

# **Vereinfachte Methodik für einen rationelleren Einsatz der numerischen Schweißsimulation**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von: Markus Urner  
aus (Geburtsort): Halle (Westfalen), Deutschland

eingereicht am: 15.06.2012  
mündliche Prüfung am: 09.10.2012

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger  
Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier



Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 32

**Markus Urner**

**Vereinfachte Methodik für einen rationelleren Einsatz  
der numerischen Schweißsimulation**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1480-8

ISSN 1614-4783

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Angeregt durch die Aufgaben und Problemstellungen in verschiedenen Forschungsprojekten entwickelten sich die Ideen für die durchgeführten Untersuchungen. Eingang in die Arbeiten fanden Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Verzugsberechnungen an einer lichtbogengeschweißten komplexen Trägerstruktur aus dem Schienenfahrzeugbau“ aus dem Paketantrag „Anwendungsnahe Schweißsimulation komplexer Strukturen“. Die Untersuchungen wurden aus den Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigung „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert und von der Forschungsvereinigung FOSTA unterstützt. Für diese Unterstützung sei gedankt.

Ich danke allen Kollegen aus dem Bereich der Schweißsimulation für die unterstützenden Diskussionen und Anregungen zu dieser Arbeit. Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger für die Übernahme des Referates und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier für die des Koreferates sowie das Interesse an meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Allen Mitarbeitern und Kollegen am Institut für Füge- und Schweißtechnik möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die Hilfestellung bei technischen und inhaltlichen Problemen danken. Ferner danke ich allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften für deren Arbeit und Einsatzbereitschaft.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Erich und Irmtraud, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich stets gefördert und ermutigt haben, und Nathalie, die mich immer wieder angetrieben und aufgebaut hat, diese Arbeit zu vollenden.



---

## Kurzfassung

Die Simulation von Fertigungsprozessen gewinnt aufgrund der steigenden Forderung nach effizienten und ökonomischen Entwicklungsabläufen immer mehr Bedeutung. Großes Potential liegt in der numerischen Darstellung von Fertigungsschritten, wie dem Fügen durch Schweißen, mit der FE-Methode in der Entwicklungs- und Fertigungsplanung. Die Abbildung der Energiequelle, z.B. des Lichtbogens beim Schweißen, erfolgt durch die Verwendung von Ersatzwärmequellen in den FEM-Berechnungen. Diese müssen mit experimentellen Temperaturmessungen abgeglichen werden, da nicht der reale physikalische Prozess berechnet wird. Hierzu kommen oft Thermoelemente zum Einsatz, die neben der Schweißnaht aufgepunktet werden. Diese Vorarbeiten sind sehr langwierig und im industriellen Umfeld, gerade bei mehreren Schweißnähten und großen Bauteilen, aufwendig durchzuführen. Die Infrarot-Thermografie bietet sich als alternative Methode zur Temperaturmessung an, da mit dieser berührungslos und flächenhaft zuverlässig Temperaturen bestimmt werden können.

Beim Schweißen treten aufgrund der besonderen Strahlungseigenschaften und hohen Temperaturen des Lichtbogens zusätzliche Fragestellungen auf, die im Niedrigtemperaturbereich nicht beachtet werden müssen. Neben einer Bestimmung des Emissionsgrades der zu messenden Oberfläche im Prozessbetrieb müssen auch Reflexionen und Umgebungsvariablen ins Auge gefasst werden.

In dieser Arbeit wurden die Voraussetzungen zum Messen von relevanten Temperaturen beim Schweißen mit der Thermografiemethode zur Kalibrierung von Ersatzwärmequellen für die Schweißsimulation untersucht. Es wurden verschiedene industrierelevante Werkstoffe und Schweißverfahren in Betracht gezogen und die besonderen Eigenschaften in Bezug auf thermografische Temperaturmessungen erarbeitet. Neben ebenen Platten wurde eine bauteilähnliche Struktur aus dem Schienenfahrzeugbau untersucht. Zur Prüfung der Temperaturinformationen auf Eignung zur Verwendung in der Schweißsimulation wurden die ebenen Platten und die bauteilähnliche Struktur in numerischen Experimenten nachgebildet und der Schweißverzug mit der FE-Methode berechnet.

