



Florian Werner Stiefler, BSc.

Einfluss der Oberflächenrauheit auf die Nahtqualität beim Elektronenstrahlschweißen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing Christopher Alois Wiednig

Institut für Werkstoff und Schweißtechnik

Assoc. Prof. Dipl.-Ing Dr. techn. Norbert Enzinger

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Assoc. Prof. Dipl.-Ing Dr. techn. Norbert Enzinger für die schnelle Zuteilung der Diplomarbeit und für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Ebenso gilt mein Dank Dipl.-Ing Christopher Alois Wiednig, der mich während meiner Arbeit umfassend betreut hat. Obwohl ich ihm oft mit meinen Fragen den einen oder anderen Nerv geraubt habe, hat er diese stets mit Geduld und Hingabe beantwortet.

Wenngleich ich vom Laborpersonal darauf hingewiesen wurde ihnen nicht zu danken, möchte ich an dieser Stelle doch erwähnen, dass ohne sie eine schnelle Durchführung meiner Diplomarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern. Sie haben mir nicht nur mein Studium ermöglicht, sondern sind mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Zudem möchte ich meinen Studiumskollegen Dominik und Philipp danken, die mich durch das ganze Studium begleitet haben.

Zuletzt möchte ich mich bei meiner langjährigen Freundin Laura bedanken. Sie hat in nicht so schönen Zeiten meines Studiums immer die richtigen Worte gefunden um mich aufzubauen.

Florian Stiefler

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Auswirkung der Oberflächenrauheit der Stoßflächen auf die Schweißnahtgüte beim Elektronenstrahlschweißen. Dazu wurden zwei unterschiedliche Probendicken mit jeweils vier unterschiedlichen Oberflächenrauheiten untersucht. Proben mit gleicher Dicke wurden auch mit gleichen Parametern verschweißt. Diese Parameter wurden durch Vorversuche bestimmt. Die verschweißten Proben wurden mittels makroskopischer Sichtprüfung Lichtmikroskopie, Mikro- und Makrohärtemessung, Rasterelektronenmikroskop sowie energiedispersivem Röntgenspektrometer untersucht. Mit diesen Untersuchungen sollten metallurgische Unterschiede der einzelnen Proben zueinander dargestellt werden. Außerdem sollten Schweißfehler, wie Risse und Poren, gefunden werden. Zusätzlich wurden Zugversuche durchgeführt.

Alle Proben weisen in den Randzonen streifenförmigen δ -Ferrit auf. Metallurgisch unterscheiden sie sich nur gering. Alle Zugproben versagten im Grundwerkstoff und die mechanischen Kennwerte sind ähnlich. Es konnte kein Einfluss der untersuchten Oberflächenrauheit auf den Elektronenstrahlschweißprozess festgestellt werden.

Abstract

The present thesis is about the effect of surface roughness of the abutting surface on the quality of the welding seams during electron beam welding. Within this project two samples of different thickness, each of which with four different surface roughness, have been analysed. In doing so, samples of same thickness have been welded with same parameters. These parameters had been determined in the course of preliminary tests. The welded samples have been examined by macroscopic visual inspection, light microscopy, micro-and macro-hardness measurement, scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometer. These examinations not only aimed to demonstrate the metallurgical differences of the individual samples, but also revealed weld defects such as cracks and pores. Additionally tensile tests have been conducted.

All samples exhibited lamellar δ -ferrite in the heat affected zone. The metallurgical differences were only marginal. All tensile specimen failed in the base material and the mechanical parameters were similar. An influence of the surface roughness on the process of electron beam welding had not been observed.

Inhaltsverzeichnis

1	<u>Einleitung</u>	1
2	<u>Literatur</u>	2
2.1	ELEKTRONENSTRAHLSCHWEIßEN	2
2.1.1	WIRKWEISE DES ELEKTRONENSTRAHLS BEIM SCHWEIßEN	2
2.1.1.1	Erzeugung des Elektronenstrahls.....	2
2.1.1.2	Elektronenstrahlführung.....	4
2.1.1.3	Elektronenstrahlwirkung.....	8
2.1.2	MASCHINENAUFBAU	11
2.1.3	SCHWEIßNAHTFORMEN	13
2.1.4	SCHWEIßNAHTVORBEREITUNG.....	14
2.1.4.1	Reinigung der Bauteile	15
2.1.4.2	Entmagnetisieren.....	16
2.2	OBERFLÄCHENRAUHEIT	18
2.3	WERKSTOFF	20
2.3.1	SCHWEIßEN	22
2.3.2	WÄRMEBEHANDLUNGEN	24
2.4	Δ-FERRIT	26
3	<u>Versuchsaufbau</u>	28
3.1	VERWENDETER WERKSTOFF	28
3.2	MASCHINENBESCHREIBUNG	29
3.3	PROBENBEZEICHNUNG	30
3.4	PROBENGEOMETRIE	31
3.5	SCHWEIßPROBENVORBEREITUNG	32

3.6	PROBENAUFNAHME	32
3.7	SCHWEIßPARAMETER	34
3.8	ABLAUF BEIM SCHWEIßEN	35
4	<u>Auswertung</u>	<u>36</u>
4.1	PROBENVORBEREITUNG.....	36
4.1.1	PROBENENTNAHME	36
4.1.2	SCHLEIFEN, POLIEREN UND ÄTZEN	37
4.2	METALLOGRAPHISCHE AUSWERTUNG.....	39
4.2.1	MAKROSKOPIE	39
4.2.2	MIKROSKOPISCHE AUSWERTUNG.....	42
4.2.2.1	Proben mit einer Dicke von 20 mm.....	42
4.2.2.2	Proben mit einer Dicke von 100 mm.....	51
4.3	ZUGVERSUCH.....	55
4.3.1	PROBEN MIT EINER DICKE VON 20 MM.....	56
4.3.2	PROBEN MIT EINER DICKE VON 100 MM	58
4.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	60
5	<u>Resultat.....</u>	<u>62</u>
6	<u>Ausblick</u>	<u>63</u>
7	<u>Abbildungsverzeichnis.....</u>	<u>64</u>
8	<u>Tabellenverzeichnis</u>	<u>68</u>
9	<u>Literaturverzeichnis.....</u>	<u>69</u>
10	<u>Anhang</u>	<u>73</u>
10.1	PRÜFBERICHTE DES WERKSTOFFES	73
10.2	HÄRTEMESSUNG	77

10.2.1	PROBE LÄNGS 20-08-3	77
10.2.2	PROBE QUER 20-16-1	78
10.2.3	PROBE QUER 20-63-1	78
10.2.4	PROBE QUER 20-125-1	79
10.2.5	PROBE QUER MITTE 100-26-1	79
10.2.6	PROBE QUER UNTEN 100-26-1	80
10.3	ZUGPROBEN	80

1 Einleitung

Durch den stetig wachsenden Fortschritt der Industrie steigen auch die gestellten Anforderungen an geschweißte Bauteile. Es zählen nicht nur sehr gute mechanische Eigenschaften und Weiterverarbeitbarkeit, sondern die Faktoren Zeit und Geld fallen immer mehr ins Gewicht. Dickwandige Bauteile können mit konventionellen Schweißverfahren (MIG, MAG, usw.) nur mit mehrlagigen Nähten miteinander verschweißt werden. Neben der Nahtvorbereitung ist auch das Auftragen der einzelnen Schweißlagen mit sehr hohen Kosten und hohem Zeitaufwand verbunden.

Beim Elektronenstrahlschweißen können dickwandige Bauteile ohne aufwendige Nahtvorbereitung verschweißt werden. Die Fügeflächen der Bauteile müssen jedoch vor dem Schweißprozess spanend bearbeitet werden, um gewisse Form- und Maßtoleranzen einzuhalten. Jeder spanende Bearbeitungsschritt ist direkt mit Kosten und Zeit verbunden. Um den Schweißprozess wirtschaftlicher gestalten zu können, soll untersucht werden, welchen Einfluss unterschiedliche Oberflächenrauheiten auf die Güte der Schweißnähte haben. Zusätzlich soll eine Aussage getroffen werden, welche Oberflächenrauheit am Besten für den Elektronenstrahlschweißprozess geeignet ist.

2 Literatur

Folgendes Kapitel behandelt theoretisches Wissen, welches zur Durchführung und zum Verständnis dieser Arbeit beigetragen hat.

2.1 Elektronenstrahlschweißen

Seit ungefähr 1900 [1] ist bekannt, dass mit einem Elektronenstrahl Metall geschmolzen werden kann, aber die ersten relevanten Anwendungen fand das Elektronenstrahlschweißen erst in den fünfziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Dieses Verfahren ermöglicht ein präzises Schweißen von Bauteilen mit einer Schweißtiefe von 0,1 mm bis 300 mm [2]. Dieses Verfahren wird in der Luft- und Raumfahrttechnik, Nukleartechnik und im Kraftwerksbau verwendet.

Folgende Eigenschaften zeichnen das Elektronenstrahlschweißen aus:

- Gute Nahtqualität
- Schweißparameter sehr gut steuer- und regelbar
- Schmale Schmelz- und Wärmeeinflusszone
- Geringes Verhältnis von Nahtbreite zu Nahttiefe
- Verschweißen von reaktiven Werkstoffen und Mischverbindungen
- Geringer Verzug der Bauteile [1], [3]

2.1.1 Wirkweise des Elektronenstrahls beim Schweißen

Die Wirkweise des Elektronenstrahls kann mit folgenden drei Teilprozessen dargestellt werden:

- Erzeugung des Elektronenstrahls
- Elektronenstrahlführung
- Elektronenstrahlwirkung [4]

2.1.1.1 Erzeugung des Elektronenstrahls

Das Elektronenstrahlschweißen nutzt die kinetische Energie beschleunigter Elektronen um Wärme in das Werkstück einzubringen. Dieses Schweißverfahren

wird im Vakuum ausgeführt um Kollisionen der beschleunigten Elektronen mit Luftmolekülen zu verhindern. Dies würde sonst zu Veränderungen der Elektronenbahnen führen und die Elektronen erheblich abbremsen.

Die Katode muss die Elektronen bereitstellen. Für eine hohe Strahlungsdichte ist eine Temperatur von 2800° C an der Emissionsfläche der Katode erforderlich.

Um die Elektronen in Bewegung zu setzen, wird an der Katode eine negative Spannung, die Beschleunigungsspannung, angelegt. Nach der Katode befindet sich die Anode, die Anode besitzt Erdpotential. Durch das Elektrische Feld, das zwischen Anode und Katode entsteht, werden die Elektronen auf zwei Drittel der Lichtgeschwindigkeit (bei 150kV, bei 60kV auf $c/2$ [1]) beschleunigt. In der Anode befindet sich eine Bohrung, da sonst die Elektronen auf die Anode prallen würden und nicht auf das Werkstück. Dieser Maschinenaufbau wird Pierce-System genannt. Der Elektronenstrahl kann nur durch Ändern der Beschleunigungsspannung oder der Katodentemperatur beeinflusst werden.

Aus wirtschaftlichen Gründen wurden die Pierce-Systeme durch Triodensysteme ersetzt. Der Aufbau mit Anode und Katode wird durch eine zusätzliche Komponente, der Steuerelektrode oder auch Wehneltzylinder genannt, erweitert. Die Steuerelektrode befindet sich im Ausgangszustand auf dem Potential der Katode. Durch eine zusätzliche Versorgung erhält die Steuerelektrode eine höhere negative Spannung als die Katode. Die Steuerelektrode und die Katode besitzen die gleiche Polarität. Somit ist es der Steuerelektrode möglich den Elektronenstrom zwischen Anode und Katode völlig zu sperren (siehe Abbildung 1a). Somit besitzt die Katode keine wirksame Emissionsfläche mehr. Durch Regulierung der Steuerspannung wird die Größe der Elektronenemissionsfläche verändert. Ein hohe Steuerspannung führt zu einer kleinen Emissionsfläche und eine niedrige Steuerspannung zu einer großen Emissionsfläche (siehe Abbildung 1b und Abbildung 1c). Die Steuerspannung darf nur soweit verringert werden, dass die Emissionsfläche nicht größer als die Katodenstirnfläche wird. Werden Elektronen an den Katodenschenkeln emittiert, führt dies zu einer erheblichen Verzerrung des Elektronenstrahls (siehe Abbildung 1d) [1], [5].

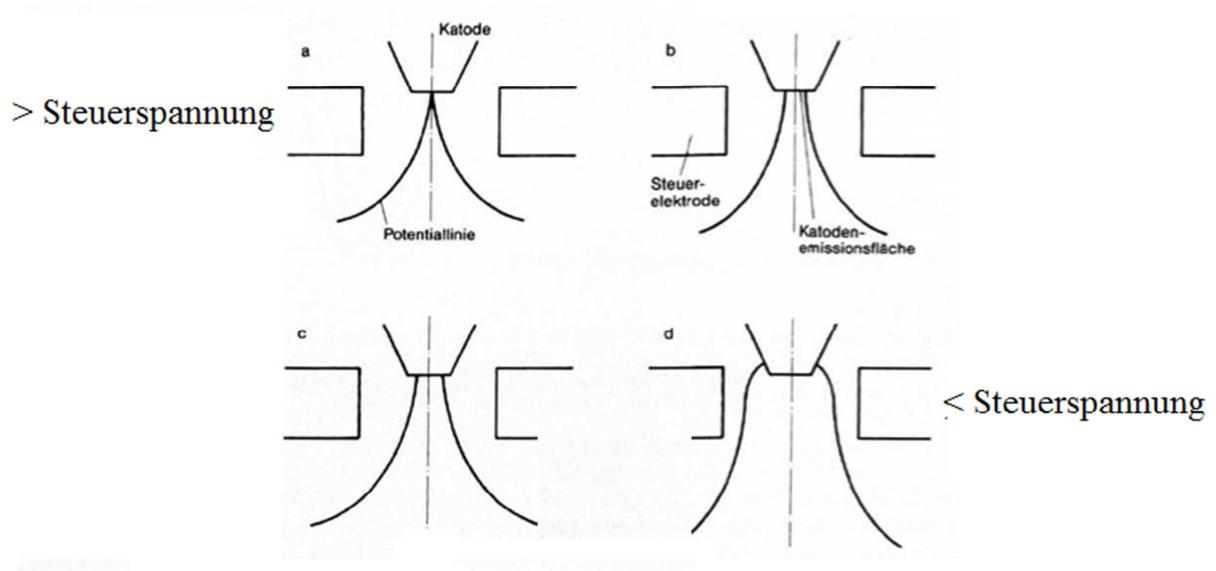


Abbildung 1: Verlauf der Potentiallinien bei unterschiedlichen Steuerspannungen [1]

2.1.1.2 Elektronenstrahlführung

Abbildung 2 zeigt den Weg und die Form des Elektronenstrahls von der Strahlenquelle bis zum Werkstück.

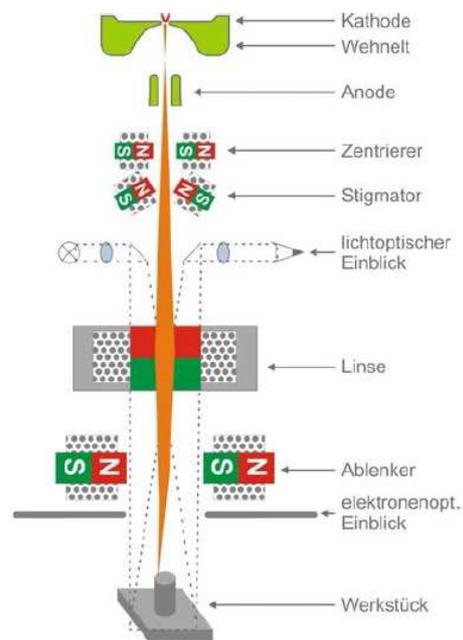


Abbildung 2: Elektronenstrahlgenerator [6]

Dicht unter der Katodenemissionsfläche wird der Elektronenstrahl als Folge der Geometrie und der Spannung der Steuerelektrode eingeschnürt. Es kommt zum sogenannten reellen Crossover (siehe Abbildung 3). Der reelle Crossover kann nicht in einem fixen Schnittpunkt definiert werden, sondern erstreckt sich über einen gewissen Bereich. Der virtuelle Crossover entsteht durch die Rückverlängerung der Elektronenbahnen und stellt einen wichtigen Indikator für elektronenoptische Berechnungen dar [1] [2].

