# Neues Bewertungskonzept zur Charakterisierung des Temperatur-Zeit-Verlaufes bei höchstfesten Feinkornbaustählen

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

> vorgelegt von Diplom-Ingenieur (FH) Michael Drepper aus Ahlen

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Ulrich Dilthey Universitätsprofessor Dr.-Ing. Volker Wesling Universitätsprofessor Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Dezember 2008

**Michael Drepper** 

Neues Bewertungskonzept zur Charakterisierung des Temperatur-Zeit-Verlaufes bei höchstfesten Feinkornbaustählen

Aachener Berichte Fügetechnik

Aachener Berichte Fügetechnik Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen

Band 1/2009

Shaker Verlag

#### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2009)

Copyright Shaker Verlag 2009 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7922-6 ISSN 0943-9358

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9 Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

#### Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

Dem ehemaligen Direktor des Instituts, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Dilthey, danke ich für seine Bereitschaft, mir die Möglichkeit zur Promotion zu geben sowie der fachlichen Betreuung der Arbeit. Weiterhin möchte ich den Berichtern Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Dilthey, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling sowie dem jetzigen Direktor des Instituts Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen danken. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ing. Paul Beiss für die Übernahme des Vorsitzes.

Bei Herrn Dr.-Ing. Herbert Heuser von der Böhler Schweisstechnik Deutschland GmbH möchte ich mich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die wertvollen Anregungen bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem langjährigen Kollegen und Freund Herrn Dr.-Ing. Ivan Aretov für die außergewöhnliche Arbeitsatmosphäre und die fachlichen Diskussionen, die mir den Weg zu dieser Arbeit geebnet haben.

Herrn Dipl.-Ing. Stefan Longerich, Herrn Dipl.-Ing. Christoph Geffers, Frau Gertrud Baumann und im besonderen Maße Herrn Dr.-Ing. Lars Stein danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die konstruktiven Anmerkungen.

Mein Dank gilt ferner allen Kolleginnen und Kollegen des ISF für die langjährige Zusammenarbeit und Unterstützung, ohne die ein Erfolg dieser Arbeit nicht denkbar gewesen wäre.

Ich danke allen wissenschaftlichen Hilfskräften, Studien- und Diplomarbeitern, die einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben. Hier sind vor allem Herr Rahul Sharma, Herr Tino Dollberg sowie Herr Jonas Wutgen hervorzuheben.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir die Möglichkeit zur Promotion gegeben und mich auf meinem Lebensweg immer unterstützt und an mich geglaubt haben. Daher sei diese Arbeit ihnen gewidmet.

Vor allem danke ich meiner geliebten Freundin Julia Urthaler für die großartige Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis während des Verfassens dieser Arbeit.

#### Inhaltsverzeichnis

,

#### Table of contents

Inhaltsverzeichnis
AbbildungsverzeichnisII
TabellenverzeichnisIX
Formelzeichen und Abkürzungen
AbstractXVI
1. Einleitung
2. Stand der Technik
2.1. Hoch- und höchstfeste Baustähle
2.1.1. Entwicklung und metallkundliche Betrachtung
2.1.1.1. Stähle im normalgeglühten oder normalisierend gewalzten Zustand10
2.1.1.2. Stähle im thermomechanisch gewalzten Zustand10
2.1.1.3. Stähle im vergüteten Zustand1
2.1.2. Einsatzbereich
2.1.3. Schweißtechnische Verarbeitung16
2.2. Berechnung der Abkühlzeit t <sub>8/5</sub> 26
2.2.1. Differentialgleichung der Wärmeleitung2
2.2.2. Konzentrierte Quellen
2.2.3. Wärmeausbreitung im begrenzten Körper
2.2.4. Erwärmung durch schnell wandernde Hochleistungsquellen
2.2.5. Gleichung zur Abkühlzeit t <sub>8/5</sub>
3. Problemstellung und Zielsetzung
4. Versuchswerkstoffe4
4.1. Grundwerkstoffe4
4.2. Schweißzusatzwerkstoffe42
4.3. Schutzgase42
5. Versuchseinrichtungen
5.1. Schweißanlage44
5.2. Hilfseinrichtungen4
5.2.1. Balkenfahrwerk4
5.2.2. Einrichtung zur Vorwärmung4