Die Untersuchungen zeigen, dass bei sehr stark reflektierenden Oberflächen, wie sie Edelstahl oder Aluminium aufweisen, eine Beschichtung mit mattem Lack von Vorteil ist, um das Abstrahlverhalten zu optimieren. Alternativ kann das Abstrahlverhalten mit einem Sandstrahlvorgang hin zu einer diffuseren Strahlung optimiert werden, wodurch die Messergebnisse deutlich verbessert werden. Besonderes Augenmerk verlangt der beim Aluminiumschweißen eingesetzte Wechselstromlichtbogen. Der diskontinuierliche Lichtbogen verhindert die Anpassung des Emissionsgrades an die Messbedingungen, da diese nur mit konstanten Variablen durchgeführt werden kann. Das Temperatursignal der Messoberfläche wird durch ein Signal mit der Frequenz des Lichtbogens überlagert. Vergleiche mit Thermoelementmessungen zeigen, dass

durch einen geeigneten Signalfilter die untere Grenze des Gesamtsignals erfasst werden und mit dieser die richtige Temperatur dargestellt werden kann.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Punkte können aus den Thermografieaufnahmen ein flächenhaftes Temperaturfeld und die Oberflächengeometrie des Schmelzbades bestimmt werden. Aus den Informationen lassen sich zum Abgleich der Ersatzwärmequelle in der Schweißsimulation Profildaten generieren, die zum Vergleich mit den berechneten Temperaturen herangezogen werden können. Auch punktuelle Messungen, vergleichbar mit Thermoelementdaten, sind möglich und können für die Kalibrierung von Ersatzwärmequellen eingesetzt werden.

Durch den Einsatz der thermografischen Temperaturmessung in der numerischen Schweißsimulation wird die Messdatengewinnung vereinfacht und die Anwendung im industriellen Umfeld verbessert. Die Schweißsimulation kann mit verringertem zeitlichem und technischem Aufwand umgesetzt werden.



---

## Summery

Due to the rising demand for efficient and economical manufacturing procedures, the simulation of development processes is gaining more and more significance. There is great potential in the numerical representation of the stages of manufacturing, such as joining by welding, using the FE method in development planning and process planning. The representation of an energy source, such as a arc in welding, can be acquired through the use of substitute heat sources in FEM computations. These have to be compared against experimental temperature measurements, as the actual physical process is not computed. To this end thermocouples are often used, which are spot welded next to the weld seam. This preliminary work is very protracted and in an industrial setting, especially with multiple welded joints and large structural components, is very time-consuming to carry out. Infrared thermography offers an alternative method for temperature measurement, as in this way non-contact and extensively reliable temperatures can be determined.

Additional issues arise with welding because of the particular emission properties and high temperatures of the arcs, which is not the case in lower temperature ranges. As well as having to determine the emissivity of the surface being measured in the process operation, reflections and environment variables also have to be considered.

In this thesis the requirements for the measurement of relevant welding temperatures were analysed with the thermography method for the calibration of substitute heat sources in the welding simulation. Various relevant industrial materials and welding procedures were taken into account and the specific properties worked out in relation to the thermographic temperature measurements. As well as flat plates a structure similar to a component from rail vehicles was examined. To test the temperature information for suitability of use in the welding simulation, the flat plates and the component-like structure were modelled in numerical experiments and the welding distortion was calculated using the FE-method.

The study demonstrated that with highly reflective surfaces like stainless steel and aluminium, a coating of matt coating helps to optimise the radiation dispersion. Alternatively the radiation pattern can be optimised to more dispersed rays using a sand blast process, in which way the measurement results are considerably improved. The a.c. arc used in aluminium welding needs particular attention. The intermittent arc prevents the adaption of emissivity to the measurement conditions because these can only be implemented with constant variables. The temperature signal of the measuring surface interferes with a signal with the frequency of the arc. Comparisons with thermocouple measurements show that with an appropriate signal filter the lower limit of the entire signal can be recorded, with which the correct temperature can be represented.

Taking the above listed points into consideration, an extensive temperature range and the surface geometry of the weld pool can be defined using the thermographic recordings. From this information, profile data can be generated for the calibration of equivalent heat sources in the welding simulation, which can be used to compare with the computed temperatures. It is also possible to take selective measurements which are comparable with thermocouple data, and which can be utilised for the calibration of equivalent heat sources.

Through the deployment of thermographic temperature measurements in a numerical welding simulation, the extraction of measurement data is simplified and its application in the industrial setting improved. The welding simulation can be implemented with reduced expense in terms of time and technology.