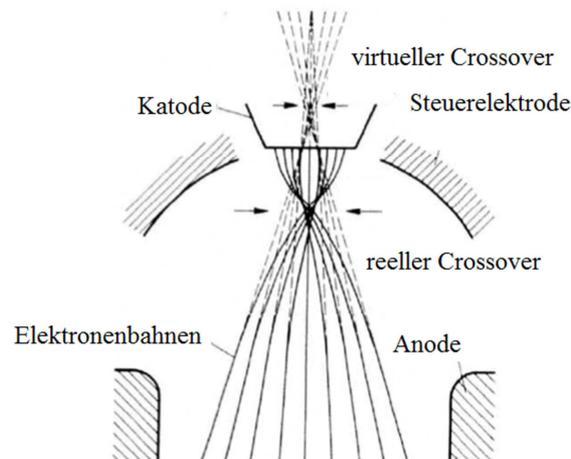


Abbildung 3: Virtueller und reeller Crossover [1]

Die Elektronen werden zwischen Anode und Katode auf Zweidrittel der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Die gleichpoligen Elektronen stoßen sich beim Passieren der Anode gegenseitig ab. Es entsteht ein divergenter Strahl. Durch die konische Form des Elektronenstrahls wird die zum Schweißen von Metall notwendige Leistungsdichte nicht erreicht. Um die notwendige Leistungsdichte zu erreichen, wird der Elektronenstrahl mit einer Fokussierlinse gebündelt. Zum Schweißen von Metallen wird ein Fokusbereich von etwa 0,1 bis 1,0 mm verwendet und es ist eine Leistungsdichte von $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ notwendig [1], [4].

Als Fokussierlinse wird ein Eisenjoch mit einer Kupferspule verwendet (siehe Abbildung 4). Das in der Spule erzeugte Magnetfeld verlässt das Eisenjoch zur Strahlseite hin. Das Magnetfeld ändert die Bahn der negativ geladenen Elektronen. Die Änderung der Elektronenstrahlbahn und somit auch die Brennweite der elektromagnetischen Fokussierlinse ist vom Spulenstrom, der kinetischen Energie

der Elektronen und von dem Aufbau der Spule abhängig. Durch eine stufenlose Änderung des Spulenstroms ist auch eine stufenlose Regulierung des Fokusabstands möglich. Der Elektronenstrahl erfährt beim Passieren der Fokusslinse keine Geschwindigkeitsänderung. [1], [2], [7].

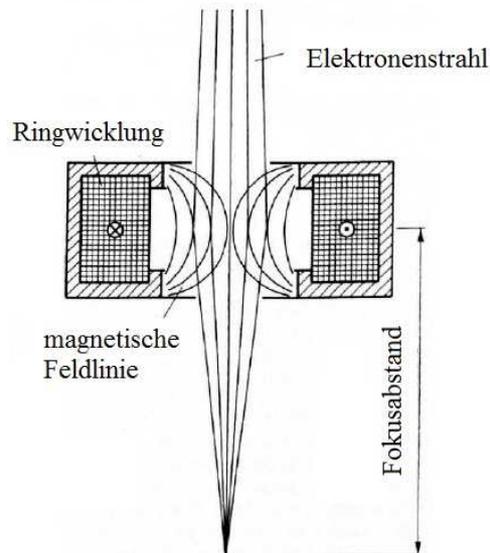


Abbildung 4: Fokussierung eines Elektronenstrahls mittels einer elektromagnetischen Linse [1]

Um astigmatische Fehler des Elektronenstrahls zu verhindern, wird ein Stigmator verwendet. Ein Stigmator besteht aus zwei einander gegenüberliegenden gleichpoligen Magnetspulen (siehe Abbildung 5). Durch eine Steuerung der einzelnen Spulenströme werden astigmatische Fehler des Elektronenstrahls beseitigt [7].

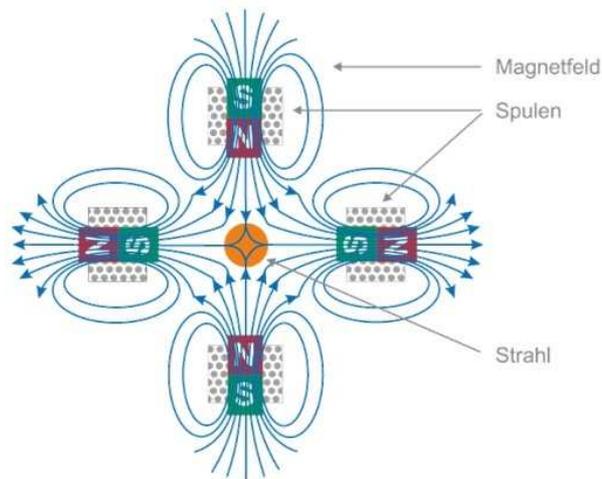


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Stigmators [8]

Zur Positionierung des Elektronenstrahls auf dem Werkstück wird ein Ablenker verwendet. Ein Ablenker besteht aus zwei gegenüberliegenden nicht gleichpoligen Magnetspulen (siehe Abbildung 6). Durch Änderung der Spulenströme folgt eine Änderung der Magnetfelder. Dies ermöglicht eine einachsige Steuerung des Elektronenstrahls auf dem Werkstück. Erweitert man den Ablenker um ein weiteres Spulenpaar, erhält man einen x-y – Ablenker [2].

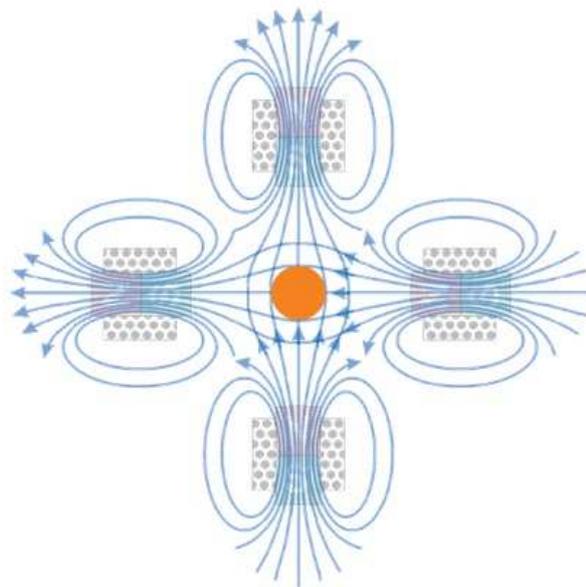


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Ablenkers [8]

2.1.1.3 Elektronenstrahlwirkung

Die beschleunigten Elektronen prallen auf die Werkstückoberfläche. Durch den hohen Masseunterschied zwischen den Elektronen und den Atomkernen des Werkstücks wird die kinetische Energie nicht direkt auf die Gitteratome des Werkstoffes übertragen. Die Strahlelektronen kollidieren mit den freibeweglichen Leitungselektronen. Die übertragene Stoßenergie wird weiter zu den Gitterphononen geleitet und diese versetzen die Gitteratome in einen Zustand mit höherer Bewegungsenergie. Dies führt zu einer lokalen Erhöhung der Temperatur. Ab einer Leistungsdichte von $1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ des Elektronenstrahls schmilzt und in weiterer Folge verdampft der Werkstoff. Nicht allen Elektronen ist es möglich in die Werkstoffoberfläche einzudringen und somit ihre kinetische Energie an die Gitteratome weiterzugeben. Die Primärelektronen prallen an der Werkstoffoberfläche ab oder sie dringen in die Oberfläche ein und diffundieren später wieder aus (siehe Abbildung 7). Durch das Eindringen von Primärelektronen werden Leitungselektronen aus dem Werkstück befördert. Diese werden Sekundärelektronen genannt. Die Sekundärelektronen können, wie bei einem Rasterelektronenmikroskop, dazu genutzt werden, Echtzeitbilder von der Werkstückoberfläche zu erzeugen.

Beim Abbremsen der Primärelektronen entsteht eine Röntgenstrahlung. Diese setzt sich aus der Röntgenabbremsstrahlung und einer charakteristischen werkstoffbezogenen Röntgenstrahlung zusammen (siehe Abbildung 7) [1], [9].

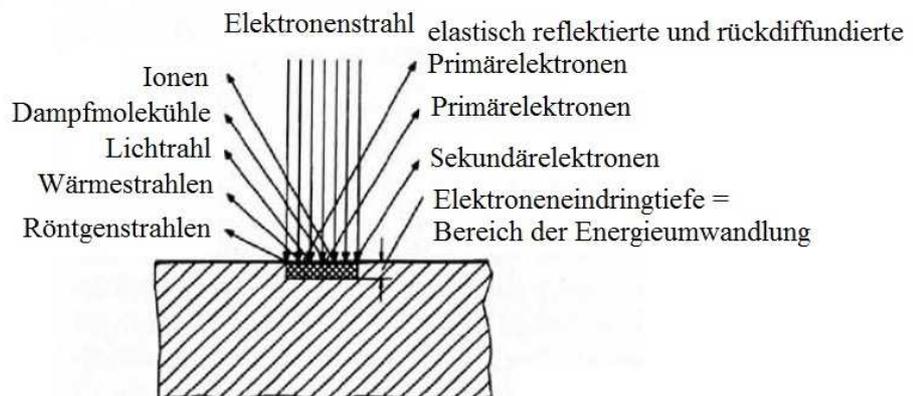


Abbildung 7: Reflexionen des Elektronenstrahls von der Werkstückoberfläche [1]

Beginnt der Werkstoff zu schmelzen und in weiterer Folge zu Verdampfen, dringt der Elektronenstrahl in das Werkstück ein (siehe Abbildung 8a und b).

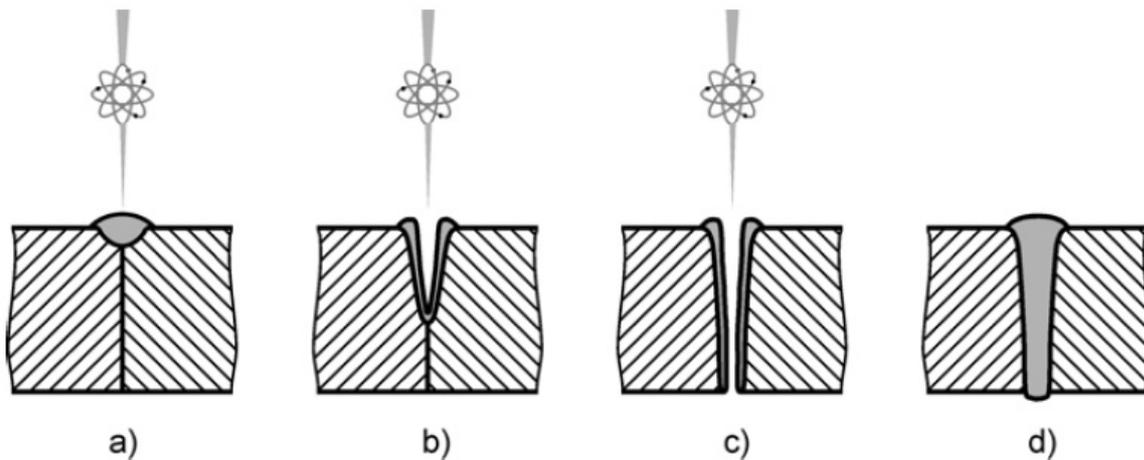


Abbildung 8: Aufschnelzen der Schweißfuge [5]

Es entsteht die Dampfkapillare (siehe Abbildung 9). Die Dampfkapillare ist mit Metaldampf gefüllt und mit flüssigem Metall umgeben. Die Schmelze zirkuliert im Dampfkanal (siehe Abbildung 9). Durch den Dampfdruck wird die Schmelze gegen die Kanalwand gedrückt und verhindert dadurch ein Schließen des Dampfkanals. Am Boden des Dampfkanals trifft der Elektronenstrahl auf festen Werkstoff und schmilzt diesen auf. Dadurch gräbt sich der Elektronenstrahl weiter in das Werkstück hinein und es kommt zum Tiefenschweißeffekt. Der Elektronenstrahl durchdringt bei ausreichender Energiezufuhr den ganzen Querschnitt des Werkstücks (siehe Abbildung 8c). Das Werkstück wird entlang der Schweißfuge relativ zum Elektronenstrahl bewegt und es wird neues Material aufgeschmolzen. Dieses fließt um die Dampfkaverne und erstarrt an der Rückseite (siehe Abbildung 9) [7], [9], [10], [11].

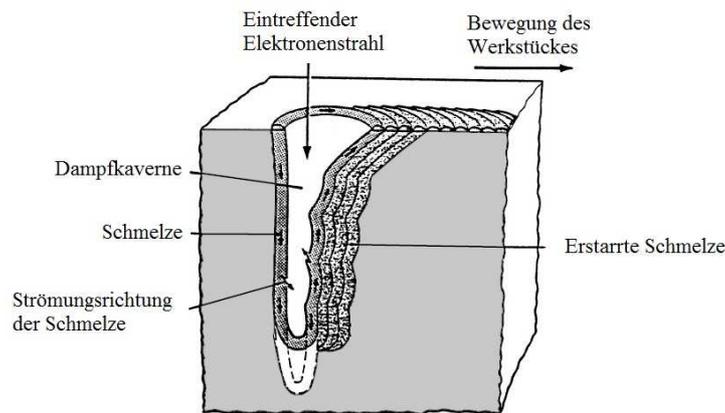


Abbildung 9: Aufschmelzvorgang beim Elektronenstrahlschweißen [11]

Beim Schweißen können Hochspannungsüberschläge entstehen. Mögliche Gründe dafür sind Legierungselemente mit hohen Dampfdrücken, Verunreinigungen und lokale Gaseinschlüsse. Beim Schweißprozess kommt es dann zu eruptionsartigen Dampfemissionen. Diese behindern im Elektronenstrahlerzeuger den Elektronenstrahl. Mit zunehmender Schweißtiefe steigt die Anzahl der Hochspannungsüberschläge. Sie werden in harte und weiche Überschläge unterteilt [1], [12].

Harte Überschläge entstehen aus nichtselbstständig löschenden Lichtbogen. Der Lichtbogen liegt zwischen teilen mit Hochspannungs- und Erdpotential an. Dies führt zum Auslösen der Überstromsicherung und in weiterer Folge einem Abschalten der Elektronenstrahlkanone. Folgen der harten Hochspannungsüberschläge sind meist schwere irreparable Fehler in der Schweißnaht [12].

Die Ursache für weiche Hochspannungsüberschläge sind selbstlöschende Vorentladungen zwischen der Steuerelektrode und der Anode. Dies führt zu einer kurzfristigen Änderung des Strahlstroms und somit zu Fehlern in der Schweißnaht. Harte Überschläge verursachen meist schwerwiegendere Fehler in der Schweißnaht als weiche [12].

Das Auftreten der Hochspannungsüberschläge ist durch eine Veränderung der Schweißparameter nur wenig beeinflussbar [12].

2.1.2 Maschinenaufbau

Nahezu jede Elektronenstrahlschweißmaschine unterscheidet sich von den Anderen. Durch die unterschiedlichen Anforderungen der jeweiligen Benutzer und durch die unterschiedlichen Einbindungsmöglichkeiten in bestehende betriebliche Anforderungen wird jede Maschine für ihre bestimmte Aufgabe geplant und gefertigt. Abbildung 10 zeigt die erforderlichen Komponenten einer Elektronenstrahlschweißmaschine [13].