5.3. Messtechnik	46
5.3.1. Messaufnehmer	46
5.3.1.1. Digital-Oszilloskop	46
5.3.1.2. Pyrometer	47
5.3.2. Messgrößen	48
5.3.2.1. Schweißspannung	48
5.3.2.2. Schweißstrom	48
5.3.2.3. Vorwärmtemperatur	48
5.3.2.4. Abkühlzeit	49
6. Untersuchung des t <sub>8/5</sub> -Konzeptes	53
6.1. Einfluss des werkstoffabhängigen Temperatur-Zeit-Verlaufes auf die	
Abkühlzeit t <sub>8/5</sub>	53
6.1.1. Betrachtung der Werkstoffe S960 und S1100	53
6.1.2. Betrachtung der Werkstoffe S235 und S355	72
6.2. Zusammenhang zwischen der Abkühlzeit t <sub>8/5</sub> und den mechanisch-	
technologischen Eigenschaften	75
6.3. Berechnung der Abkühlzeit $t_{8/5}$ nach DIN EN 1011-2	79
7. Untersuchungen zum neuen Bewertungskonzept	86
7.1. Abkühlzeit t <sub>8/4</sub>	87
7.2. Integrale Betrachtung der Abkühlzeit t <sub>8/4</sub>	90
7.3. Zusammenhang zwischen dem Integral $T_{8/4 \cdot 400^{\circ}\text{C}}$ und den mechanisch-	
technologischen Eigenschaften	99
7.4. Herleitung der analytischen Gleichung zum T <sub>8/4-400 °C</sub> -Konzept	102
7.4.1. Zweiseitig begrenzter Körper	103
7.4.1.1. Abkühlzeit t <sub>8/4</sub>	103
7.4.1.2. Integral T <sub>8/4-400 °C</sub>	108
7.4.2. Einseitig begrenzter Körper	113
7.4.2.1. Abkühlzeit t <sub>8/4</sub>	113
7.4.2.2. Integral T <sub>8/4-400 °C</sub>	120
7.4.3. Bewertung der analytischen Gleichungen zum T <sub>8/4-400 °C</sub> -Konzept	124
8. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse	127
9. Literaturverzeichnis	129

,

## Abbildungsverzeichnis

## List of figures

Abbildung 2-1:	Einfluss des Perlitgehaltes auf die Übergangstemperatur von Baustählen [BOES01]
Figure 2-1:	Influence of the pearlite content on the transition temperature of structural steels [BOES01]11
Abbildung 2-2: <i>Figure 2-2:</i>	Definition der Abkühlzeit t <sub>8/5</sub> im Temperatur-Zeit-Verlauf [DILT95] Definition of the cooling time t <sub>8/5</sub> at the temperature-time-sequences [DILT95]
Abbildung 2-3:	Abhängigkeit der Übergangstemperatur und der Härte von der Abkühlzeit t <sub>8/5</sub> [BOES01]
Figure 2-3:	Dependence of transition temperature and the hardness from the cooling time t <sub>8/5</sub> [BOES01]25
Abbildung 2-4: <i>Figure 2-4:</i>	Arten der Wärmeableitung beim Schweißen [DEGE85] Types of heat dissipation in welding [DEGE85]27
Abbildung 2-5:	Reflexion einer konzentrierten Quelle +Q im Punkt P' eines einseitig begrenzten Körpers z > 0 zur Grenzebene X0Y, die entweder Nulltemperatur hat (-Q) oder wärmeundurchlässig ist (+Q) [RYKA57]
Figure 2-5:	Reflection of a concentrated source +Q in point P' of a one-sidedly limited body $z > 0$ to the limit plane XOY which has either zero temperature (-Q) or which is heat impermeable (+Q) [RYKA57]30
Abbildung 2-6:	Einseitig begrenzter Körper mit wärmeundurchlässigem Raumelement [RYKA57]
Figure 2-6:	One-sidedly limited body with heat impermeable spatial element [RYKA57]
Abbildung 2-7:	Zweiseitig begrenzter Körper mit wärmeundurchlässigem Raumelement [RYKA57]
Figure 2-7:	Double-sidedly limited body with heat impermeable spatial element [RYKA57]
Abbildung 5-1: <i>Figure 5-1:</i>	Versuchsanlage <i>Test equipment</i> 44
Abbildung 5-2: <i>Figure 5-2:</i>	MSG-Schweißbrenner GMA welding torch45
Abbildung 5-3: <i>Figure 5-3:</i>	Digital-Oszilloskop Digital Oscilloscope

Abbildung 5-4: <i>Figure 5-4:</i>	Pyrometer Metis MI16 [SENS03] <i>Pyrometer Metis MI16 [SENS03]</i>	48
Abbildung 5-5: <i>Figure 5-5:</i>	Eingetauchtes Thermoelement <i>Dipped thermocouple</i>	49
Abbildung 5-6: <i>Figure 5-6:</i>	Eintauchbereich des Thermoelementes in das flüssige Schmelzbad Immersion zone of the thermocouple in the liquid molten pool	50
Abbildung 5-7:	Einfluss der Lage der Messpunkte auf die Messung der Abkühlzeit t <sub>8/5</sub>	
Figure 5-7:	Influence of the position of the measuring point on the cooling time $t_{\it 8/5}$	51
Abbildung 5-8:	Vergleich der Messungen des Temperaturverlaufes zwischen Pyrometer und Thermoelement (Versuch 1 005)	
Figure 5-8:	Comparsion of the measurement of the temperature sequence between pyrometer and thermocouple (Test 1 005)	52
Abbildung 6-1: <i>Figure 6-1:</i>	Probeblech für das Auftragschweißen Test sheet for deposition welding	54
Abbildung 6-2: <i>Figure 6-2:</i>	Versuchsbezeichnung Test designation	55
Abbildung 6-3:	Zusammenhang zwischen Streckenenergie E und gemessener Abkühlzeit t <sub>8/5</sub>	
Figure 6-3:	Connection between energy-per-unit length E and measured cooling time $t_{8/5}$	58
Abbildung 6-4:	Abweichungen der Streckenenergien E und der Abkühlzeiten t <sub>8/5</sub> zwischen dem S960 und S1100	
Figure 6-4:	Deviations of the energies-per-unit length E and the cooling times $t_{8/5}$ between the steels S960 and S1100	60
Abbildung 6-5:	Korrigierte Abweichungen der Abkühlzeiten t <sub>8/5</sub> zwischen dem S960 und S1100	
Figure 6-5:	Corrected deviations of the cooling time t <sub>8/5</sub> between the steels S960 and S1100	62
Abbildung 6-6:	Temperatur-Zeit-Verläufe der Auftragschweißungen auf den S960 und S1100	
Figure 6-6:	Temperature-time-sequences of the deposit welds on the steels S960 and S1100	63
Abbildung 6-7:	Verläufe der Abkühlgeschwindigkeit über die Temperatur der Auftragschweißungen auf den S960 und S1100	
Figure 6-7:	Sequences of the cooling time over the temperature of the deposit welds on S960 and S1100	64