---

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Motivation und Zielsetzung.....	3
3. Stand der Technik .....	7
3.1. Temperaturmessung .....	7
3.1.1. Thermoelemente.....	7
3.1.2. Thermografie.....	9
3.2. Schweißsimulation.....	18
3.2.1. Prozesssimulation.....	19
3.2.2. Struktursimulation .....	20
3.2.3. Werkstoffsimulation.....	22
4. Methodische Vorgehensweise.....	25
5. Experimentelle Versuchsdurchführung.....	27
5.1. Charakterisierung der verwendeten Werkstoffe .....	27
5.1.1. Austenitischer Chrom-Nickel-Stahl .....	27
5.1.2. Höherfester Dualphasen Stahl.....	29
5.1.3. Aushärtbare Aluminiumlegierung.....	32
5.1.4. Höherfester Feinkornstahl.....	33
5.2. Grundlagen der Versuchsdurchführung.....	36
5.2.1. Geometrie der Probekörper .....	36
5.2.2. Schweißparameter.....	37
5.2.3. Thermografiekamera.....	39
5.2.4. Versuchsaufbau für ebene Platten.....	39
5.2.5. Versuchsaufbau für Profilknoten .....	42
5.3. Temperaturmessungen .....	44
5.3.1. Positionsbestimmung.....	44
5.3.2. Bestimmung des Emissionsgrades und des Temperaturfeldes .....	45
5.3.2.1. Austenitischer Chrom-Nickel-Stahl.....	46
5.3.2.2. Dualphasen Stahl DP-K 34/60 Z .....	49
5.3.2.3. Aluminiumlegierung Edocal 608.....	53
5.3.2.4. Höherfester Feinkornstahl S500MC .....	56
5.3.2.5. Zusammenfassung .....	58

---

5.3.3.	Temperaturprofile quer zur Schweißnaht .....	61
5.3.4.	Temperaturfelder WIG- und MAG-Schweißen .....	62
5.3.5.	Fehlerquellen bei der Messung .....	64
5.3.5.1.	Messgenauigkeit .....	64
5.3.5.2.	Auflösung der Messmethoden .....	69
5.4.	Geometrie der Schmelzbäder .....	72
5.4.1.	Schmelzbadlänge und -breite aus Thermografieaufnahmen .....	72
5.4.2.	Schmelzbadbreite und -form aus metallografischen Querschliffen .....	73
5.4.3.	Vergleich von Thermografieaufnahmen und Querschliffen .....	76
5.5.	Verzugsmessungen .....	77
5.5.1.	Ebene Platten .....	77
5.5.2.	Profilknoten .....	78
6.	FEM-Berechnungen .....	79
6.1.	Eingesetzte Software .....	81
6.2.	Vereinfachungen und Annahmen .....	81
6.3.	Werkstoffmodelle und Kennwerte .....	81
6.4.	FE-Modelle .....	82
6.4.1.	Ebene Platten .....	82
6.4.2.	Profilknoten .....	83
6.5.	Modellierung des Zusatzmaterials .....	86
6.6.	Validierung der FEM-Berechnungen .....	87
6.6.1.	Ebene Platten .....	87
6.6.1.1.	Austenitischer Chrom-Nickel-Stahl .....	88
6.6.1.2.	Dualphasen Stahl DP-K 34/60 Z .....	90
6.6.1.3.	Aluminiumlegierung Ecodal 608 .....	93
6.6.1.4.	Zusammenfassung .....	96
6.6.2.	Profilknoten .....	97
6.6.2.1.	Validierung der Temperaturfelder .....	97
6.6.2.2.	Berechnete Verzüge .....	103
7.	Zusammenfassung und Diskussion .....	107
8.	Ausblick .....	111
9.	Literatur .....	113
10.	Anhang .....	119