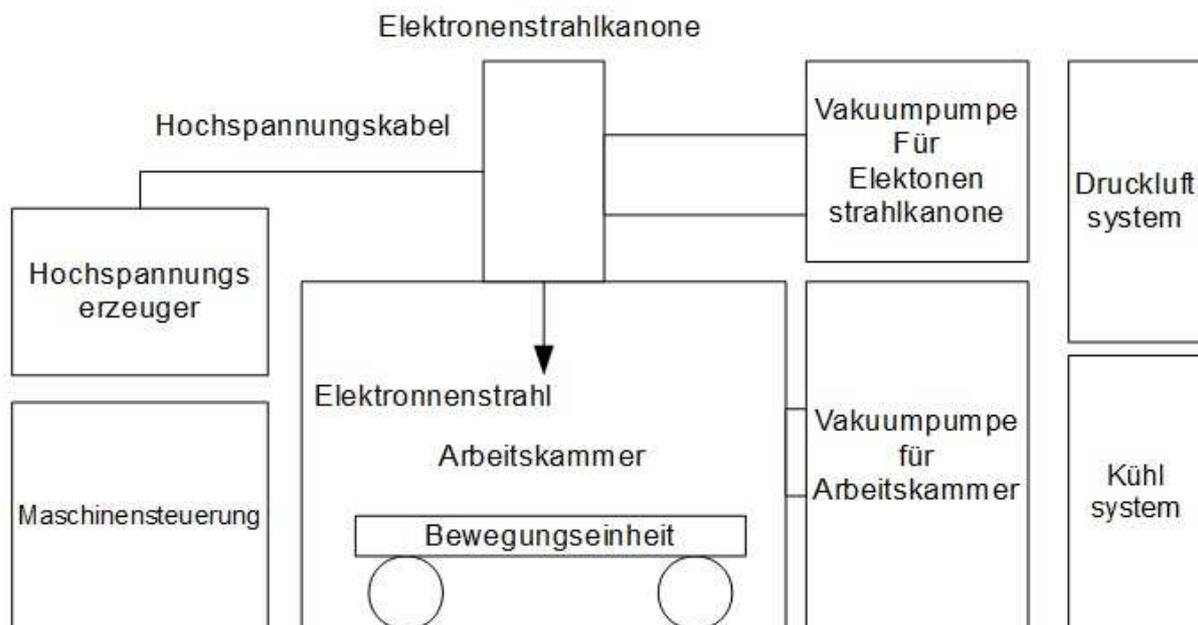


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Komponenten einer Elektronenstrahlmaschine [13]

Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau eines Elektronenstrahlgenerators. Der Elektronenstrahlgenerator übernimmt die Erzeugung und die Steuerung des Elektronenstrahls. Er wird horizontal oder vertikal an die Arbeitskammer angeflanscht. Bei größeren Anlagen wird der Elektronenstrahlgenerator an einem Roboterarm angebracht. Der Strahlerzeugerraum ist mittels einer Druckstufe vom Strahlführungsraum getrennt. Dies soll der Aufrechterhaltung des Vakuums im Strahlerzeugerraum beim Wechseln eines Werkstücks dienen [14].

In der evakuierten Arbeitskammer befindet sich die Bewegungseinheit und auf dieser das Werkstück. Die Stabilitätsanforderung an die Kammer durch die Luftdruckkräfte

ist sehr hoch. Abbildung 11 zeigt verschiedene Ausführungen von Maschinenkonzepten. Kammer-Maschinen sind durch Einbau verschiedener Vorrichtungen universal einsetzbar. Nach jedem Wechseln des Werkstückes muss jedoch das komplette Kammervolumen evakuiert werden. Damit erhöht sich die Zykluszeit erheblich. Um die Zykluszeit zu verkürzen werden Mehrkammer-Maschinen (siehe Abbildung 11 b und c) oder Taktmaschine mit auf die Werkstücke angepassten Arbeitskammern verwendet [2], [14].

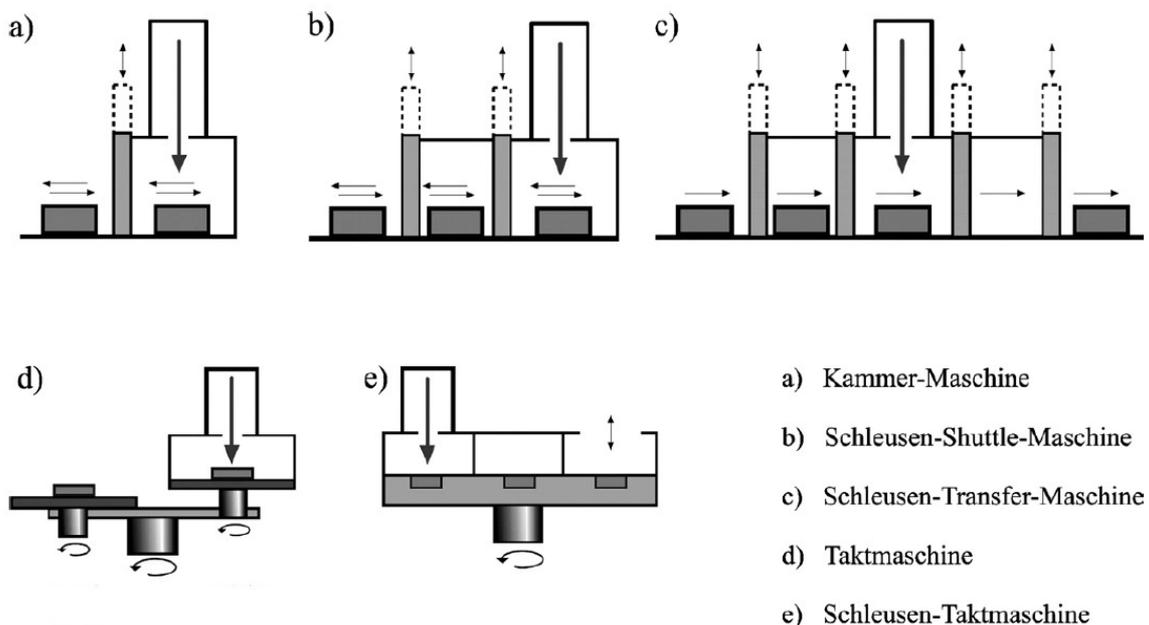


Abbildung 11: Verschiedene Ausführung von Arbeitskammern [8] [4]

An die Arbeitskammer und an den Elektronenstrahlgenerator sind verschiedene Vakuumpumpen angeschlossen. Es wird in der Regel ein Arbeitsdruck in der Kammer von kleiner 1×10^{-4} mbar benötigt, dabei wird immer ein bestimmter Druckbereich von einer Vakuumpumpe abgedeckt. In Abbildung 12 sind verschiedene Vakuumpumpen und deren Arbeitsbereich aufgelistet.

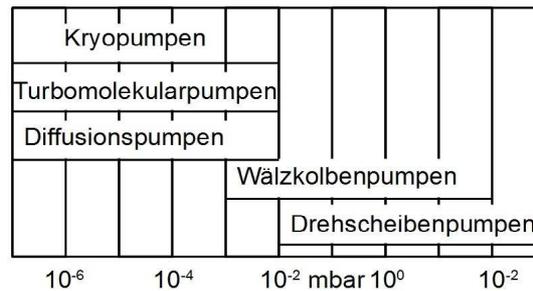


Abbildung 12: Verschiedene Vakuumpumpen [1]

Durch das Vakuum wird sichergestellt, dass der Elektronenstrahl nicht mit im Raum vorhandenen Molekülen kollidiert und damit in Geometrie und Form verändert wird. Die Steuerung der Maschine wird entweder von einer SPS oder einem CNC System übernommen [13] [15].

2.1.3 Schweißnahtformen

Am häufigsten werden Schweißnähte als I-Naht ausgeführt. Durch den Tiefenschweißeffekt ist weder ein X- oder Y-förmiges abschrägen der Stoßkanten als Fugenvorbereitung noch die Beigabe von Schweißzusätzen notwendig. Beim I-Stoß wird zwischen Längs- und Rundnähten unterschieden [16].

Ein grundsätzliches Problem beim I-Stoß in Längsform ist die Einhaltung der Form und Lagetoleranzen. Die Zentrierung der Bauteile kann mittels einer Zentrierlippe, mit einer Unterlage oder mit einer Innenzentrierung erfolgen (siehe Abbildung 13).

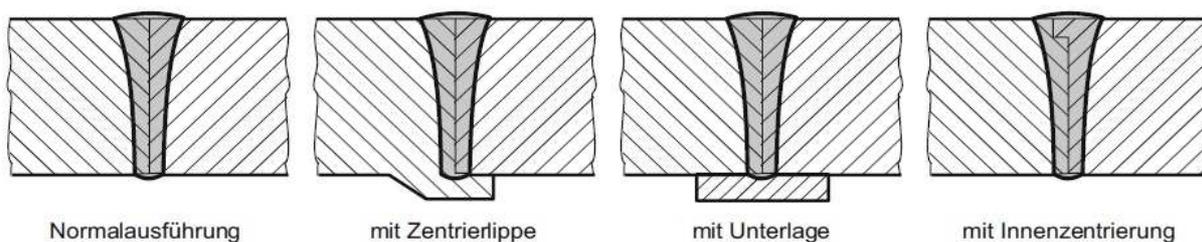


Abbildung 13: Ausführung von I-Nähten [4]

Rundnähte können in Axial und Radialnähte eingeteilt werden. Geschlossene Hohlräume müssen mit einer Entlüftungsbohrung versehen werden. Wenn während

des Schweißprozesses die eingeschlossene Luft entweicht, führt dies zur Störung des Elektronenstrahls. Die Zentrierung der Bauteile erfolgt mittels Zentrierlippe [7].

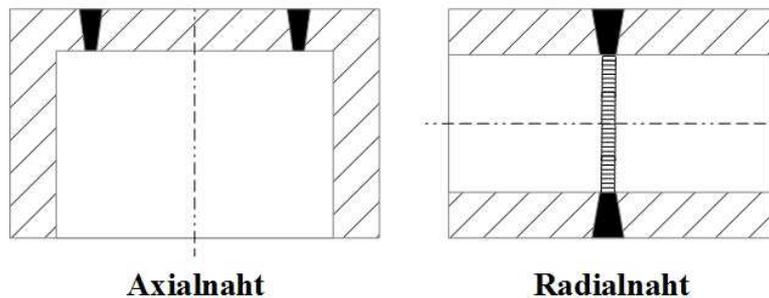


Abbildung 14: Rundnähte [2]

Abbildung 15 zeigt verschiedene Ausführungen von T-Stößen. Beim Schweißen von Kehlnähten muss der Elektronenstrahl abgelenkt (geknickt) oder das Bauteil gekippt werden, da sonst eine gesamte Aufschmelzung der Fügezone nicht möglich ist. Ein Abschrägen der Stoßfläche ist nicht notwendig [1].

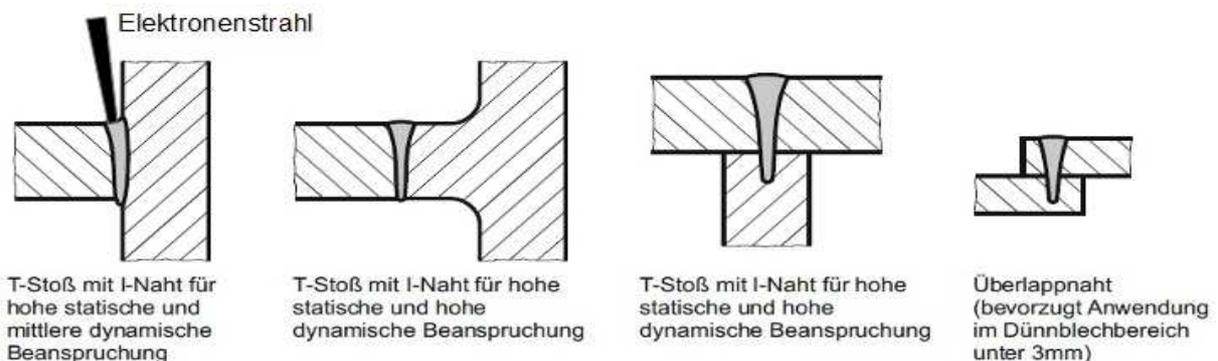


Abbildung 15: Sonstige Schweißnahtformen [4]

2.1.4 Schweißnahtvorbereitung

Im Vergleich zu konventionellen Gas- und Lichtbogenschweißverfahren ist die Schweißnahtvorbereitung relativ einfach. Scharfe Stoßkanten sollen vorhanden sein, um die optische Positionierung des Elektronenstrahls zu erleichtern. Ansonsten müssen die zu verschweißenden Bauteile nur entmagnetisiert und gereinigt werden [7].

2.1.4.1 Reinigung der Bauteile

Um eine qualitativ hochwertige Schweißnaht herzustellen müssen die Schweißflächen frei von Verunreinigungen sein. Ist diese nicht gegeben, kann dies zu Poren, Einschlüssen und Rissen in der Schmelzzone führen. Die Bauteiloberfläche muss frei von Rost- und Oxidschichten, Öl, Fett, Schmutz und Farben sein. Man unterscheidet zwischen chemischen und mechanischen Reinigungsverfahren [17] [18].

Die am häufigsten verwendeten chemischen Reinigungsverfahren sind:

- Entfetten mit Alkohol
- Dampfentfetten
- Reinigen mit Trichlorethylen
- Alkalisches Reinigen mit wässriger Lösung

Mit diesen Reinigungsverfahren werden die Schichten 4, 5, und 6 in Abbildung 16 beseitigt. Eine Oxidschicht ist bei den meisten Bauteilen aufgrund einer vorangegangenen mechanischen Bearbeitung nicht vorhanden [7], [17].

Mit mechanischen Reinigungsverfahren werden alle Oberflächenschichten entfernt. Dies hinterlässt für eine erneute Oxidation eine empfindliche Oberfläche. Mechanische Reinigungsverfahren werden deshalb unmittelbar vor dem Schweißen angewendet. Zu den mechanischen Reinigungsverfahren zählen:

- Bürsten mit Metallbürsten
- Schleifen mit Schleifmittel
- Strahlen mit abrasivem Strahlgut [17]

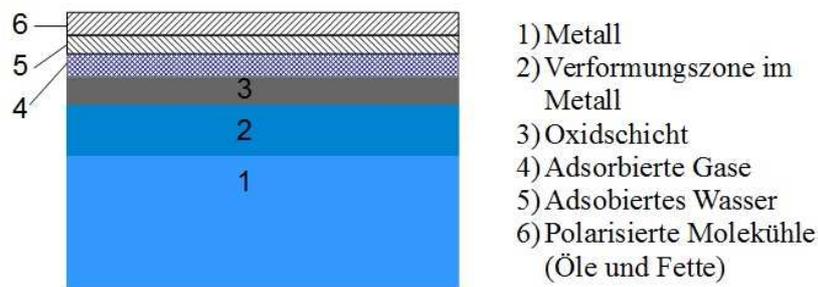


Abbildung 16: Oberflächenaufbau eines metallischen Werkstoffes [7]

2.1.4.2 Entmagnetisieren

Die Ursache für Magnetismus ist der atomare Aufbau des Werkstoffes. Umlaufende Elektronen und deren Eigenrotation stellen kreisende Ströme dar, diese in weiterer Folge das magnetische Feld erzeugen. Die einzelnen magnetischen Ströme heben sich gegenseitig auf, sodass sich der Werkstoff nach außen hin magnetisch neutral verhält. Ein äußeres magnetisches Feld kann die Ausrichtung der Felder beeinflussen, wodurch es zu einer magnetischen Wirkung des Werkstoffes kommt. Wird das äußere Magnetfeld durch das des Werkstoffes geringfügig geschwächt, spricht man von Diamagnetismus, wird das äußere Magnetfeld durch die magnetische Wirkung des Werkstoffes verstärkt, spricht man von Paramagnetismus. Eine Sonderform des Paramagnetismus ist der Ferromagnetismus. Ferromagnetische Werkstoffe verstärken das äußere Feld und werden von diesen erheblich angezogen. Durch die magnetischen Felder werden die inneren und äußeren Elektronenströme stark beeinflusst. Nach Wegnahme des äußeren Feldes kann der magnetische Zustand des Werkstoffes erhalten bleiben. Besonders ferromagnetische Stoffe sind Eisen, Nickel und Kobalt [19], [20], [21].