Abbildung 6-8: <i>Figure 6-8:</i>	SZTU-Schaubild der Auftragschweißung auf den S960 WTTT-diagram of the deposit weld on S96066
Abbildung 6-9: <i>Figure 6-9:</i>	SZTU-Schaubild der Auftragschweißung auf den S1100 WTTT-diagram of the deposit weld on S110067
Abbildung 6-10: <i>Figure 6-10:</i>	SZTU-Schaubild eines S960 [SARH05] WTTT-diagram of the steel S960 [SARH05]68
Abbildung 6-11: <i>Figure 6-11:</i>	SZTU-Schaubild eines S1100 [SARH05] WTTT-diagram of the steel S1100 [SARH05]68
Abbildung 6-12: <i>Figure 6-12:</i>	Umwandlungstemperaturen beim S960 und S1100 <i>Transformation temperatures of S960 and S1100</i> 70
Abbildung 6-13:	Chemische Zusammensetzung der Auftragschweißungen auf den S960
Figure 6-13:	Chemical composition of the deposit welds on the S96071
Abbildung 6-14:	Chemische Zusammensetzung der Auftragschweißungen auf den S1100
Figure 6-14:	Chemical composition of the deposit welds on the S110071
Abbildung 6-15: <i>Figure 6-15:</i>	Umwandlungstemperaturen beim S235, S355, S960 und S1100 <i>Transformation temperatures of S235, S355, S960 and S1100</i> 73
Abbildung 6-16: <i>Figure 6-16:</i>	SZTU-Schaubild eines S235 [SEYF92] WTTT-diagram of the steel S235 [SEYF92]74
Abbildung 6-17: <i>Figure 6-17:</i>	SZTU-Schaubild eines S355 [SEYF92] WTTT-diagram of the steel S355 [SEYF92]75
Abbildung 6-18:	Lage des Prüfquerschnittes der Rundzugprobe in der Auftragschweißung
Figure 6-18:	Position of the test cross-section of the round tensile specimen at the deposit weld
Abbildung 6-19:	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> in Abhängigkeit zur gemessenen Abkühlzeit t <sub>8/5</sub> beim S960 und S1100
Figure 6-19:	Tensile strength $R_m$ as a function of the measured cooling time $t_{8/5}$ of S960 and S110077
Abbildung 6-20:	Temperatur-Zeit-Verläufe der Auftragschweißungen auf den S960
Figure 6-20:	Temperature-time-sequences of the deposit welds on S960
Abbildung 6-21:	Zugfestigkeit $R_m$ in Abhängigkeit zur Streckenenergie E beim S960 und S1100
Figure 6-21:	Tensile strength $R_m$ as a function of the energy-per-unit length E of S960 and S110079

Abbildung 6-22:	Temperaturverlauf des Versuchs 12640 (10 mm neben der Schweißraupe)		
Figure 6-22:	Temperature sequence of the test 12640 (10 mm besides the weld bead)		
Abbildung 6-23:	Temperaturverlauf des Versuchs 12660 (10mm neben der Schweißraupe)		
Figure 6-23:	<i>Temperature sequence of the test 12660 (10 mm besides the weld bead)</i> 82		
Abbildung 6-24:	Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abkühlzeiten t <sub>8/5</sub> beim S960		
Figure 6-24:	Comparison between calculated and measured cooling times t <sub>8/5</sub> of \$960		
Abbildung 6-25:	Abweichungen der berechneten zur gemessenen Abkühlzeit t <sub>8/5</sub> beim S960		
Figure 6-25:	Deviations between the calculated and the measured cooling time $t_{8/5}$ of S96084		
Abbildung 6-26:	Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Abkühlzeiten t <sub>8/5</sub> beim S1100		
Figure 6-26:	Comparison between calculated and measured cooling times t <sub>8/5</sub> of \$110084		
Abbildung 6-27:	Abweichungen der berechneten zur gemessenen Abkühlzeit t <sub>8/5</sub> beim S1100		
Figure 6-27:	Deviations between the calculated and the measured cooling time t <sub>8/5</sub> of S110085		
Abbildung 7-1:	Umwandlungstemperaturen beim S960 und S1100		
Figure 7-1:	Transformation temperatures of S960 and S110087		
Abbildung 7-2:	Funktioneller Zusammenhang zwischen der Streckenenergie E und der gemessenen Abkühlzeit t <sub>8/4</sub>		
Figure 7-2:	Functional connection between the energy-per-unit length E and the measured cooling time $t_{8/4}$		
Abbildung 7-3:	Korrigierte Abweichungen der Abkühlzeiten t <sub>8/5</sub> und der Abkühlzeiten t <sub>8/4</sub> zwischen dem S960 und S1100		
Figure 7-3:	Corrected deviations of the cooling time $t_{8/5}$ and the cooling time $t_{8/4}$ between S960 and S110089		
Abbildung 7-4:	Theoretischer Temperatur-Zeit-Verlauf eines zweiseitig begrenzten Körpers		
Figure 7-4:	Theoretical temperature-time-sequence of a double-sidedly limited body91		
Abbildung 7-5:	Integral einer Abkühlkurve in den Grenzen von $t_{800}$ bis $t_{400}$		
Figure 7-5:	Integral of a cooling curve within the limits of $t_{800}$ to $t_{400}$		