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anschlussmöglichkeiten für Thermoelemente [1] .....	9
Abbildung 2: elektromagnetisches Spektrum [3].....	9
Abbildung 3: „radiometrisches Grundgesetz“ [4].....	10
Abbildung 4: Strahlungsverhalten eines Objektes [3] .....	11
Abbildung 5: Wellenlängenabhängigkeit des Emissionsgrades [6].....	12
Abbildung 6: Transmissionsgrad der Atmosphäre [4].....	13
Abbildung 7: Strahldichte als Funktion der Temperatur für die beiden Spektralbereiche 3-5 $\mu\text{m}$ und 8-14 $\mu\text{m}$ [7] .....	14
Abbildung 8: Änderung des Emissionsgrades von Kupfer mit der Temperatur.....	15
Abbildung 9: optische Reflexion in Abhängigkeit zur Oberflächenrauheit [7].....	17
Abbildung 10 Kopplung der Einzelsimulationen [21].....	18
Abbildung 11: schematischer Aufbau der Untersuchungen .....	26
Abbildung 12: Spannungs-Dehnungs-Kurve X5CrNi1810 .....	28
Abbildung 13: Mikroschliffe X5CrNi1810 .....	28
Abbildung 14: REM-Aufnahmen Oberfläche X5CrNi1810 .....	29
Abbildung 15: Spannungs-Dehnungs-Kurve DP-K 34/60 Z.....	30
Abbildung 16: Mikroschliffe Grundmaterial DP-K 34/60 Z .....	30
Abbildung 17: REM-Aufnahme der Oberfläche und Schnitt durch die Zinkschicht ...	31
Abbildung 18: REM-Aufnahme der geschliffenen Oberfläche und Querschnitt .....	31
Abbildung 19: REM-Aufnahme der gestrahlten Oberfläche und Querschnitt.....	31
Abbildung 20: Spannungs-Dehnungs-Kurven Ecodal 608.....	32
Abbildung 21: Mikroschliffe Ecodal 608 .....	33
Abbildung 22: REM-Aufnahme Oberfläche Ecodal 608.....	33
Abbildung 23: Spannungs-Dehnungs-Kurven S500MC.....	34
Abbildung 24: Mikroschliffe Grundwerkstoff S500MC.....	34
Abbildung 25: REM-Aufnahme der Walzhaut .....	35
Abbildung 26: Spektrum der EDX-Analyse .....	35
Abbildung 27: Thermografiekamera mit Teleobjektiv.....	39
Abbildung 28: Positionierung der Lagerpunkte und der induktiven Wegaufnehmer, Maße in mm.....	40
Abbildung 29: Versuchsaufbau für ebene Platten.....	40
Abbildung 30: Position der Thermoelemente, Maße in mm .....	41
Abbildung 31: Position der Thermomamera .....	41
Abbildung 32: Versuchsaufbau mit Spannvorrichtungen .....	42
Abbildung 33: Position des Wegaufnehmers für die Messung des Winkelverzuges. 42	
Abbildung 34: Position der Thermokamera, Naht 1 und 3 .....	43
Abbildung 35: Kalibrierungskörper und Thermoelement im Thermografiebild .....	44
Abbildung 36: Thermografiebilder des Chrom-Nickel-Stahls a) unbehandelte b) beschichtete Oberfläche .....	46
Abbildung 37: Bestimmung des Emissionsgrades X5CrNi1810 .....	47
Abbildung 38: Vergleich der gemessenen Temperaturen X5 CrNi 18-10 .....	48