Um einen Bauteil zu entmagnetisieren, wird dieser einem Wechselfeld ausgesetzt. Das Magnetfeld muss der Stärke des Koerzitivfeldes des Bauteils entsprechen. Es erfolgt eine Entmagnetisierung des Bauteils durch das Durchlaufen des Wechselfeldes, wobei die magnetische Stärke ständig abnimmt. Abbildung 17 zeigt die Hystereseurve des Entmagnetisierungsvorgangs [21] [22].

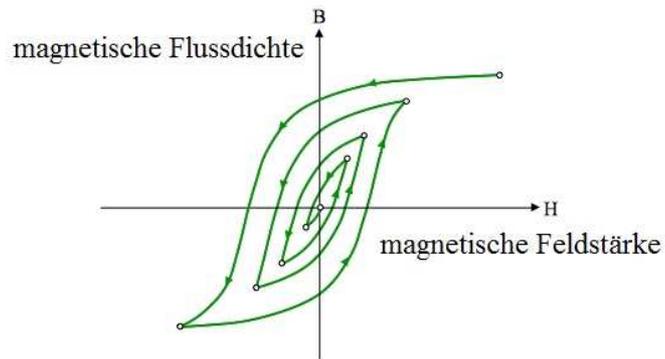


Abbildung 17: Entmagnetisierung eines Bauteils mittels eines Wechsellagnetfeldes [23]

Wie im Abschnitt 2.1.1.2 erläutert wird die Geometrie des Elektronenstrahls mit Hilfe von elektrischen Feldern beeinflusst und kann erheblich verändert werden. Durch verschiedene Fertigungsverfahren entstehen magnetische Felder am Bauteil. Diese können die Form und die Richtung des Elektronenstrahls erheblich beeinflussen und führen somit zu Schweißfehlern. Durch die Form- und Richtungsänderungen des Elektronenstrahls ist ein nicht vollständiges Verschweißen der Bauteile möglich. Das Bauteil und auch weitere Einbauten, wie Vorrichtungen und Spannmittel, müssen vor dem Schweißen auf eine magnetische Flussdichte von 2 bis 10 Gauß entmagnetisiert werden [7].

Durch unterschiedliche Temperaturgradienten in verschiedenen Metallen entstehen thermoelektrische Felder. Diese Temperaturgradienten liegen am Bauteil in allen Richtungen an. Die vorhandenen Temperaturgradienten und der Elektronenstrahl erzeugen in der Fügefläche thermoelektrische Ströme im Werkstück. Die thermoelektrischen Ströme bewirken ein Magnetfeld, welches den Elektronenstrahl in Form und Richtung verändert. Dieser Effekt wird als Seebeck Effekt bezeichnet [24].

2.2 Oberflächenrauheit

Die Oberflächenrauheit ist eine Gestaltungsabweichung 3. bis 5. Ordnung. Abbildung 18 zeigt die Gestaltungsabweichung 3. und 4. Ordnung sowie möglichen Ursachen [25].

Art der Gestaltungsabweichung	Art der Abweichung	Entstehungsursache
3. Ordnung 	Rillen	Form der Werkzeugschneide Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung 	Riefe Schuppen Kuppen	Art der Spannbildung Werkstoffverformung beim Sandstrahlen Knospenbildung bei galvanischer Behandlung

Abbildung 18: Gestaltungsabweichungen [26]

Abweichungen 5. Ordnung entstehen durch Kristallisationsvorgänge, chemische Einflüsse auf die Oberfläche oder durch Korrosionsvorgänge [26].

Für die Erfassung der Oberflächenrauheit stehen verschiedene Kennwerte zur Verfügung. „Der Mittenrauwert R_a ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Beträge der Abstände y_i des Ist-Profiles vom mittleren Profil“ (siehe Abbildung 19) [27].

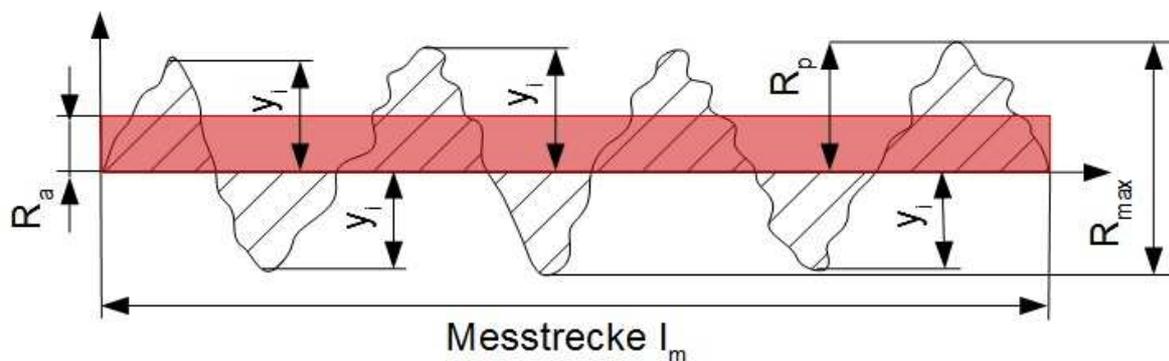


Abbildung 19: Darstellung des Mittenrauwertes R_a , der Glättungstiefe R_p und der maximalen Rautiefe R_{max}

Die mathematische Formulierung für R_a lautet wie folgt:

$$R_a = \frac{1}{l} * \int_0^l |y|_i \times d_x$$

R_a ist die Höhe des roten Rechteckes in Abbildung 19. Die Fläche des Rechteckes ist gleich der Fläche des Oberflächenprofils der Messlänge l_m [28].

Die maximale Rautiefe R_m ist die Differenz des höchsten und tiefsten Punktes des Oberflächenprofils. Die Glättungstiefe R_p folgt aus der Differenz zwischen dem höchsten Punkt des Profils und dem mittleren Profil. Das mittlere Profil würde theoretisch durch Einebnen des Rauigkeitsprofils entstehen [25] [29].

Die gemittelte Rautiefe R_z wird mit folgender Formel berechnet:

$$R_z = \frac{1}{n} * \sum_{k=1}^n z_n$$

Die Messstrecke wird in gleichgroße Bereiche unterteilt. In jedem Bereich wird der die maximale Rautiefe ermittelt und der arithmetische Mittelwert gebildet (siehe Abbildung 20) [26].

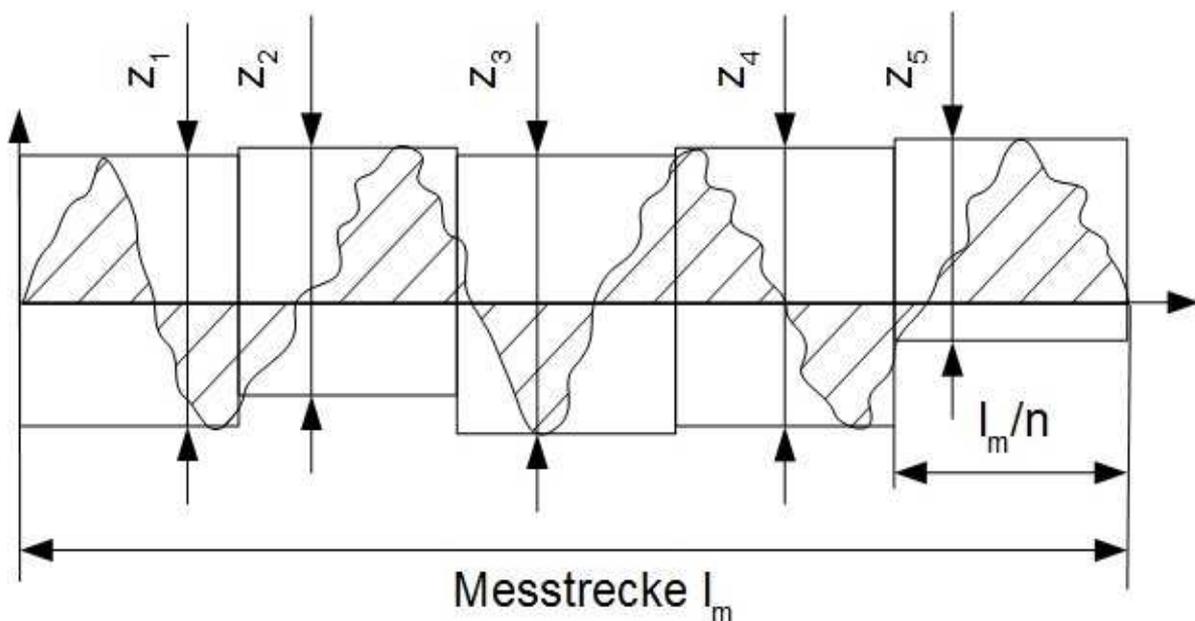


Abbildung 20: Darstellung der gemittelten Rautiefe R_z [30]

Der Mittenrauwert der Stoßflächen soll beim Elektronenstrahlschweißen einen Wert von R_a 3,2 μm [2] nicht überschreiten, da sonst unzulässige Nahtunregelmäßigkeiten auftreten können. Durch eine zu glatte Stoßfläche wird aber die Entgasung der Fügezone erschwert, was wiederum zu Fehlern in der Schweißnaht führen kann. Die Oberflächenqualität ist der angeforderten Schweißnahtgüte anzupassen. Welche genauen Auswirkungen die Oberflächenrauheit auf die Schweißnaht hat, ist unbekannt [7], [10].

2.3 Werkstoff

Bezeichnung des Werkstoffes lautet X4CrNiMo13-4 oder 1.4313. Durch das Vorhandensein eines Legierungselements mit einem Gehalt $\geq 5\%$ spricht man bei diesem Werkstoff von einem hochlegierten Stahl.

Nach DIN EN 10088-2 ist der Werkstoff X4CrNiMo13-4 ein weichmartensitischer korrosionsbeständiger Stahl [31] [32].

Tabelle 1 zeigt die Werkstoffzusammensetzung.

Tabelle 1: Legierungselemente von X4CrNiMo13-4 in %

C	Cr	Ni	Mo	N
$\leq 0,05$	12,00 – 14,00	4,00 – 6,00	0,80 -1,50	$\geq 0,02$

Um ein martensitisches Gefüge herzustellen muss mit werkstoffspezifischen hohen Abkühlgeschwindigkeiten aus dem Austenitgebiet abgekühlt werden. Die Legierungselemente Cr, Ni und Mn senken die zur Martensitbildung benötigte Abkühlgeschwindigkeit. Somit reicht bei diesem Werkstoff eine Abkühlung an Luft bereits für die Martensitbildung aus [33].

Mit steigender Abkühlgeschwindigkeit werden die möglichen Diffusionswege immer kürzer. Die Diffusionsgeschwindigkeit ist nicht mehr ausreichend groß und somit wird die diffusionsgesteuerte Phasenumwandlung unterdrückt. Die treibenden Kräfte zur Umwandlung der Kristallstruktur werden immer größer, bis eine spontane Änderung der Kristallstruktur einsetzt. Bei dieser Änderung liegt keine Konzentrationsänderung vor. Dabei klappt der kubisch-flächenzentrierte Austenit zu einem tetragonal

verzerrten raumzentrierten Martensit um. Grund für die tetragonale Verzerrung ist der auf den Zwischengitterplätzen zwangsgelöste Kohlenstoff. Es entsteht ein sehr hartes Gefüge. Durch den geringen Kohlenstoffgehalt dieses Werkstoffes (siehe Tabelle 1) entsteht ein weniger hartes Gefüge und somit Weichmartensit [19], [31], [32], [34].

Bei martensitischen Chrom-Stählen ist der Gehalt an gelöstem Chrom ein Maß für die Korrosionsbeständigkeit. Kohlenstoff bindet das Chrom zu Chromkarbid. Erhöht man bei gleichbleibendem Kohlenstoffgehalt den Chromgehalt, so steigt die Korrosionsbeständigkeit. Ab einem Gehalt von 10,5 % bildet Chrom an der Oberfläche durch Oxidation eine dünne Passivschicht. Diese Passivschicht stellt den eigentlichen Korrosionsschutz dar. Die Vergütbarkeit und Zugfestigkeit wird durch Chrom gesteigert, während die Kerbschlagzähigkeit herabgesetzt wird [35], [36].

Das Legierungselement Nickel übernimmt die Rolle des Kohlenstoffes. Somit bleibt die Vergütungsfähigkeit erhalten. Es treten keine Nachteile eines erhöhten Kohlenstoffgehaltes (Härtezunahme und Karbidausscheidungen) auf. Nickel bildet in aggressiven wässrigen und gasförmigen Medien eine Schutzschicht. Dies ermöglicht einen hohen Widerstand gegenüber Korrosion bei Nässe und gegen Oxidation bei hohen Temperaturen. Auch die Neigung zum Kriechen wird verringert. [32], [36], [37].

Das Legierungselement Molybdän steigert zusätzlich die Korrosionsbeständigkeit und verhindert ein Anlassverspröden [32].

Der 1.4313 wird in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Erdölindustrie
- Hochdruckpumpen
- Kompressorenbauteile
- Wasserkraftturbinen
- Reaktorentechnik
- Schiffsbau [38]

2.3.1 Schweißen

Das Verschweißen von Bauteilen mit Hilfe des Elektronenstrahls wird in Kapitel 2.1.1.3 erläutert. Die sehr hohe punktförmige Energie des Elektronenstrahls führt zu sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten in der Schweißnaht und in hoch erhitzten benachbarten Bereichen. Die Schmelze kühlt vorwiegend durch Wärmeleitung ab. Die Erstarrung der Schmelze, die Entstehung des Primärgefüges und die Form des Schweißbades sind von der konstitutionellen Unterkühlung der Schweißschmelze abhängig. Der Temperaturgradient G , die Kristallisationsgeschwindigkeit R und die Anzahl der gelösten Legierungselemente bestimmen wiederum die konstitutionelle Unterkühlung. Die Kristallisation beginnt an den Orten, wo die vorherrschende Temperatur kleiner ist als die Solidustemperatur. Die Erstarrung erfolgt entgegen dem Temperaturgradienten. Die Form der Erstarrung hängt von der Kristallisationsgeschwindigkeit und vom Temperaturgradienten ab. In der Mitte der Schweißnaht liegt eine hohe Kristallisationsgeschwindigkeit und ein kleiner Temperaturgradient vor. Es entstehen äquiaxiale Dendriten. In der Randschicht ist die Kristallisationsgeschwindigkeit klein und der Temperaturgradient groß. Dies führt zu einer säulenförmigen Erstarrung [39].