Abbildung 7-6:	Integral einer Abkühlkurve in den Grenzen von t <sub>800</sub> bis t <sub>400</sub> ohne die Fläche unterhalb von 400 ℃	
Figure 7-6:	Integral of a cooling curve within the limits of $t_{800}$ to $t_{400}$ without the area below 400 °C93	
Abbildung 7-7:	Theoretische Bewertung der integralen Betrachtung der Abkühlzeit t <sub>8/4</sub>	
Figure 7-7:	Theoretical evaluation of the integral consideration of the cooling time t <sub>8/4</sub> 95	
Abbildung 7-8:	Funktioneller Zusammenhang zwischen der Streckenenergie E und dem gemessenen Integral $T_{8/4-400^{\circ}C}$	
Figure 7-8:	Functional connection between the energy-per-unit length E and the measured integral $T_{8/4-400 \text{ C}}$ 97	
Abbildung 7-9:	Korrigierte Abweichungen der Abkühlzeiten t <sub>8/5</sub> , der Abkühlzeiten t <sub>8/4</sub> , der Integrale T <sub>8/4</sub> und der Integrale T <sub>8/4-400℃</sub> zwischen dem S960 und S1100	
Figure 7-9:	Corrected deviations of the cooling times $t_{8/5}$ , the cooling times $t_{8/4}$ , the integrals $T_{8/4}$ and the integrals $T_{8/4-400^\circ\!C}$ between S960 and S1100	
Abbildung 7-10:	Zugfestigkeit $R_m$ in Abhängigkeit zum Integral $T_{8/4\text{-}400\ensuremath{^{\circ}\!C}}$ beim S960 und S1100	
Figure 7-10:	Tensile strength $R_m$ as a function of the integral $T_{8/4-400^\circ\!\!C}$ of S960 and S1100100	
Abbildung 7-11: <i>Figure 7-11:</i>	Abweichungen zwischen den Versuchen 12255 und 12253 Deviations between the tests 12255 and 12253102	
Abbildung 7-12:	Linearer Zusammenhang zwischen Koeffizient $W_{1/400}$ und Streckenenergie E	
Figure 7-12:	Linear connection between coefficient $W_{1/400}$ and energy-per-unit length E107	
Abbildung 7-13:	Linearer Zusammenhang zwischen Koeffizient $W_{1/800}$ und Streckenenergie E	
Figure 7-13:	Linear connection between coefficient $W_{1/800}$ and energy-per-unit length E107	
Abbildung 7-14: <i>Figure 7-14:</i>	Linearer Zusammenhang zwischen Steigung $m_1$ und Temperatur T Linear connection between increase $m_1$ and temperature T110	
Abbildung 7-15:	Linearer Zusammenhang zwischen Achsenabschnitt $n_{1}$ und Temperatur T	
Figure 7-15:	Linear connection between axis section $n_1$ and temperature T110	
Abbildung 7-16:	Temperaturverlauf des Versuchs 12925 (10mm neben der Schweißraupe)	
Figure 7-16:	Temperature sequence of the test 12925 (10 mm besides the weld bead)116	

Abbildung 7-17:	Temperaturverlauf des Versuchs 12955 (10 mm neben der Schweißraupe)
Figure 7-17:	Temperature sequence of the test 12955 (10 mm besides the weld bead)116
Abbildung 7-18:	Linearer Zusammenhang zwischen Koeffizient $W_{\mbox{\tiny 2/400}}$ und Streckenenergie E
Figure 7-18:	Linear connection between coefficient W <sub>2/400</sub> and energy-per-unit length E
Abbildung 7-19:	Linearer Zusammenhang zwischen Koeffizient $W_{\mbox{\tiny 2/800}}$ und Streckenenergie E
Figure 7-19:	Linear connection between coefficient W <sub>2/800</sub> and energy-per-unit length E
Abbildung 7-20:	Linearer Zusammenhang zwischen Steigung m2 und Temperatur T
Figure 7-20:	Linear connection between increase $m_2$ and temperature T121
Abbildung 7-21:	Linearer Zusammenhang zwischen Achsenabschnitt $n_2$ und Temperatur T
Figure 7-21:	Linear connection between axis section $n_2$ and temperature T121
Abbildung 7-22:	Bewertung der analytischen Gleichungen zum T <sub>8/4-400 °C</sub> -Konzept (zweiseitig begrenzter Körper)
Figure 7-22:	Evaluation of the analytical equations for $T_{8/4-400}$ -concept (double-sidedly limited body)125
Abbildung 7-23:	Bewertung der analytischen Gleichungen zum T <sub>8/4-400 °C</sub> -Konzept (einseitig begrenzter Körper)
Figure 7-23:	Evaluation of the analytical equations for T <sub>8/4-400</sub> °C-concept (one-sidedly limited body)126