Abbildung 39: Thermografiebild DP-K 34/60 Z .....	49
Abbildung 40: DP-K 34/60 Z Oberfläche a) unbehandelt b) geschliffen c) gestrahlt. 49	
Abbildung 41: Emissionsgrad DP-K 34/60 Z.....	51
Abbildung 42: Position der Messpunkte für Emissionsgrad DP-K 34/60 Z .....	51
Abbildung 43: Position der Messpunkte mit Emissionsgrad DP-K 34/60 Z.....	52
Abbildung 44: Ecodal 608 unbehandelte Oberfläche a) Lichtbogen gezündet b) Lichtbogen erloschen .....	53
Abbildung 45: Ecodal 608 geschwärzte Oberfläche a) Lichtbogen gezündet b) Lichtbogen erloschen .....	53
Abbildung 46: Gesamt-Temperatursignal und untere Grenze WIG DC Schweißung 54	
Abbildung 47: Vergleich der gemessenen Temperaturen Ecodal 608 .....	55
Abbildung 48: Thermografieaufnahme S500MC.....	56
Abbildung 49: Vergleich der gemessenen Temperaturen S500MC Naht 1 .....	57
Abbildung 50: Vergleich der gemessenen Temperaturen S500MC Naht 3 .....	57
Abbildung 51: Gegenüberstellung der Emissionsgrade der Werkstoffe.....	58
Abbildung 52: Thermografische Messung der Nahtprofile .....	61
Abbildung 53: Vergleich der Temperaturfelder WIG (a) MAG (b) .....	62
Abbildung 54: Vergleich der thermografisch gemessenen Temperaturen S500MC WIG / MAG.....	63
Abbildung 55: Spitzentemperatur Thermoelemente S500MC Naht 1 und Fitkurve ..	66
Abbildung 56: Spitzentemperatur Thermografiekamera S500MC Naht 1 und Fitkurve.....	66
Abbildung 57: Residuum der Messwerte .....	67
Abbildung 58: Histogramm und Normalverteilung der Messfehler.....	68
Abbildung 59: Messgenauigkeit in einem drei mal drei Pixel Messbereich.....	69
Abbildung 60: Messgenauigkeit in einem vier mal vier Pixel Messbereich .....	70
Abbildung 61: Auflösung der Thermografiekamera .....	71
Abbildung 62: Thermografieaufnahmen Schmelzbad a) austenitischen Chrom-Nickel-Stahl und b) Dualphasenstahl .....	72
Abbildung 63: X5CrNi1810 WIG a) Querschiff und b) Oberfläche der Naht .....	74
Abbildung 64: DP-K 34/60 Z WIG a) Querschiff und b) Oberfläche der Naht .....	74
Abbildung 65: Ecodal 608 WIG a) Querschiff und b) Oberfläche der Naht.....	74
Abbildung 66: S500MC WIG a) Querschiff und b) Oberfläche der Naht.....	74
Abbildung 67: S500MC, Naht 1 und 2, MAG-Schweißung a) Querschiff und b, c) Oberfläche der Nähte.....	75
Abbildung 68: S500MC, Naht 3 und 4, MAG-Schweißung a) Querschiff und b, c) Oberfläche der Nähte.....	75
Abbildung 69: gemessene Mittelwerte der transienten Verzüge der ebenen Platten in Längs- und Querrichtung .....	77
Abbildung 70: gemessene Mittelwerte der Endverzüge der ebenen Platten in Längs- und Querrichtung .....	78
Abbildung 71: Mittelwert des transienten Winkelverzuges am Profilknoten.....	79
Abbildung 72: gemessene Mittelwerte des Winkelverzuges nach Naht 1 bis 4 .....	79

---

Abbildung 73: FE-Modell ebene Platten .....	82
Abbildung 74: Ableitung der Maße von Naht 1 und 2 .....	83
Abbildung 75: Ableitung der Maße von Naht 3 und 4 .....	83
Abbildung 76: FE-Modell Profilknoten .....	84
Abbildung 77: FE-Modell steife Einspannung, Schnitt .....	84
Abbildung 78: FE-Modell, Vernetzung Naht 1 und 2 a) Draufsicht b) Schnitt .....	85
Abbildung 79: FE-Modell, Vernetzung a) Naht 3 und b) Naht 4 .....	85
Abbildung 80: FE-Modell, Naht 3 und Naht 4, Vernetzung, Schnitt .....	86
Abbildung 81: Vergleich der Temperaturverläufe X5CrNi1810 .....	88
Abbildung 82: Vergleich des Querschnittes des Schmelzbades X5CrNi1810 .....	89
Abbildung 83: Temperaturprofile quer zum Schmelzbad X5CrNi1810 .....	89
Abbildung 84: gemessene und berechnete Verzüge ebene Platte X5CrNi1810.....	90
Abbildung 85: Vergleich der Temperaturverläufe DP-K 34/60 Z.....	91
Abbildung 86: Vergleich des Querschnittes des Schmelzbades DP-K 34/60 Z .....	92
Abbildung 87: Temperaturprofile quer zum Schmelzbad DP-K 34/60 Z .....	92
Abbildung 88: gemessene und berechnete Verzüge ebene Platte DP-K 34/60 Z ...	93
Abbildung 89: Vergleich der Temperaturverläufe Ecodal 608.....	94
Abbildung 90: Vergleich des Querschnittes des Schmelzbades.....	94
Abbildung 91: Temperaturprofile quer zum Schmelzbad Ecodal 608 .....	95
Abbildung 92: gemessene und berechnete Verzüge ebene Platte Ecodal 608 .....	95
Abbildung 93: gemessene und berechnete Endverzüge an ebenen Platten .....	96
Abbildung 94: FE-Modell, Naht 1, Load-Bereich.....	98
Abbildung 95: Vergleich der Temperaturkurven, Messung und FEM, Naht 1.....	98
Abbildung 96: Vergleich der Schmelzbadgeometrie, Naht 1.....	99
Abbildung 97: FE-Modell, Naht 2, Load-Bereich.....	99
Abbildung 98: Vergleich der Temperaturkurven, Messung und FEM, Naht 2 .....	100
Abbildung 99: Vergleich der Schmelzbadgeometrie, Naht 2 (unten) .....	100
Abbildung 100: FE-Modell, Naht 3, Load-Bereich.....	100
Abbildung 101: Vergleich der Temperaturkurven, Messung und FEM, Naht 3 .....	101
Abbildung 102: Vergleich der Schmelzbadgeometrie, Naht 3.....	101
Abbildung 103: FE-Modell, Naht 4, Load-Bereich.....	102
Abbildung 104: Vergleich der Temperaturkurven, Messung und FEM, Naht 4 .....	102
Abbildung 105: Vergleich der Schmelzbadgeometrie, Naht 4.....	103
Abbildung 106: Position der FE-Knoten für Spannbedingungen.....	104
Abbildung 107: Winkelverzug Naht 1 bis 4 .....	104
Abbildung 108: Gegenüberstellung Endverzüge nach Naht 1 bis 4.....	105
Abbildung 109: Abmessungen des Profilknotens .....	119
Abbildung 110: Maße des U-Profiles .....	119
Abbildung 111: Maße des Ausschnitts im U-Profil.....	119
Abbildung 112: Brennerstellung und Schweißrichtung Naht 1.....	120
Abbildung 113: Brennerstellung und Schweißrichtung Naht 2.....	120
Abbildung 114: Brennerstellung und Schweißrichtung Naht 3.....	121
Abbildung 115: Brennerstellung und Schweißrichtung Naht 4.....	121