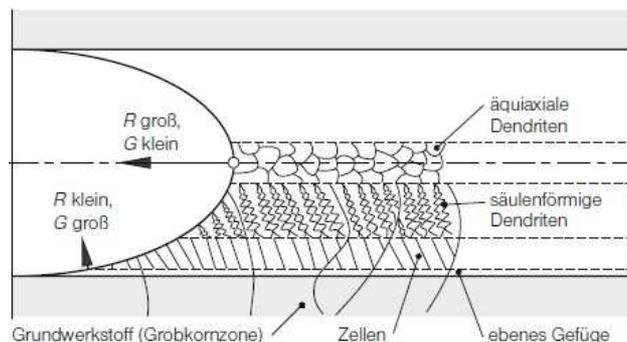


Abbildung 21: Entstehung des Schweißgefüges in Abhängigkeit der Kristallisationsgeschwindigkeit R und des Temperaturgradienten G [39]

X4CrNiMo13-4 besitzt wegen des geringen Kohlenstoffgehaltes eine sehr gute Schweißbarkeit und wird im vergüteten Zustand geschweißt. Bei Lichtbogenschweißverfahren ist eine Vorwärmtemperatur von 150°C notwendig. Nach dem Schweißen des Werkstoffes muss dieser angelassen werden, um die

notwendige Duktilität der Schweißnaht wieder herzustellen. Der Zunder und die Anlassfarben, die während des Schweißens entstehen können, müssen mechanisch entfernt werden, da sonst die Korrosionsbeständigkeit nicht sichergestellt ist. Dieser Werkstoff wird auch als Weichmartensit bezeichnet, weil nur eine Aufhärtung zwischen 350 und 400 HV erreicht wird [32], [40].

Mit Hilfe des Schöfflerdiagramms ist es möglich die Gefügebestandteile nach dem Schweißprozess abzuschätzen (siehe Abbildung 22). Auf der Abszisse wird das Chromäquivalent aufgetragen und auf der Ordinate das Nickeläquivalent. Beim Verschweißen dieses Werkstoffes entsteht eine Mischung aus Martensit und Ferrit (siehe rotes Rechteck in Abbildung 22) [32], [38].

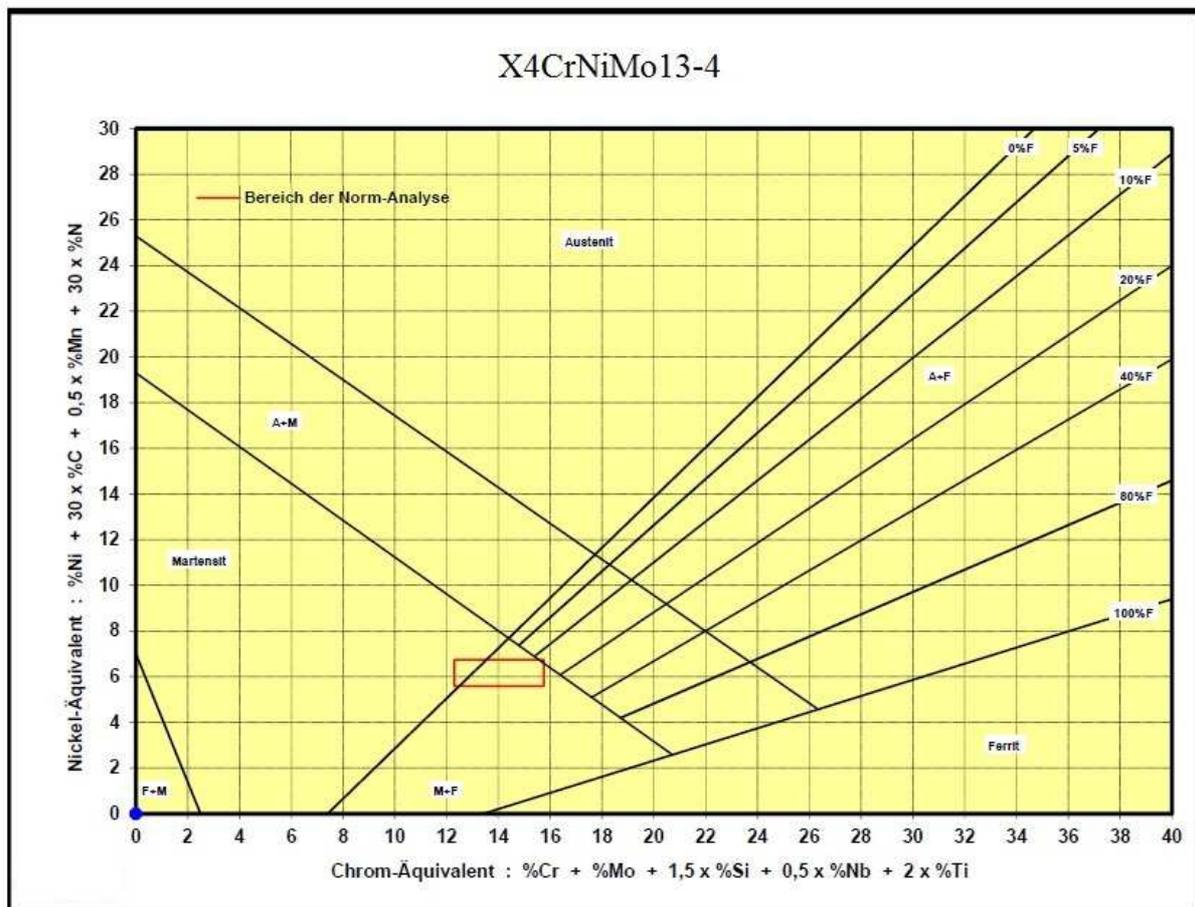


Abbildung 22: Schöfflerdiagramm X4CrNiMo13-4

2.3.2 Wärmebehandlungen

Die Werkstoffeigenschaften können durch eine gezielte Wärmebehandlung maßgeblich verändert werden. Die martensitische Umwandlung ist von der Temperatur bei Erreichen der kritischen Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Für eine Umwandlung ist eine deutliche Unterkühlung unter M_f (Martensitfinish, siehe Abbildung 23) notwendig. Unter M_f ist 100% Martensit erreicht. [41].

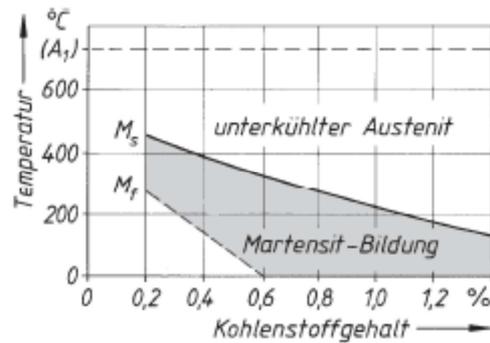


Abbildung 23: Martensitumwandlung [41]

Knapp unterhalb von 500°C beginnt die Rückbildung des Austenits. Mit steigender Temperatur steigt auch der Gehalt des Austenits. Dieser wandelt sich beim Abkühlen in frischen Martensit um. Beim Anlassen im Temperaturbereich zwischen 600°C und 650°C und anschließendem langsamen Abkühlen an Luft oder im Ofen werden die optimalen mechanischen Eigenschaften für die Weiterverarbeitung oder Verwendung erreicht. Dies führt zu einer idealen Kombination aus Kerbschlagarbeit und Streckgrenze [39].

Bei einer Temperatur von 825°C beginnt der Werkstoff zu verspröden. Durch Halten im Temperaturbereich zwischen 950°C und 1050°C und anschließendem Abkühlen an Luft, Öl oder Polymer kann 1.4313 gehärtet werden [31], [38], [40].

Tabelle 2 zeigt die mechanischen Kennwerte bei unterschiedlichen Anlasstemperaturen und Abbildung 24 die Dehngrenze bei unterschiedlichen Temperaturen und Wärmebehandlungen. Die Bezeichnung QT in Tabelle 2 steht für minimale Festigkeit.

Tabelle 2: Mechanische Kennwerte bei verschiedenen Anlasstemperaturen [38]

Zustand	Anlasstemperatur °C	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ²	A_5 %	Av J
QT 650	650 °C – 700 °C und 600 °C – 620 °C Luft oder Wasser	650 – 830 (760)	≥ 520 (690)	≥ 15 (20)	≥ 70
QT780	550 °C – 600 °C Luft oder Wasser	780 – 980 (875)	≥ 620 (800)	≥ 15 (19)	≥ 70
QT900	520 °C – 580 °C Luft oder Wasser	900 – 1000 (990)	≥ 800 (940)	≥ 12 (17)	≥ 50

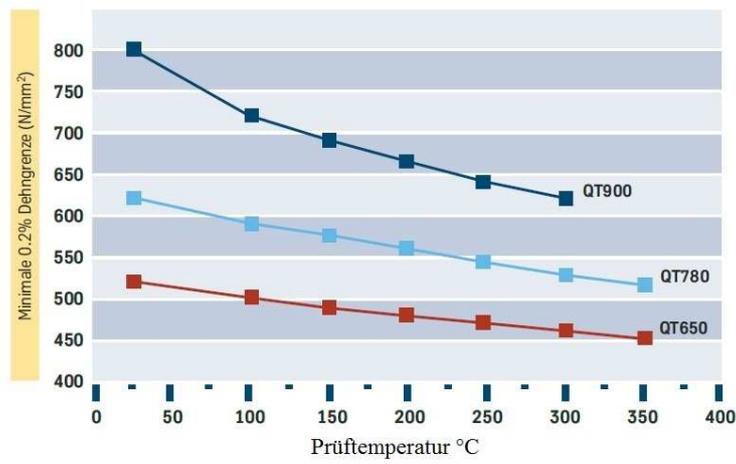


Abbildung 24: Dehngrenze bei erhöhter Temperatur und verschiedenen Wärmebehandlungen [40]

Die Magnetisierung und auch die Entmagnetisierung wird von der martensitischen Werkstoffstruktur behindert. Die magnetischen Eigenschaften können durch Abschrecken in Öl oder mit Luft aus dem Temperaturbereich zwischen 950°C und 1050°C mit späterem Anlassen verändert werden [42].

2.4 δ -Ferrit

Beim Abkühlen aus dem festflüssigen Zustand absolviert reines Eisen mehrere Umwandlungen. Diese Umwandlungen sind reversible und werden als Allotropie bezeichnet. Abbildung 25 zeigt zum einen graphisch die Umwandlungen und deren Haltepunkte, zum anderen einen Teil des Eisen-Kohlenstoff-Schaubildes. Beim Unterschreiten der Schmelztemperatur (ϑ_s) erhält man kubischraumzentrierten δ -Ferrit. Beim Passieren des nächsten Haltepunktes bei einer Temperatur von 1392 °C (A_{r4}) wandelt sich der δ -Ferrit in kubischflächenzentrierten Austenit um. Anschließend wandelt sich der Austenit beim Unterschreiten von A_{r3} in kubischraumzentrierten α -Ferrit. Dieser bleibt bis zum absoluten Nullpunkt bestehen. Beim Passieren des Currie-Punktes, der bei einer Temperatur von 769 °C liegt, findet keine Gitterumwandlung mehr statt. Das Eisen erhält seine ferromagnetischen Eigenschaften [20].

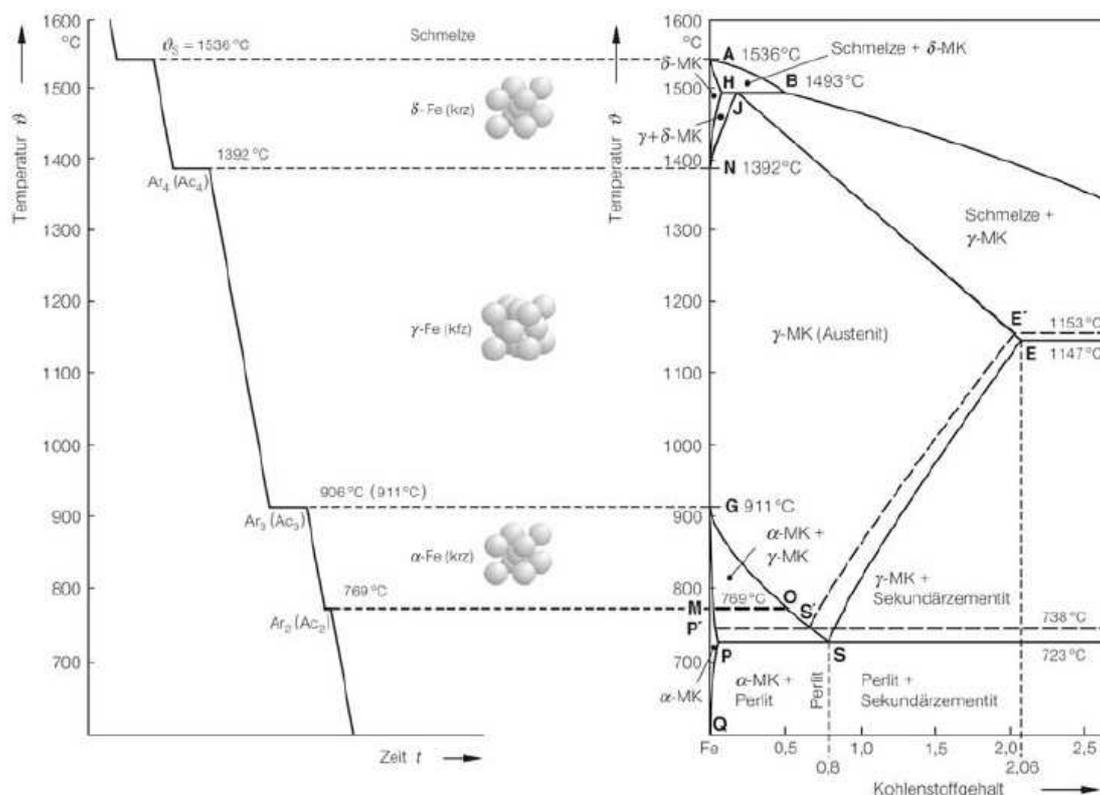


Abbildung 25: Abkühlkurve von reinem Eisen (links) und Ausschnitt des Eisen-Kohlenstoffschaubildes [20]

Aufgrund der exothermen Umwandlungsvorgänge bleibt die Temperatur bis zur vollständigen Umwandlung konstant. In diesen Haltepunkten tritt ein Gleichgewichtszustand auf. Eine Abweichung vom Gleichgewichtszustand kann durch Erhöhen der Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit sowie durch Erhöhen des Gehalts an Legierungselementen erreicht werden. Wie in Kapitel 2.3 erklärt führt eine erhöhte Abkühlgeschwindigkeit und deren Mechanismen zu Martensitbildung [20].

Bei Legierungselementen wird zwischen Austenit- und Ferritbildnern unterschieden. Austenitbildner sind Ni, C, Co, Mn und N. Je nach Gehalt und führen diese zu einer Stabilisation oder zu einer Erweiterung des Austenitgebietes, wobei das Ferritgebiet zurückgedrängt wird. Zu den Ferritbildnern gehören Cr, Al, Ti, Ta, Si, Mo, V und W. So kann das Austenitgebiet vom Ferritgebiet zurückgedrängt oder sogar umschlossen werden (siehe Abbildung 26). Die α - und δ -Ferritgebiete werden dabei gleichermaßen vergrößert. Dadurch kann δ -Ferrit in Abhängigkeit der Legierungskonstellation aus einer primär ferritischen Erstarrung vorliegen [20].

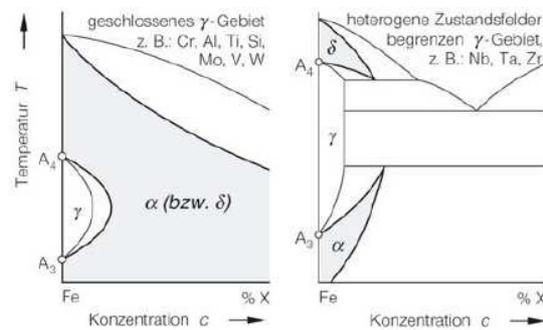


Abbildung 26: Einfluss der Legierungselemente auf die Umwandlung [20]

δ -Ferrit kann durch schnelles Abkühlen aus Bereichen nahe der Schmelztemperatur in Kombination mit gewissen Legierungskonstellationen bei Raumtemperatur vorliegen [20].

δ -Ferrit beeinflusst die Zähigkeit, Kriechfestigkeit und die Warmformfähigkeit negativ und sollte somit vermieden werden [20].

3 Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Schweißversuche beschrieben. Alle Proben wurden nach demselben Schema verschweißt.