#### Tabellenverzeichnis

#### List of tables

Tabelle 2-1:	Übersicht der wichtigsten hoch- und höchstfesten Feinkornbaustähle für die schweißtechnische Verarbeitung	
Table 2-1:	Overview of the main high- and super high strength fine-grained structural steels for welding processing9	
Tabelle 2-2:	Grenzwert der Blechdicke in Abhängigkeit des Kohlenstoffäquivalentes	
Table 2-2:	Limit value of the plate thickness in dependence of the carbon equivalent20	
Tabelle 2-3: <i>Table 2-3:</i>	Thermischer Wirkungsgrad der Schweißverfahren [UWER76] Thermal efficiency of the welding processes [UWER76]	
Tabelle 2-4: <i>Table 2-4:</i>	Nahtfaktoren [UWER77] <i>Weld seam factors [UWER77</i> ]38	
Tabelle 4-1: <i>Table 4-1:</i>	Grundwerkstoffe Base materials41	
Tabelle 4-2:	Schweißzusatzwerkstoff (Normbezeichnung und Richtanalyse des Schweißdrahtes) nach [BÖHL05]	
Table 4-2:	Welding filler materials (standard designation and guideline analysis of the welding wire) in accordance with [BÖHL05]42	
Tabelle 4-3:	Schweißzusatzwerkstoff (mechanische Gütewerte des Schweißgutes) nach [BÖHL05]	
Table 4-3:	Welding filler materials (mechanical properties of the weld metal) in accordance with [BÖHL05]42	
Tabelle 6-1:	Schweißparameter der Auftragschweißungen auf die Feinkornbaustähle S960 und S1100	
Table 6-1:	Welding parameters of the deposit welds on the fine-grained structural steels S960 and S110056	
Tabelle 6-2: <i>Table 6-2:</i>	Übersicht der Auftragschweißungen für die Rundzugproben Overview of the deposit welds for the round tensile specimens	
Tabelle 7-1: <i>Table 7-1:</i>	Übersicht der Auftragschweißungen für die Rundzugproben Overview of the deposit welds for the round tensile specimens100	

### Formelzeichen und Abkürzungen

#### Formulas and abbreviations

Formelzeichen Formulas			
A <sub>c1</sub>	[°C]	Umwandlungspunkt Aufheizkurve (Perlitpunkt) Change point preheat curve (pearlite point)	
A <sub>v</sub>	[J]	Kerbschlagzähigkeit <i>Notch impact strength</i>	
A <sub>1</sub>	[°C]	Umwandlungspunkt (Perlitpunkt) Change point (pearlite point)	
A <sub>3</sub>	[°C]	Umwandlungspunkt (unmagnetisches $\alpha$ -Eisen) Change point (non-magnetic $\alpha$ -iron)	
A <sub>5</sub>	[%]	Bruchdehnung Elongation after fracture	
Abw	[%]	Abweichung Deviation	
Abw <sub>korrigiert</sub>	[%]	Korrigierte Abweichung Corrected deviation	
CET	[%]	Kohlenstoffäquivalent Carbon equivalent	
E	[kJ/ cm]	Streckenenergie Energy-per-unit length	
F	[N]	Kraft <i>Force</i>	
G	[1]	Korngröße <i>Grain size</i>	
HD	[cm <sup>3</sup> / 100g]	Wasserstoffgehalt des Schweißgutes Hydrogen content of the weld metal	
ΗV	[1]	Härtewert nach Vickers Hardness according to Vickers	
Is	[A]	Schweißstrom (Messwert) Welding current (measured value)	

L <sub>0</sub>	[mm]	Anfangsmesslänge <i>Gauge length</i>
Ms	[°C]	Martensitstarttemperatur Martensite starting temperature
Q	[kJ/ mm]	Wärmeeinbringung <i>Heat input</i>
Q <sub>0</sub>	[J]	Wärmemenge einer punktförmigen Quelle Heat quantity of a spot-shaped source
Q <sub>1</sub>	[J/ cm]	Wärmemenge einer linearen Quelle Heat quantity of a linear source
Q <sub>2</sub>	[J/ cm <sup>2</sup> ]	Wärmemenge einer ebenen Quelle Heat quantity of a planar source
R	[mm]	Abstand zwischen einer punktförmigen Wärmequelle und einem Punkt im unbegrenzten Körper Distance between a punctiform heat source and a point in an unlimited body
$R_{p0,2}$	[MPa]	0,2%-Dehngrenze 0,2%-yield strength
R <sup>2</sup>	[1]	Bestimmtheitsmaß Coefficient of determination
R <sub>eL</sub>	[MPa]	Untere Streckgrenze <i>Lower yield point</i>
R <sub>m</sub>	[MPa]	Zugfestigkeit Tensile strength
Т	[°C]	Temperatur Temperature
Τυ	[°C]	Umwandlungstemperatur Transformation temperature
Ti	[°C]	Zwischenlagentemperatur Interpass temperature
T <sub>max</sub>	[°C]	Spitzentemperatur Peak temperature
To	[°C]	Vorwärmtemperatur, Arbeitstemperatur Preheating temperature, working temperature