---

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: verwendete Werkstoffe und Schweißverfahren .....	26
Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung X5CrNi18-10 (in Gewichts-%) nach Herstellerangaben [60].....	27
Tabelle 3 Mittelwerte mechanische Kennwerte 1.4301 .....	28
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung DP-K 34/60 Z (in Gewichts-%) nach Herstellerangaben [61].....	29
Tabelle 5: Mittelwerte mechanische Kennwerte DP-K 34/60 Z.....	30
Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung Ecodal 608 (in Gewichts-%) nach Herstellerangaben [62].....	32
Tabelle 7: Mittelwerte mechanische Kennwerte Ecodal 608 .....	32
Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung S500MC (in Gewichts-%) nach Herstellerangaben [63] .....	33
Tabelle 9: Mittelwerte mechanische Kennwerte S500MC .....	34
Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung der Walzhaut (in Gewichts-%) nach EDX-Analyse .....	35
Tabelle 11: Schweißdauer für die eingesetzten Nähte .....	37
Tabelle 12: Schweißparameter.....	38
Tabelle 13: Position der Messpunkte X5 CrNi 1810 .....	48
Tabelle 14: verwendete Vorbehandlungsmethoden .....	50
Tabelle 15: Position der Messpunkte DP-K 34/60 Z .....	50
Tabelle 15: Position der Messpunkte Ecodal 608.....	55
Tabelle 16: Position der Messpunkte S500 MC Naht 1 .....	56
Tabelle 17: Position der Messpunkte S500 MC WIG / MAG .....	63
Tabelle 18: Vergleich der korrigierten Determinationskoeffizienten.....	67
Tabelle 19: Schmelzbadgeometrien bestimmt aus thermografischen Aufnahmen ...	73
Tabelle 20: Schmelzbadgeometrien bestimmt aus metallografischen Querschliffen	76
Tabelle 21: Vergleich der Mittelwerte der Schmelzbadbreite.....	76
Tabelle 22: Position der Temperaturmesspunkte X5CrNi1810.....	88
Tabelle 23: Position der Temperaturmesspunkte DP-K 34/60 Z.....	91
Tabelle 24: Position der Temperaturmesspunkte Ecodal 608 .....	94
Tabelle 25: Position der Temperaturmesspunkte Naht 1.....	98
Tabelle 26: Position der Temperaturmesspunkte Naht 2.....	99
Tabelle 27: Position der Temperaturmesspunkte Naht 3.....	101
Tabelle 28: Position der Temperaturmesspunkte Naht 4.....	103
Tabelle 29: Parameter der Ersatzwärmequellen für ebene Platten .....	122
Tabelle 30: Parameter der Ersatzwärmequelle Naht 1-4 Profilknoten .....	122