3.1 Verwendeter Werkstoff

Für das Experiment wurde der Werkstoff 1.4312 verwendet. Die Proben bestehen aus zwei unterschiedlichen Chargen. Beide Chargen wurden im wärmebehandelten Zustand QT780 (siehe Tabelle 2 in Kapitel 24) angeliefert. Bei der Anlieferung des Werkstoffes konnten die einzelnen Probenstücke den jeweiligen Chargen nicht zugeordnet werden. Alle in weiterer Folge aufgelisteten Werte sind den mitgelieferten Prüfberichten entnommen (siehe Anhang) Tabelle 3 zeigt die Werkstoffzusammensetzung der Chargen.

Tabelle 3: Werkstoffzusammensetzung der beiden Chargen

	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Co
Charge 1	0,028	0,42	0,73	0,021	0,003	0,021	12,85	0,46	4,44	0,04
Charge2	0,029	0,38	0,79	0,020	0,0010	0,021	12,81	0,42	4,36	0,020

Tabelle 4 zeigt die mechanischen Kennwerte der verwendeten Chargen. Die Werte der Kerbschlagzähigkeit weisen erhebliche Unterschiede auf.

Tabelle 4: Mechanische Kennwerte der Chargen

	Charge 1	Charge 2
Härte in HV10	265	285
Kerbschlagzähigkeit bei -20°C in J	118	146
	120	144
	156	150
Kerbschlagzähigkeit bei 20°C in J	104	136
	122	158
	172	144
Zugfestigkeit in MPa	861	885
Streckgrenze in Mpa	781	791

Der Werkstoff wurde ohne weitere Wärmebehandlungen für die Schweißversuche verwendet.

3.2 Maschinenbeschreibung

Die verwendete Elektronenschweißanlage ist ein Fabrikat der Firma „probeam“ mit der Bezeichnung „Universalkammer Elektronenstrahlanlage EBG 45-150 K14“ (siehe Abbildung 27). Tabelle 5 zeigt die Maschinenkennwerte der Elektronenschweißanlage. Ein genauer Aufbau einer Elektronenstrahlanlage wird in Kapitel 2.1.2 näher erläutert.

Tabelle 5: Maschinenkennwerte der Elektronenstrahlanlage

Leistung in kW	45
Hochspannung in kV	150
Strahlenstrom in mA	0,1 - 300
Ablenkgeschwindigkeit in °/μs	1
Vorschub des Maschinentisches in mm/s	100
Rotationsgeschwindigkeit in U/min	0,1 - 30
Vakuumkammer in m ³	1,4
Evakuierungszeit in min	5

3.4 Probengeometrie

Eine Probe besteht aus zwei Blechblöcken. Bei den Proben mit einer Dicke von 100 mm wurde zusätzlich ein Unterlegblech an der Unterseite angebracht. Dieses Unterlegblech soll als Schweißbadstütze dienen. Zusätzlich sollen die Bleche ein Durchschweißen der Proben und somit Beschädigung am Maschinentisch und der Aufspannvorrichtung verhindern. Die Stoßflächen sind auf die vorgegebenen Oberflächenrauheitswerte plangefräst. Die schraffierten Flächen in Abbildung 29 stellen flammgeschnittenen Flächen dar. Aufgrund des Flammchnitts können keine genauen Werte für die Länge und die Breite der Proben angegeben werden.

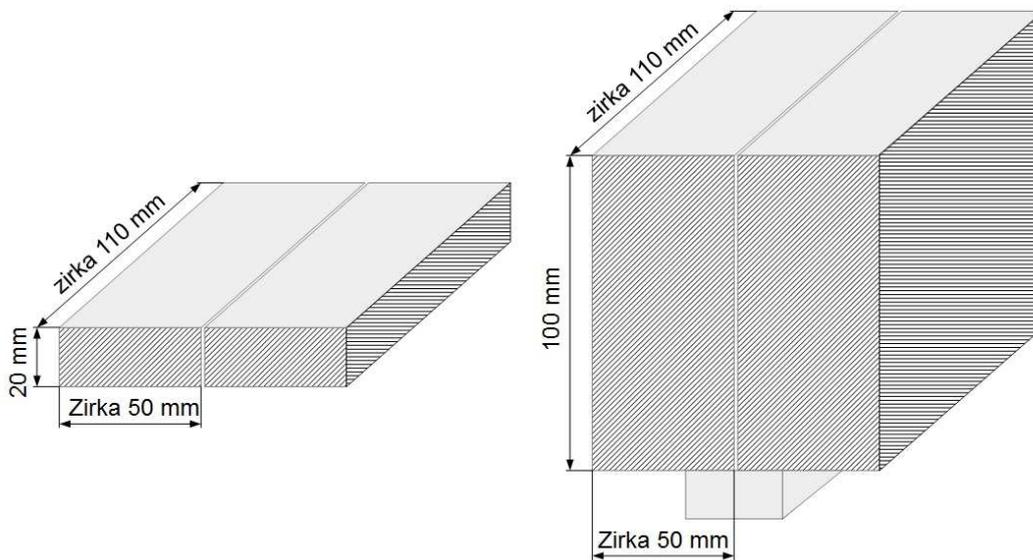


Abbildung 29: Probengeometrie der 20 mm und 100 mm dicken Proben

Es werden folgende vier Oberflächenrauheiten untersucht:

- $R_a = 0,8$
- $R_a = 1,6$
- $R_a = 6,3$
- $R_a = 12,5$

3.5 Schweißprobenvorbereitung

Die Zunderschicht im Bereich der Stoßkanten wurde mit einem Winkelschleifer und einer Fächerscheibe entfernt (siehe Abbildung 30). Die zu verschweißenden Flächen sind mit Isopropanol gereinigt worden. Anschließend erfolgte die Entmagnetisierung der Stoßflächen. Um die Positionierung der Schweißproben am Maschinentisch zu erleichtern, wurden die einzelnen Proben vorpositioniert und mittels MAG-Schweißverfahren zusammengeheftet.



Abbildung 30: Vorbereitete Probe 20-08-1

Anschließend erfolgte eine weitere Entmagnetisierung. Die Proben wurden zweimal in Schweißrichtung entmagnetisiert, um 90° quer zur Schweißrichtung gedreht und diese Fläche wurde wieder entmagnetisiert. Dieser Vorgang wurde bis zum Erreichen der Ausgangsfläche wiederholt. Die Proben erreichten eine magnetische Flussdichte zwischen 0,27 und 0,3 T.

3.6 Probenaufnahme

Die Proben wurden in eine Aufspannvorrichtung eingelegt (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32). Die Proben mit einer Dicke von 20 mm wurden auf die gleiche Höhe wie der Kupferblock aufgespannt. Dies ermöglichte das Konfigurieren des Elektronenstrahls am Kupferblock ohne das Korrekturen am Elektronenstrahl für den Schweißprozess vorgenommen werden mussten. Aufgrund der in Kapitel 3.3

erwähnten geometrischen Unregelmäßigkeiten, wurde ein korrektes Ausrichten der Schweißproben erschwert.

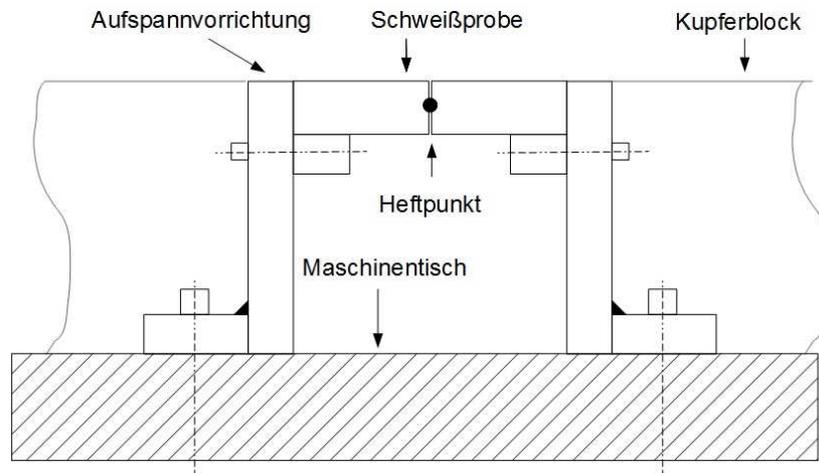


Abbildung 31: Aufspannung einer Probe einer Dicke von 20 mm

Die Proben mit einer Dicke von 100 mm wurden mit einer Überhöhung zum Kupferblock zwischen 57 mm und 61 mm eingerichtet (siehe Abbildung 32). Die unterschiedlichen Aufspannhöhen lassen sich auf die geometrischen Unregelmäßigkeiten, welche in Kapitel 3.3 erwähnt sind, zurückführen.

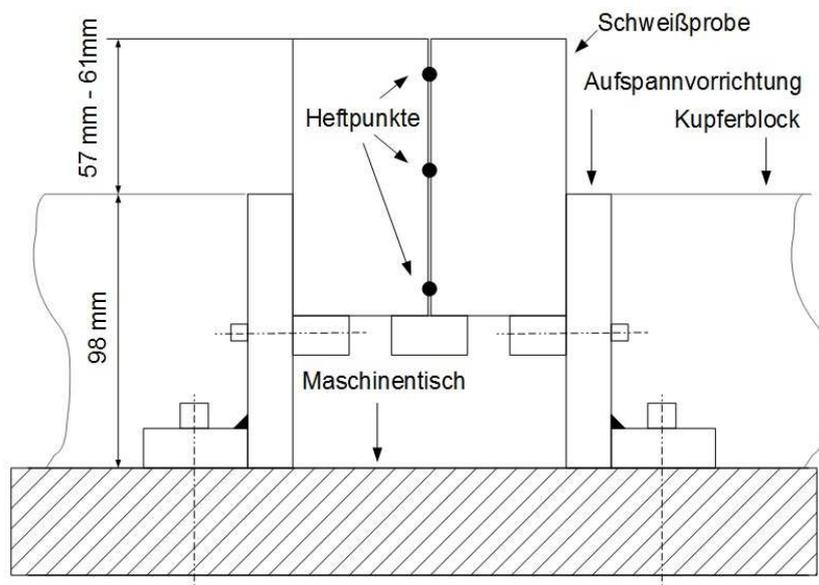


Abbildung 32: Aufspannung einer Probe mit einer Dicke von 100 mm

Es wurden immer zwei Proben hintereinander in die Vorrichtung eingelegt und geschweißt. Zum Schutz des Werkzeughisches wurden zusätzliche Schutzbleche unter die Proben gelegt.

3.7 Schweißparameter

Die passenden Schweißparameter wurden in Vorversuchen festgelegt. In Tabelle 6 sind die Schweißparameter der Proben aufgelistet.

Tabelle 6: Schweißparameter für Proben mit einer Dicke von 20 mm und 100 mm

		20 mm Proben	100 mm Proben
Strahlenstrom	I mA	60	250
Vorschub	V mm/s	12	2,1
Fokus	f_p mA	0	-50
Figur Kreis	h_x mm	0,8	
	h_y mm	0,6	
	F Hz	1000	
Slope In	s_i mm	7	
Slope Out	s_o mm	7	
Beschleunigungsspannung	H_v kV	150	

Für die Proben mit einer Dicke von 20 mm wurde eine Linsenstrom von 2995 A verwendet. Das Zuschneiden der Proben mit einer Dicke von 100 mm verursacht geometrische Unregelmäßigkeiten. Um den definierten Unterfokus von -50 mm einhalten zu können, variieren die Werte des Linsenstromes. Die Linsenströme der 100 mm dicken Proben ist der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Linsenstrom der Proben mit einer Dicke von 100 mm

Probennummer	Linsenstrom in A
100-08-1	2874
100-08-2	2875
100-08-3	2875
100-16-1	2875
100-16-2	2873
100-16-3	2875
100-63-1	2873
100-63-2	2874
100-63-3	2872
100-125-1	2875
100-125-2	2877
100-125-3	2874

3.8 Ablauf beim Schweißen

Jeweils zwei zusammengeheftete Proben wurden direkt vor dem Einspannen in die Vorrichtung, wie in Kapitel 3.5 beschrieben, entmagnetisiert. Anschließend wurde die verschlossene Vakuumkammer evakuiert und ein Vakuum von 6×10^{-5} mbar wurde hergestellt. Aufgrund von verdampfendem Metall, während des Schweißprozesses der ersten Probe fällt das Vakuum ab. Vor dem Schweißen der zweiten Probe muss das benötigte Vakuum wieder hergestellt werden. Um mögliche Anlauffarben an den Proben zu verhindern wurde die Vakuumkammer erst nach 15 min nach Beendigung des Schweißprozesses geöffnet.

Um mögliche, durch die Kalibrierung verursachten, Abweichungsfehler bei einem erneuten Justieren des Elektronenstrahls zu verhindern, wurden alle Proben ohne ein Ausschalten der Elektronenstrahlschweißanlage verschweißt. Somit ist sichergestellt, dass alle Proben mit den angegebenen Parametern geschweißt wurden.

4 Auswertung

Anschließend werden die einzelnen Schritte der Probenvorbereitung sowie die metallurgische Auswertung erläutert.

4.1 Probenvorbereitung

Bei der Probenvorbereitung wurde genau darauf geachtet, alle Proben an den gleichen Stellen zu entnehmen. Jede Probe durchlief die im folgenden Abschnitt dokumentierten Arbeitsschritte auf gleiche Art und Weise

4.1.1 Probenentnahme

Die Probenblöcke wurden mit einer Bandsäge und einer Kaltschneidanlage zu den einzelnen Proben zerschnitten.

Für die makroskopische Untersuchung wurden die Proben mit einer Dicke von 20 mm längs der Schweißnaht zerschnitten. Die Proben mit einer Dicke von 100 mm wurden einmal längs und einmal quer zur Schweißrichtung zerschnitten.

Von den 20 mm dicken Probenblöcken wurden jeweils zwei Proben für die lichtmikroskopischen Untersuchung und jeweils zwei Zugproben entnommen (siehe Abbildung 33).

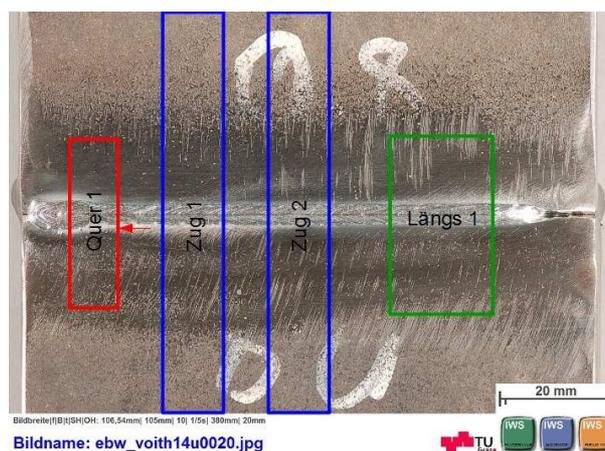


Abbildung 33: Probenentnahme bei 20 mm dicken Proben

Von den 100 mm dicken Probenblöcken wurden jeweils fünf Proben für lichtmikroskopischen Untersuchung und jeweils drei Zugproben entnommen (siehe Abbildung 34).

