkeit der Verbindung, die Verbindungsfestigkeit steigt in einer Art Wurzelfunktion mit zunehmender Schweißgutfestigkeit. Bei kleinen relativen WZ Breiten und hohen Schweißgutfestigkeiten (Overmatching) werden Festigkeiten ähnliche dem Grundwerkstoff erreicht.

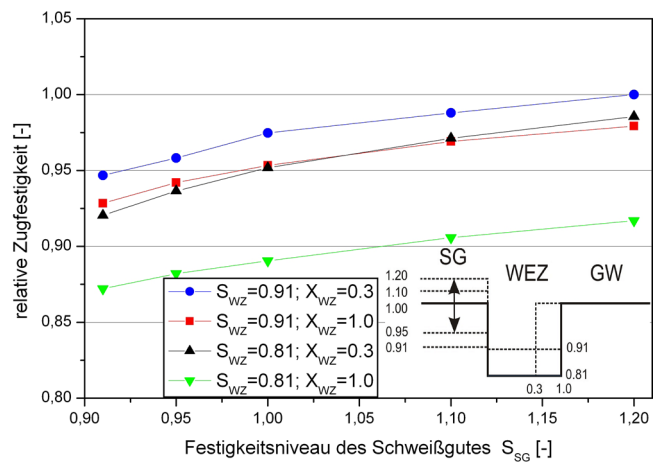


Abbildung 7: Einfluss des Festigkeitsniveau des SG auf die relative Zugfestigkeit,  $X_{SG} = 0,66 / A = 90^\circ$

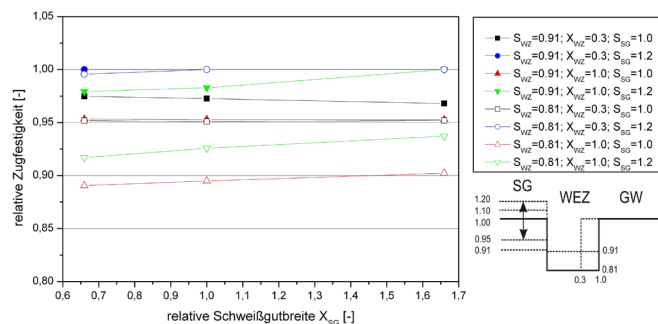


Abbildung 8: Einfluss der relativen Schweißgutbreite auf die relative Zugfestigkeit,  $A = 90^\circ$

In Abbildung 8 wurde der Einfluss der Schweißgutbreite dargestellt, es zeigte sich dabei kein Einfluss der Schweißgutbreite auf die Verbindungsfestigkeit. Dieses Ergebnis korreliert mit den Erkenntnissen von Mochizuki et al. [6], der eine ähnliche numerische Untersuchung durchführte und auch feststellte, dass die Schweißgutbreite in der praxisüblichen Ausmaßen keinen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit hat.

Der Schweißgutflankenwinkel zeigt ebenfalls kaum einen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit (Abbildung 9), somit sollte die Nahtform bei einlagigen Verbindungen (I- und V-Naht) ebenso keinen signifikanten Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit ausüben.

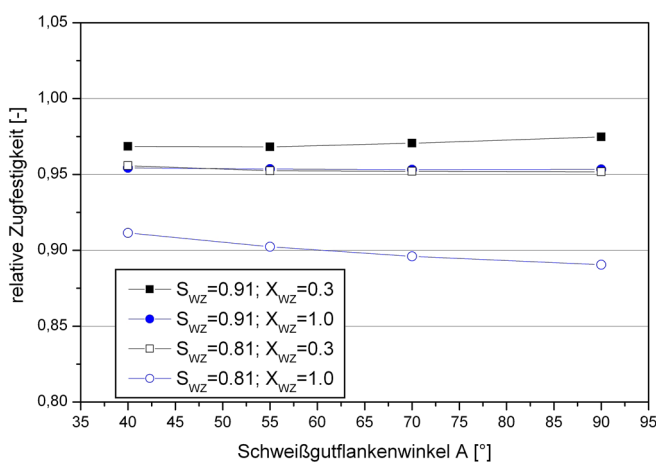


Abbildung 9: Einfluss des Schweißgutflankenwinkels auf die relative Zugfestigkeit,  $S_{SG} = 1,0 / X_{SG} = 0,66$

In den zuvor angeführten Abbildungen wurde der Einfluss der unterschiedlichen Schweißnahtparameter dargestellt, jedoch ist es aufgrund Interaktionen sehr schwer möglich eine Aussage über die Größe eines Einflusses zu treffen. Aus diesem Grund wurden statistische Methoden zur Hilfe genommen und eine Paretoanalyse der Einflussgrößen durchgeführt. Die Paretoanalyse ergab dabei die folgende Reihung der Einflussgrößen. Die Reihung erfolgte nach der Größe des Einflusses auf die Verbindungsfestigkeit:

- Breite der Weichen Zone
- Festigkeitsniveau der Weichen Zone
- Festigkeitsniveau des Schweißgutes
- Schweißgutflankenwinkel

Im Falle des Schweißgutflankenwinkels wurde festgestellt, dass dieser Einflussfaktor an der Signifikanzgrenze liegt. Die Schweißgutbreite wurde bei der Paretoanalyse nicht berücksichtigt, da bei den betrachteten Breiten mit keinem Einfluss zu rechnen ist.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

In der durchgeführten Untersuchung wurde das Phänomen einer möglichen lokalen Erweichung und deren Auswirkung

auf die quasi-statischen mechanischen Eigenschaften einer Verbindung untersucht. Dabei kamen sowohl Realschweißungen als auch numerische Methoden zum Einsatz. Die Ergebnisse bei den Realschweißungen zeigten, dass eine begrenzte Erweichung (bzw. Wärmeinbringung) in der WEZ, keine bzw. nur marginale Auswirkung auf die Festigkeit der Verbindung im Vergleich zum Grundwerkstoff hat. Beim Einsatz von in der Praxis üblichen Schweißparametern sollte sich der Einfluss der Weichen Zone auf die quasi-statische Festigkeit der Verbindung in Grenzen halten und stellt somit bei der globalen Betrachtung der Verbindung kein Problem dar. Die Verwendung eines overmatching Schweißgutes im Vergleich zu evenmatching führt zur Erreichung eines höheren Festigkeitsniveaus in der Verbindung, so kann die WZ Breite bei der die äquivalente Festigkeit des Grundwerkstoffes erreicht wird doppelt so groß sein als bei der Verwendung eines evenmatched Schweißgutes. Mit Hilfe der numerischen Simulation ließ sich eine Gewichtung der Einflussgrößen durchführen, dabei zeigte sich, dass die WZ Breite den größten Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit ausübt. Darauf folgen das Festigkeitsniveau in der Weichen Zone und die Schweißgutfestigkeit. Der Einfluss des Schweißgutflankenwinkels und Schweißgutbreite kann in den betrachteten Grenzen vernachlässigt werden.

Ein zukünftiges Untersuchungsgebiet stellt die Betrachtung des Einflusses von lokalen Erweichungen auf die Schwingfestigkeit dar, dabei wird angestrebt eine lokale Erweichung mit einer gezielten Wärmebehandlung des Grundwerkstoffes zu generieren. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Vermeidung von Ungängen, wie sie bei realen Schweißungen häufig auftreten können.

#### 5 Literaturverzeichnis

- [1] Klein, Martin, et al., et al. Thermomechanically hot rolled high and ultra high strength steel grades - processing, properties and application. Materials Science Forum Vol. 500-501. 2005, S. 543-550.
- [2] Wallner, Felix, Schirnböck, R. und Rauch, Rudolf. Verbesserte und neue TM- Stähle für geschweißte Konstruktionen. Wien: Vortrag bei internationaler Tagung Wien 2000, 2000.
- [3] de Meester, B. The weldability of modern structural TMCP steels. ISIJ International. Vol. 37, 1997, Bd. No. 6.
- [4] Denys, R. The effect of HAZ softening on the fracture characteristics of modern steel weldments and the practical integrity of marine structures made by TMCP steels. Proc. EALMAT 89. Vol. 2, 1989.
- [5] Maurer, Wilhelm, et al., et al. Electron beam welding of a TMCP steel with 700 MPa yield strength. Welding in the world. No. 09-10 Vol. 56, 2012.
- [6] Mochizuki, M., Shintomi, T. und Hashimoto, Y. Analytical study on deformation and strength in HAZ-softened welded joints of fine-grained steels.

Welding in the world. No. 09-10, Vol. 48, 2004, Doc. IIW-1573-02.

- [7] Satoh, K. und Toyoda, M. Static strength of welded plates including soft interlayer under tension across a weld line. Transactions of the Japan welding society I. No. 2, 1970.
- [8] DIN EN 10149-2. Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen - Teil 2: Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle. Deutsche Fassung. 1995.
- [9] DIN EN ISO 6892-1. Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Deutsche Fassung, 2009.
- [10] DIN EN ISO 16834. Schweißzusätze - Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen. Deutsche Fassung, 2012.
- [11] DIN EN ISO 14343. Schweißzusätze - Drahtelektroden, Banelektroden, Drähte und Stäbe zum Lichtbogenschweißen von korrosionsbeständigen und hitzebeständigen Stählen. Deutsche Fassung, 2010.
- [12] DIN EN ISO 14175. Schweißzusätze - Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse. Deutsche Fassung, 2008.
- [13] Maurer, Wilhelm, et al., et al. Numerical simulation on the effect of HAZ softening on static tensile strength of HSLA steel welds. Konferenzband 10th International Seminar: Numerical Analysis of Weldability. Seggau, 2012.