XII	Forme	Formelzeichen und Abkürzungen		
T <sub>8/4</sub>	[℃ s]	Integral der Abkühlkurve in den Grenzen von $t_{800}$ bis $t_{400}$ Integral of the cooling curve within the limits of $t_{800}$ to $t_{400}$		
T <sub>8/4-400℃</sub>	[°C s]	Integral der Abkühlkurve in den Grenzen von $t_{800}$ bis $t_{400}$ ohne die Fläche unterhalb von 400 °C Integral of the cooling curve within the limits of $t_{800}$ to $t_{400}$ without the area below 400 °C		
U	[V]	Schweißspannung (Einstellwert) Welding current (setting value)		
Us	[V]	Schweißspannung (Messwert) <i>Welding voltage (measured value)</i>		
W <sub>1</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm ℃/ kJ]	Koeffizient für die Wärmeableitung (zweiseitig begrenzter Körper) <i>Coefficient for the heat dissipation (double-sidedly limited body)</i>		
W <sub>1/T</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm ℃/ kJ]	Koeffizient W₁ bei der Temperatur T (zweiseitig begrenzter Körper) <i>Coefficient W₁ at temperature T (double-sidedly limited body)</i>		
W <sub>2</sub>	[s cm ℃/ kJ]	Koeffizient für die Wärmeableitung (einseitig begrenzter Körper) Coefficient for the heat dissipation (one-sidedly limited body)		
W <sub>2/T</sub>	[s cm ℃/ kJ]	Koeffizient $W_2$ bei der Temperatur T (einseitig begrenzter Körper) Coefficient $W_2$ at temperature T (one-sidedly limited body)		
a	[cm²/ s]	Temperaturleitzahl Temperature coefficient		
b	[1/ s]	Temperaturübergangsfaktor Temperature transition factor		
С	[J⁄ g ℃]	Spezifische Wärme Specific heat		
d	[mm]	Blechdicke Plate thickness		

d <sub>D</sub>	[mm]	Drahtdurchmesser <i>Wire diameter</i>
dĸ	[mm]	Korndurchmesser Grain diameter
d <sub>ü</sub>	[mm]	Übergangsblechdicke <i>Transition plate thickness</i>
d <sub>0</sub>	[mm]	Probendurchmesser Diameter of the specimen
k	[MPa/ mm <sup>1/2</sup> ]	Korngrenzenwiderstand Grain boundary resistance
max	[%]	Maximalwert Maximum value
m <sub>1</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm <sup>2</sup> °C/ kJ <sup>2</sup> ]	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $W_1$ Increase of the linear regression equation of $W_1$
m <sub>2</sub>	[s cm <sup>2</sup> °C/ kJ <sup>2</sup> ]	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $W_{\rm 2}$ Increase of the linear regression equation of $W_{\rm 2}$
m <sub>m1</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm <sup>2</sup> / kJ <sup>2</sup> ]	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $m_1$ Increase of the linear regression equation of $m_1$
m <sub>m2</sub>	[s cm <sup>2</sup> / kJ <sup>2</sup> ]	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $m_2$ Increase of the linear regression equation of $m_2$
m <sub>n1</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm/ kJ]	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $n_1$ Increase of the linear regression equation of $n_1$
m <sub>n2</sub>	[s cm/ kJ]	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $n_2$ Increase of the linear regression equation of $n_2$
n <sub>1</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm ℃/ kJ]	Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von $W_1$
n <sub>2</sub>	[s cm ℃/ kJ]	Achsenabschnitt der linearen Regression equation of $W_1$ Avia social of the linear regression equation of $W_2$
n <sub>m1</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm <sup>2</sup> °C/ kJ <sup>2</sup> ]	Achsenabschnitt der linearen Regression equation of $W_2$ Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von m <sub>1</sub> Axis section of the linear regression equation of m <sub>1</sub>

XIV Formelzeichen und Abkürzungen		zeichen und Abkürzungen
n <sub>m2</sub>	[s cm² ℃/ kJ²]	Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von $m_2$ Axis section of the linear regression equation of $m_2$
n <sub>n1</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm ℃/ kJ]	Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von n <sub>1</sub> Axis section of the linear regression equation of n <sub>1</sub>
n <sub>n2</sub>	[s cm ℃/ kJ]	Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von n <sub>2</sub> Axis section of the linear regression equation of n <sub>2</sub>
m <sub>1/T</sub>	$[s^{1/2} \text{ mm cm}^2 \text{ °C/ } kJ^2]$	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $W_{1/T}$ Increase of the linear regression equation of $W_{1/T}$
m <sub>2/T</sub>	[s cm <sup>2</sup> °C/ kJ <sup>2</sup> ]	Steigung der linearen Regressionsgleichung von $W_{2/T}$ Increase of the linear regression equation of $W_{2/T}$
n <sub>1/T</sub>	[s <sup>1/2</sup> mm cm °C/ kJ]	Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von $W_{1/T}$ Axis section of the linear regression equation of $W_{1/T}$
n <sub>2/T</sub>	[s cm ℃/ kJ]	Achsenabschnitt der linearen Regressionsgleichung von $W_{2/T}$ Axis section of the linear regression equation of $W_{2/T}$
q	[J/ cm <sup>2</sup> s]	Wärmestromdichte Heat flow density
q	[W]	Leistung <i>Capacity</i>
qs	[J/ s]	Wärmestrom <i>Heat flow</i>
r	[mm]	Abstand zwischen einer linearen Wärmequelle und einem Punkt im unbegrenzten Körper Distance between a linear heat source and a point in an unlimited body
S	[%]	Standardabweichung der Einzelmessung Standard deviation of the individual measurement
t	[s]	Zeit <i>Tim</i> e