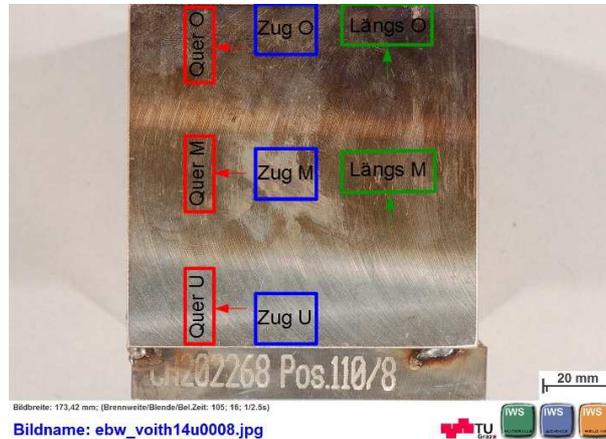


Abbildung 34: Probenentnahme bei 100 mm dicken Proben (Seitenansicht)

Aus den rot markierten Bereichen in Abbildung 33 und Abbildung 34 wurden Schlitze quer zur Schweißnaht hergestellt und aus den grün markierten Bereichen Schlitze längs der Schweißrichtung. Die Pfeile in den Abbildungen zeigen die Ansicht für die folglich durchgeführten lichtmikroskopischen und makroskopischen Untersuchungen. Zusätzlich sind Proben längs zur Schweißnaht zerschnitten worden. Diese Proben dienten nur makroskopische Untersuchungen.

4.1.2 Schleifen, Polieren und Ätzen

Die Proben für die makroskopische Untersuchung wurden nach dem Zerschneiden plan gefräst und anschließend mit Adler geätzt (siehe Tabelle 8).

Die Proben für die mikroskopische Untersuchung wurden in ein Warmeinbettmittel eingebettet und anschließend mit Wabenscheiben (Körnung P80 bis P220) plan geschliffen. Im nächsten Schritt erfolgte ein Vorpolieren mit einer Wabpiano-Scheibe und einer 6 µm Poliersuspension. Nachfolgend wurden die Proben mit Fliebscheiben und 3 µm und 1 µm Suspensionen poliert.

Für die mikroskopische Untersuchung wurde zuerst eine V2A-Beize verwendet. Dieses Ätzmittel stellte die Gefügestruktur nicht zufriedenstellend dar weshalb es

durch das Ätzmittel Lichtenegger und Blöch nach Schalk (LiBlo) ersetzt wurde (siehe Tabelle 8). Abbildung 35 zeigt die Probe 20-16-1 geätzt mit V2A Beize und Abbildung 36 dieselbe Probe geätzt mit LiBlo.

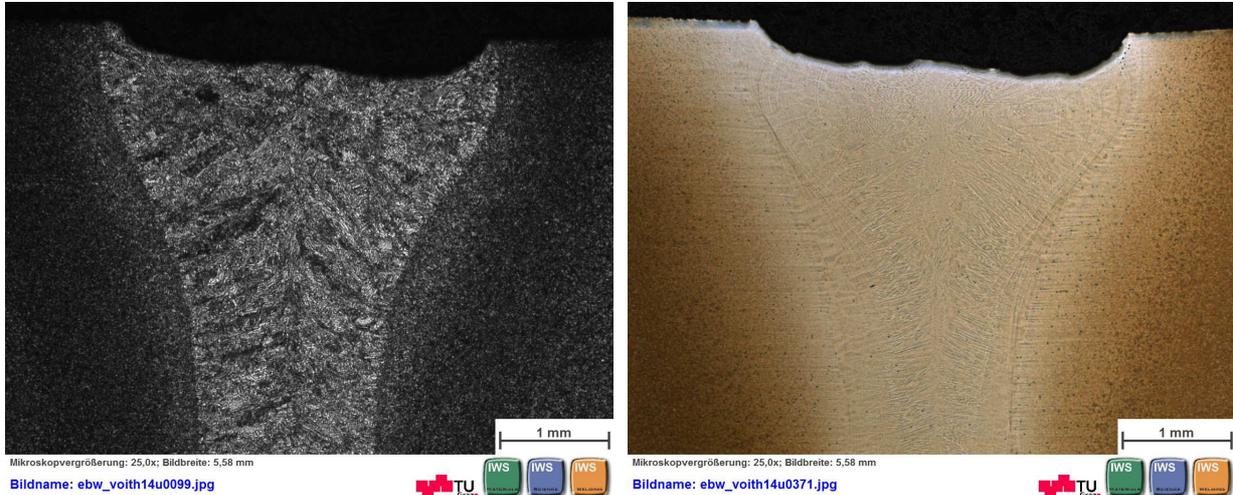


Abbildung 35: Probe 20-16-1 geätzt mit V2A

Abbildung 36: Probe 20-16-1 geätzt mit LiBl

Da die LiBlo Ätzung bei der lichtmikroskopischen Untersuchung Kratzer im 1 μm Bereich sichtbar machte, mussten die Proben in einer neutralen Aluminium Suspension zirka zwölf Stunden vibrationspoliert werden.

Tabelle 8: Ätzmittel [43]

	Zusammensetzung	Art der Ätzung	Ätzdauer
Adler	Wasser cm^3 100	Wischätzung mit Watte	bis die Struktur der Schweißnaht sichtbar ist
	Salzsäure cm^3 200		
	Eisen(III)-chlorid g 60		
	Kupferammoniumchlorid g 12		
Lichtenegger und Blöch nach Schalk	Wasser cm^3 0,1	Tauchätzung	15 - 20 s
	Ammoniumhydrogendifluorid g 75		
	Kaliumdisulfit g 90		
V2A-Beize	Salzsäure cm^3 100	Tauchätzung	zirka 60 s
	Wasser cm^3 100		
	Salpetersäure cm^3 10		

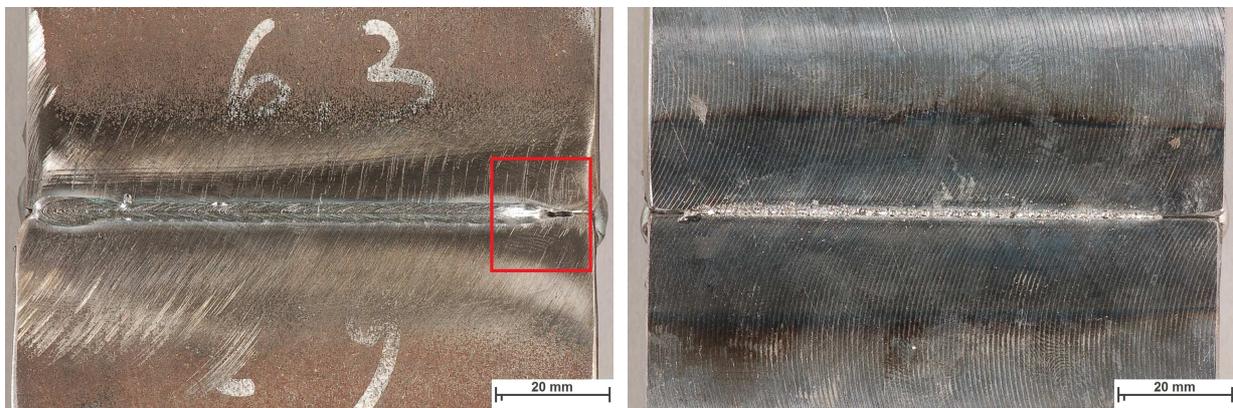
Unmittelbar nach dem Vibrationspolieren erfolgte die Reinigung der Proben mittels Wasser, handelsüblichen Geschirrspülmittel und Ethanol. Anschließend wurden die Proben mit dem Ätzmittel LiBlo geätzt.

4.2 Metallographische Auswertung

Für die mikroskopische Auswertung wurde das Lichtmikroskop Z1M der Firma Zeiss verwendet. Zusätzlich wurden ein Mikro- und Makrohärtemessgerät, ein Rasterelektronenmikroskop sowie ein energiedispersives Röntgenspektrometer verwendet. Die makroskopische Auswertung erfolgte mittels Sichtprüfung.

4.2.1 Makroskopie

Zuerst wurde eine makroskopische Sichtprüfung durchgeführt. Alle Proben mit einer Dicke von 20 mm sind durchgeschweißt. Die Einbrandkerben zeigen in ihrer Struktur der Oberflächen keine Unterschiede (siehe Abbildung 37). Der Einfall der Schweißnaht im Slope Out ist bei allen Proben vorhanden (siehe rote Markierung in Abbildung 37). Die Wurzeln weisen keine Unterschiede auf (siehe Abbildung 38).



Bildbreite|B|S|H|O|H: 106,54mm| 105mm| 10| 1/8s| 380mm| 20mm

Bildname: ebw_voith14u0035.jpg

Abbildung 37: Makroaufnahme der Einbrandkerbe der Probe 20-63-2

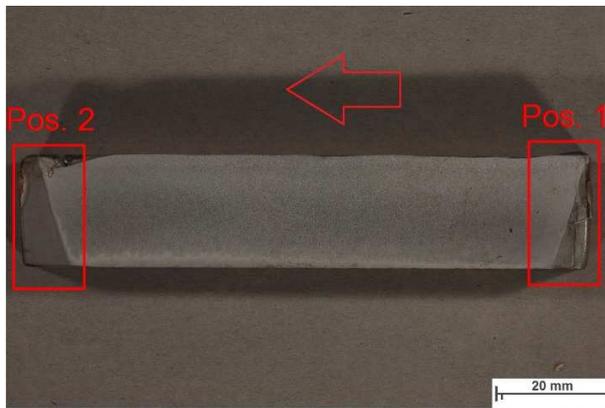
Bildbreite|B|S|H|O|H: 106,54mm| 105mm| 10| 1/8s| 380mm| 20mm

Bildname: ebw_voith14u0036.jpg

Abbildung 38: Makroaufnahme der Wurzel der Probe 20-63-2

Die Probenhälften (siehe Abbildung 39 und Abbildung 40) sind mit dem Ätzverfahren nach Adler behandelt worden. Die roten Pfeile in Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die Schweißrichtung. Position 1 in Abbildung 39 zeigt den Slope In und Position 2 den Slope Out Bereich. Im Slope In gräbt sich der Elektronenstrahl in die Probe hinein bis er die vollständige Schweißtiefe erreicht hat. Im Slope Out nimmt

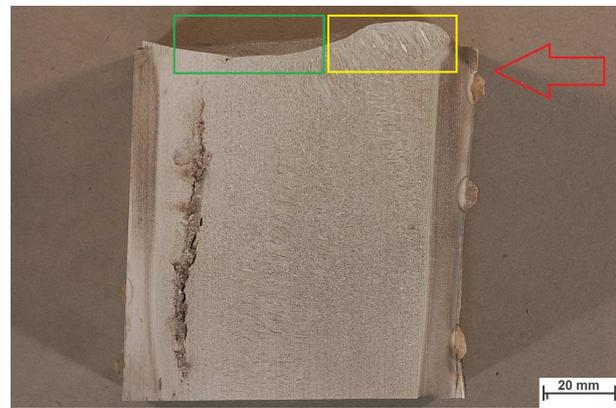
die Schweißtiefe allmählich wieder ab. Dies soll dem Schmelzbad im Endbereich eine fehlerfreie Erstarrung ermöglichen. Bei keinem Längsschnitt sind Schweißfehler sichtbar. Die Proben mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten weisen zueinander keine Ungleichheiten auf.



Bildbreite: 106,54mm | 105mm | 29 | 1/5s | 375mm | 15mm

Bildname: ebw_voith14u0048.jpg

Abbildung 39: Längsschnitt der Probe 20-08-2 geätzt mit Adler



Makrot: Bildbreite: 170,20mm | 105mm | 18 | 1/5s | 685mm | 45mm

Bildname: ebw_voith14u0346.jpg

Abbildung 40: Längsschnitt der Probe 100-16-2 geätzt mit Adler

Bei allen längsgeschnittenen Proben mit einer Dicke von 100 mm sind nur Schweißfehler im Slope out Bereich aufgetreten. Eine mögliche Ursache für diesen Fehler könnte eine zu hohe Vorschubgeschwindigkeit im Slope Out sein. Die Vorschubgeschwindigkeit nimmt Einfluss auf die Baddynamik.

Die gelbe Markierung in Abbildung 40 zeigt eine Erhöhung der Schweißnaht und die grüne Markierung den Einfall. Durch die Relativbewegung des Werkstückes zum Elektronenstrahl wird das geschmolzene Material um den Strahl transportiert und es erstarrt an der Rückseite (Kapitel 2.1.1.3). Es entsteht die erhöhte Schweißraupe im Bereich des Nahtanfangs. Das Material der Schweißraupe fehlt in weiterer Folge und es entsteht der Nahteinfall [1]. Dies ist bei allen Proben vorhanden.

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen Schnitte quer zur Schweißrichtung. Die rötlichen Verfärbungen in den Abbildungen sind Nebenerscheinungen der langen Ätzdauer. Die schwarzen Linien, welche links und rechts der Schweißnaht verlaufen (rote Pfeile in Abbildung 42) zeigen das Ende der Wärmeeinflusszone. Die Erstarrungszone der Schweißnaht dicht unter der Oberfläche verläuft sehr flach (siehe Abbildung 41).

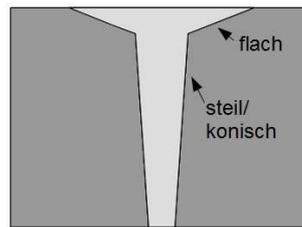
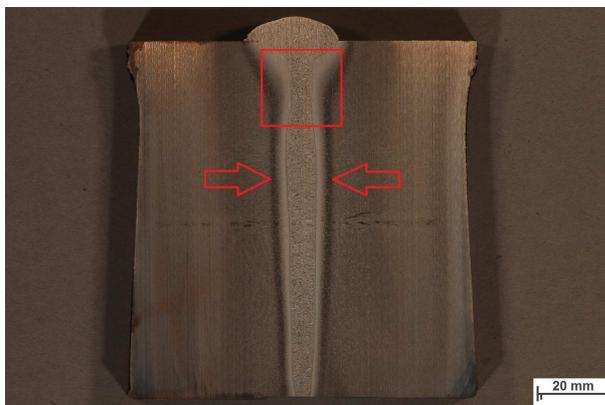


Abbildung 41: Darstellung der Form der Schweißnaht

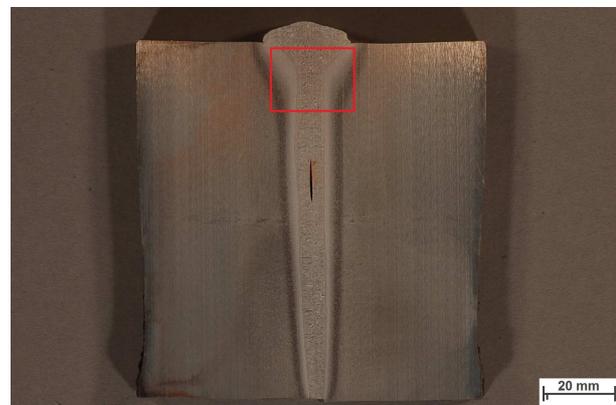
Anschließend wird sie erheblich steiler und verläuft nahezu konisch bis zum Ende der Schweißnaht. Bei den Proben 100-08-1, 100-16-1 und 100-125-1 sind keine Schweißfehler aufgetreten.



Makrot: Bildbreite[1(B)I(SH)OH: 169,05mm] 105mm] 22] 1/8s] 645mm] 10mm

Bildname: ebw_voith14u0323.jpg

Abbildung 42: Schnitt quer zur Schweißrichtung der Probe 100-125-1



Makrot: Bildbreite[1(B)I(SH)OH: 170,20mm] 105mm] 22] 1/8s] 650mm] 10mm

Bildname: ebw_voith14u0305.jpg

Abbildung 43: Schnitt quer zur Schweißrichtung der Probe 100-63-1

Bei der Probe 100-63-1 (siehe Abbildung 43) ist ein Schweißfehler zirka in der Mitte der Naht ersichtlich. Für eine genauere Untersuchung wurde das Stück mit dem Riss aus der Probe mittels einer Bandsäge herausgeschnitten und mit flüssigen Stickstoff abgekühlt. Durch die niedrige Temperatur versprödet der Werkstoff. Anschließend kann das Stück mit einem Hammerschlag aufgebrochen werden und die Rissoberfläche bleibt erhalten. Mittels einer Analyse mit einem Rasterelektronenmikroskop wurde dieser als Erstarrungsriss identifiziert (siehe Abbildung 44 und Abbildung 45) Charakteristisch für einen Erstarrungsriss ist eine wellenförmig Oberfläche [11], [39]. Die Ursache für diesen Riss ist das Ablagern von niederschmelzenden Substanzen an den Korngrenzen. An den primär erstarrten Kristalliten liegt ein dünner Film von Restschmelz vor. Durch Seigerungsvorgänge besitzt die Restschmelze eine niedrigere Schmelztemperatur als die Schmelze.