t <sub>T</sub>	[s]	Zeit, bei welcher die Schweißraupe nach dem Lichtbogendurchgang eine Temperatur von T erreicht hat <i>Time required by the weld bead for reaching the</i> <i>temperature T after the arc passage</i>
t <sub>v</sub>	[s]	Verweildauer im oberen Austenitgebiet Exposure time in the upper austenite range
t <sub>8/4</sub>	[s]	Abkühlzeit von 800 $^{\circ}$ auf 400 $^{\circ}$ Cooling time of 800 $^{\circ}$ to 400 $^{\circ}$
t <sub>8/5</sub>	[s]	Abkühlzeit von 800 ℃ auf 500 ℃ Cooling time of 800 ℃ to 500 ℃
VD	[m/ min]	Drahtgeschwindigkeit <i>Wire speed</i>
VS	[cm/ min]	Schweißgeschwindigkeit Welding speed
w	[mm]	Abstand zwischen einer ebenen Wärmequelle und einem Punkt im unbegrenzten Körper Distance between a plane heat source and a point in an unlimited body
x	[1]	Variable <i>Variable</i>
у	[1]	Variable <i>Variable</i>
Xi	[1]	Messwert <i>Measured value</i>
x	[1]	Mittelwert Mean value
z	[1]	Variable Variable
γ	[g/ cm <sup>3</sup> ]	Spezifisches Gewicht Specific weight
δ	[mm]	Schichtdicke <i>Layer thickness</i>
δT/ δn	[°C/ mm]	Temperaturgradient Temperature gradient

XVI		Formelzeichen und Abkürzungen	
δT/ δt	[°C/ s]	Geschwindigkeit der Temperaturänderung Speed of temperature change	
η	[1]	Wirkungsgrad <i>Efficiency</i>	
λ	[J/ cm s ℃]	Wärmeleitzahl Heat coefficient	
σi	[MPa]	Reibspannung Friction tension	

#### Abkürzungen Abbreviations

В	Bainit <i>Bainite</i>
DIN	Deutsche Industrie Norm DIN Standard
MAG	Metall-Aktivgasschweißen Metal Arc Active Gas Welding
MSG	Metall-Schutzgasschweißen Gas Shielded Metal Arc Welding
RT	Raumtemperatur <i>Room temperature</i>
SEP	Stahl-Eisen-Prüfblatt Steel Iron Test Sheet
SEW	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt Steel Iron Material Sheet
SZTU	Schweiß-Zeit-Temperatur-Umwandlung Weld-Time-Temperature-Transformation
TE	Thermoelement <i>Thermocouple</i>
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlung Time-Temperature-Transformation

#### Abstract

# New evaluation concept for the characterisation of the temperature-time-sequence of super high strength fine-grained structural steels

A flawless welded joint is indispensable for taking advantage of the positive properties of the super high strength fine-grained structural steels S960 and S1100. In order to ensure the required flawless joint it is necessary to give particular attention to the measures for the prevention of hydrogen-induced cracks, besides considering general processing directives. Further, the mechano-technological properties of the weld metal and of the HAZ must meet the defined requirements. In this connection, the temperature-time-sequence as an influential factor in high and super-high strength fine-grained structural steels is of fundamental importance with regard to hardness, notch impact strength and strength of the welded joint. This sequence depends on the welding conditions. Among those are welding voltage, welding current, welding speed, preheating temperature and/ or interpass temperature, welding process, heat control and also the geometry of weld groove and workpiece. Due to the high number of influential factors it is not possible to establish a systematic connection between the mechano-technological properties of the welded joints and the welding conditions. Those influential factors were, therefore, aggregated into one parameter, which characterises the temperature-time-sequence and which considers solely those physical parameters that exert influence on the mechano-technological properties of the welded joint. This particular parameter is the cooling time t<sub>8/5</sub> and it stands for the time that the welded joint takes for cooling down from 800 ℃ to 500 ℃ after the arc passage. The temperature interval has been selected because for the materials for which the development of the cooling time  $t_{a/5}$  has been examined the most important phase transformations occur within the duration of this temperature interval.

The  $t_{8/5}$ -concept has been developed for arc welding of ferritic steels. In this connection it is assumed that at equal welding conditions also equal cooling times  $t_{8/5}$  are measured for different high-strength, unalloyed and low-alloyed ferritic steels. It is, thus, possible to characterise the temperature-time-sequence of these steels and to compare the sequences. Further, the  $t_{8/5}$ -concept allows to assign defined cooling times  $t_{8/5}$  to defined mechano-technological properties as a function of the material. The cooling time  $t_{8/5}$  is calculated using the equations that are defined in Chapter 2.2, in the Material Data Sheet (SEW) 088 and in the Standard DIN EN 1011-1 [DIN01][SEW93a].

In GMA welding, the super high strength fine-grained steels S960 and S1100 are, for achieving the required properties, welded with shorter cooling times  $t_{8/5}$  than the fine-grained structural steels of lower yield strength. The range of the cooling times  $t_{8/5}$  is, further, along with the increasing yield strength also subject to increasing limitation for processing. Thus, the user's process parameter window for achieving the required properties is most restricted. The narrower tolerances during welding processing of the super high strength fine-grained structural steels are also causing the increase of the requirements made to the  $t_{8/5}$ -concept. Relatively minor variations of the cooling time  $t_{8/5}$  may already have high effects on the evaluation of the mechano-technological properties.

For a statement about the usability of the  $t_{8/5}$ -concept for super high strength fine-grained structural steels, the measured cooling times  $t_{8/5}$  of deposition welds that had been carried out under equal welding conditions with the steels S960 and S1100 have been compared. The test results showed that the cooling times  $t_{8/5}$  were differing. The reason lies in the phase transformation from the austenite range. Due to the alloy concepts of these steels and their low energies per unit-length, which are inevitable for the welding of those steels, the transformation occurs partially below a temperature of 500°C. Hence, the phase transformations in these materials are no longer specified sufficiently with the cooling time  $t_{8/5}$ . A characterisation and thus comparison of the temperature-time-sequences are no longer possible in the way they have, so far, been carried out.

For the determination of the connection between the mechano-technological properties and the cooling time  $t_{8/5}$ , tensile test specimens from the deposition welds were prepared and examined. Cooling times  $t_{8/5}$  have been determined that have been varying by more than 20 %, with the approximately equal tensile strength. As far as the super high strength fine-grained structural steels S960 and S1100 are concerned, there is thus no definite connection between certain mechano-technological properties and the cooling time  $t_{8/5}$ .

Moreover, the cooling times  $t_{8/5}$  have been calculated and compared with the cooling times  $t_{8/5}$  that had been experimentally established. The calculation of the cooling times  $t_{8/5}$  in accordance with the equations stated in Chapter 2.2, in the Material Data Sheet (SEW) 088 and in the Standard DIN EN 1011-1 showed that substantially higher variations between the calculated and the measured cooling times  $t_{8/5}$  were the result than they would have been permissible in accordance with the Material Data Sheet (SEW) 088 [DIN01][SEW93a]. The equations used for the calculation of the cooling time  $t_{8/5}$  are, therefore, not suitable for the super high-strength fine-grained structural steels S960 and S1100.

Due to the specified inadequacies of the  $t_{8/5}$ -concept with regard to the characterisation of the temperature-time-sequence of the super high-strength fine-grained structural steels S960 and S1100, a novel evaluation concept has been developed. This concept evaluates the temperature range between 800 °C up to 400 °C and records thus the phase transformations from the austenite range for the super high strength fine-grained structural steels S960 and S1100.

Within the scope of this development, the novel cooling time  $t_{8/4}$  has been introduced. It stands for the time period during which the newly selected temperature range of 800 °C to 400 °C is passed during the cooling of a weld bead. The integral consideration of the cooling time  $t_{8/4}$  allowed the development of the integral  $T_{8/4-400 \, ^\circ C}$ . This integral specifies the area between the cooling curve and the temperature of 400 °C in the temperature-time-sequence within the limits  $t_{800}$  and  $t_{400}$ . At that,  $t_{800}$  and  $t_{400}$  stand for the times when the cooling curve in the temperature-time-sequence has reached a temperature of 800 °C and 400 °C after the arc passage.

By means of the cooling times  $t_{8/4}$  and the integral  $T_{8/4-400\,^{\circ}C}$ , which have been determined from the temperature-time-sequences, it could be demonstrated that the novel evaluation concept is capable to characterise the deposit welds on the super high strength finegrained structural steels S960 and S1100, which had been carried out under equal welding conditions, thus allow a comparison. The integral  $T_{8/4-400\,^{\circ}C}$  is, at that, the more adequate evaluation criterion. Therefore, the novel evaluation concept is denominated  $T_{8/4-400\,^{\circ}C}$ -concept.

A examination of the connection between the mechano-technological properties and the  $T_{8/4-400\,^\circ\text{C}}$ -concept brought about the conclusion that certain mechano-technological properties as a function of the material may be assigned to certain integrals  $T_{8/4-400\,^\circ\text{C}}$ . With equal tensile strength, the integrals  $T_{8/4-400\,^\circ\text{C}}$  show further less variation than is the case with the cooling time  $t_{8/5}$ .

Finally, the analytical equations of the  $T_{8/4-400\,^\circ C}$ -concept for the heat dissipation in bodies, which are limited one- or double sided, have been derived. The values which had been calculated by means of the derived equations showed, in comparison with the measured values from the temperature-time-sequence, just slight deviations. As a result, the user is provided with suitable equations for engineering applications of the novel  $T_{8/4-400\,^\circ C}$ -concept.