Diese kann die durch die Schrumpfung hervorgerufenen Spannungen nicht mehr aufnehmen und es kommt zum Bruch an den Korngrenzen [11], [39].

Im Bereich der roten Markierungen in Abbildung 42 und Abbildung 43 ist die Schweißnaht bei Proben ohne Schweißfehler deutlich schmaler als bei der Probe 100-63-1, welche einen Schweißfehler aufweist. Bei allen durchgeführten Vorversuchen ohne Schweißfehler ist diese Reduzierung aufgetreten. Die Ursache für die Querschnittsreduzierung in diesem Bereich der Schweißnaht ist unklar.

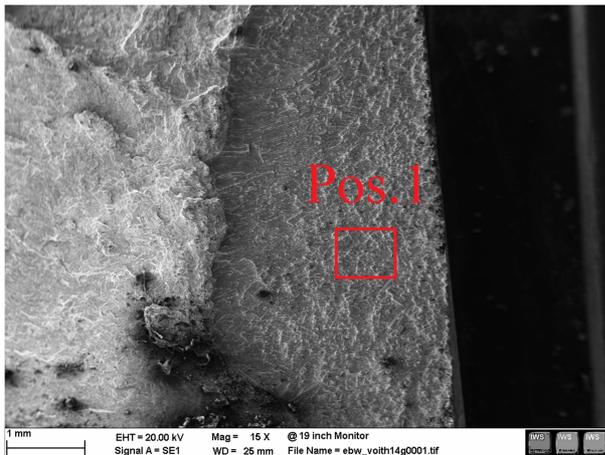


Abbildung 44: Oberfläche des Risses der Probe 100-63-1

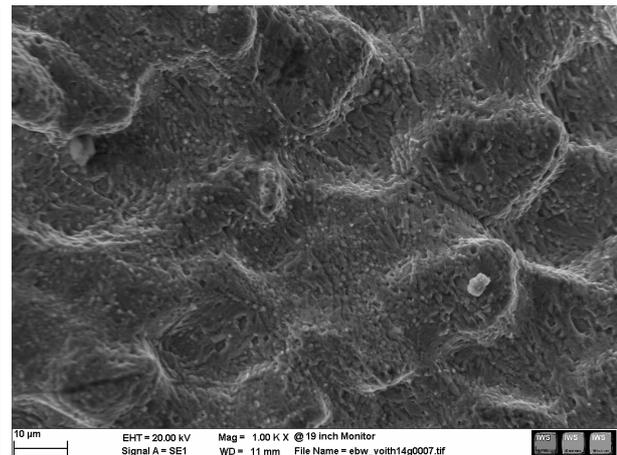


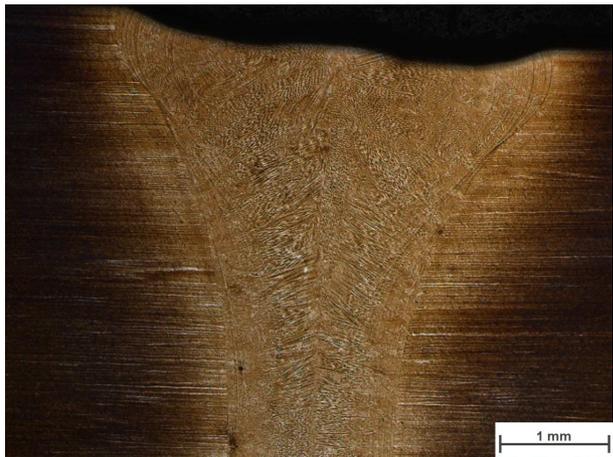
Abbildung 45: Position 1 in Abbildung 44

4.2.2 Mikroskopische Auswertung

Für eine genauere und übersichtlichere Beschreibung der einzelnen Proben werden diese in weiterer Folge nach deren Dicken aufgeteilt.

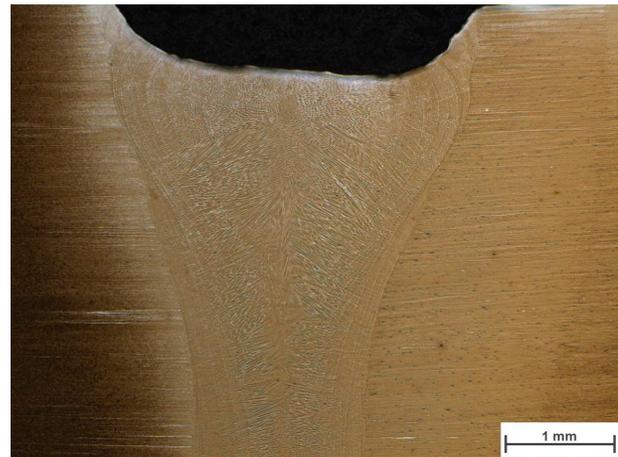
4.2.2.1 Proben mit einer Dicke von 20 mm

Bei den Schweißungen der Proben dieser Dicke sind keine Hochspannungsüberschläge aufgetreten. Die Form und die Tiefe der Einbrandkerben der Proben 20-08-1, 20-16-1 und 20-63-1 weisen keine Unterschiede auf (siehe Abbildung 46). Die Einbrandkerbe der Probe 20-125-1 (größte Rauhtiefe) ist deutlich tiefer als bei den Proben mit geringerer Oberflächenrauheit (siehe Abbildung 47).



Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0402.jpg

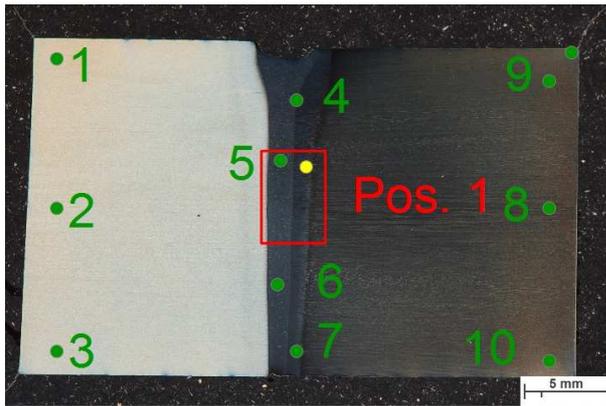

Abbildung 46: Einbrandkerbe der Probe 20-63-1


Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0447.jpg


Abbildung 47: Einbrandkerbe der Probe 20-125-1

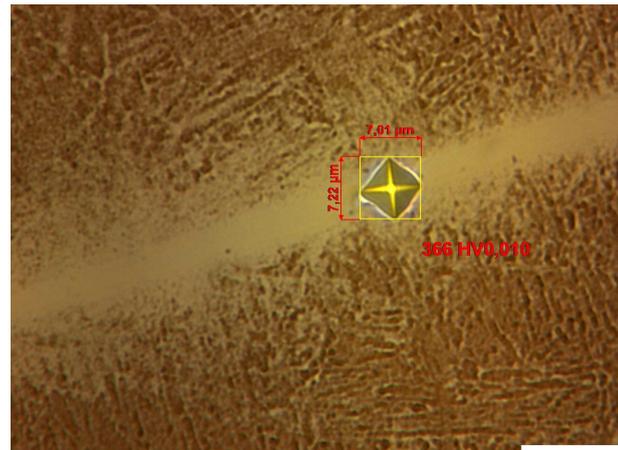
Die von der Schweißnaht durch die Wärmeeinflusszone horizontal laufenden Linien sind bei allen Proben vorhanden. Diese weißen Linien zeigen δ -Ferrit [43], [44]. δ -Ferrit wird von der Ätzung LiBlo nicht angegriffen [43]. Durch die rasche Abkühlung können Bereiche nahe der Schmelztemperatur δ -Ferrit nicht mehr umwandeln und liegen in weiterer Folge als metastabile Phase vor [44]. Zur genaueren Bestimmung wurde eine Mikrohärtemessung durchgeführt. Der gelbe Punkt in Abbildung 48 stellt die beiden Mikrohärtemesspunkte dar. Der Messpunkt in Abbildung 50 ist dicht unterhalb des Punktes aus Abbildung 49. In der weißen Linien beträgt die Härte 366 HV_{0,010} und in der Schweißnaht 446 HV_{0,010}.



Makrot.: Bildbreite/[B]([SH]Ch: 35,60mm) 165mm) 6,31 1/8s) 80mm) 20mm

Bildname: ebw_voith14u0456.jpg

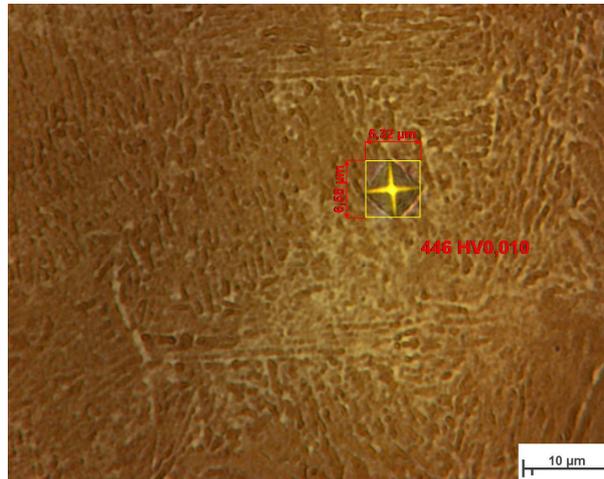
Abbildung 48: Makroaufnahme der Probe Quer 20-125-1



Mikroskopverg.: 1250x (Obj.:100 / VW:1.25); Bildbreite: 69,03 µm

Bild: ebw_voith14u0639.jpg

Abbildung 49: Mikrohärtmessung in einer δ -Ferritlinie



Mikroskopverg.: 1250x (Obj.:100 / VW:1.25); Bildbreite: 69,03 µm

Bild: ebw_voith14u0640.jpg



Abbildung 50: Mikrohärtmessung in der Wärmeeinflusszone

Tabelle 9: Härtewerte der Probe Quer 20-125-1 in Abbildung 48

Messpunkte Links	Härte HV10	Messpunkte Mitte	Härte HV10	Messpunkte Rechts	Härte HV10
1	304	4	421	8	404
2	287	5	395	9	407
3	296	6	392	10	398
		7	407		

Bei den Proben Längs 20-08-3, Quer 20-125-1 und Längs 20-125-1 wurden durch die Ätzung Unterschiede der verwendeten Grundwerkstoffe sichtbar (siehe Abbildung 48). Abbildung 51 zeigt den Grundwerkstoff der linken Seite der Probe und Abbildung 52 den der rechten Seite. Beide besitzen ein martensitisches Gefüge [19]. Alle drei Proben weisen dieselbe Grundwerkstoffkombination auf. Die restlichen Proben besitzen den in Abbildung 52 dargestellten Grundwerkstoff.



Die Härten der Grundwerkstoffe unterscheiden sich um zirka 100 HV10. Die grünen Punkte in Abbildung 48 stellen die Messpunkte dar und in Tabelle 9 sind die dazugehörigen Werte aufgelistet. Die Härte in der Wärmeübergangszone (Härtepunkt 4 und 7) ist höher als die direkt in der Schweißnaht (Härtepunkt 5 und 6). Zusätzlich wurde eine Härtelinie über die ganze Probe erstellt, welche annähernd dieselben Härtewerte aufweist.

Bei der Probe Längs 20-08-3 wurde auch eine Härtemessung durchgeführt (siehe Anhang). Die Härtemessungen der beiden Proben ergaben annähernd das gleiche Härteniveau.

Härtemessungen bei den Proben quer 20-16-1 und quer 20-63-1 zeigen die gleichen Härtewerte wie jene der Probe quer 20-125-1 in der Schweißnaht und im linken Grundwerkstoff (siehe Abbildung 53 und im Anhang Abbildung 91 und Abbildung 92).

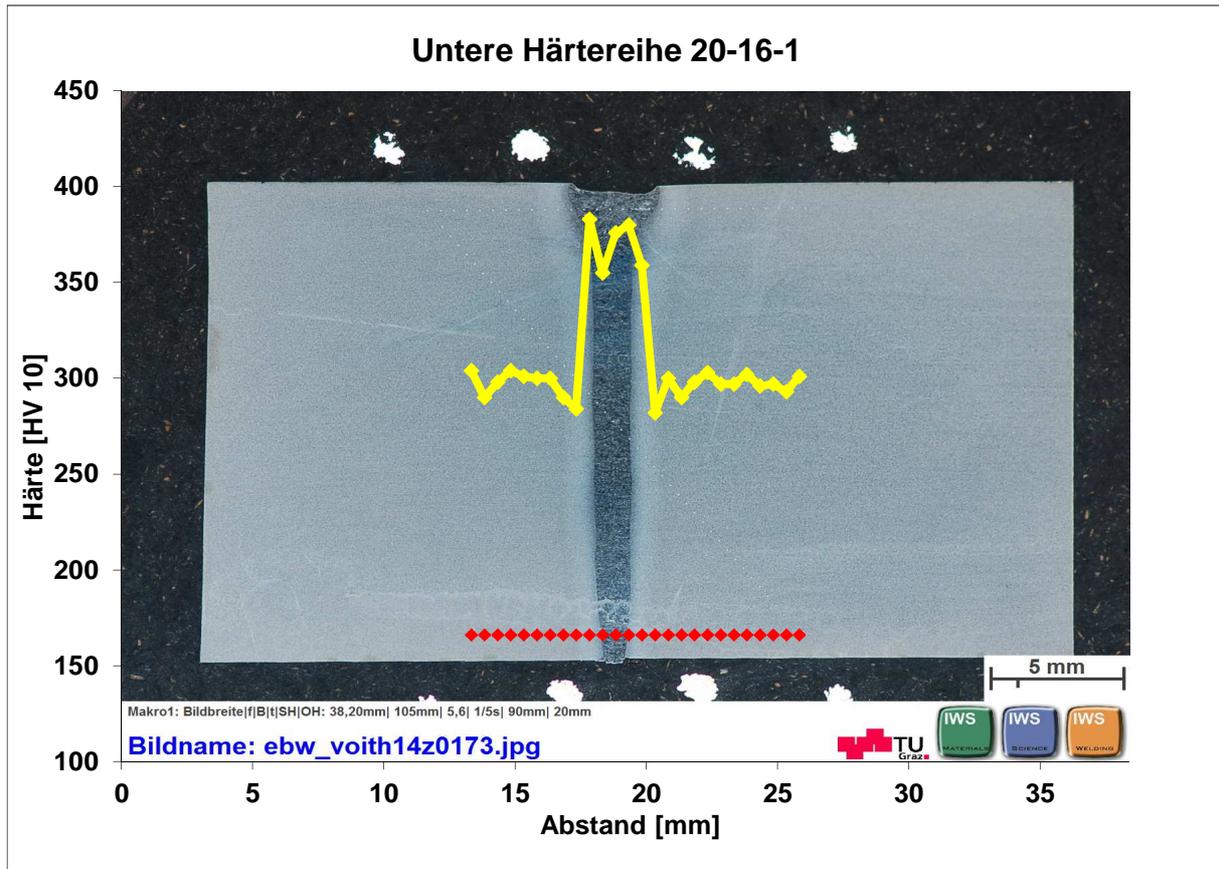


Abbildung 53: Untere Härtereihe der Probe quer 20-16-1

Mit Hilfe eines EDX-Scan konnten keine metallurgischen Unterschiede der beiden Grundwerkstoffe festgestellt werden (siehe Abbildung 54 und Abbildung 55).

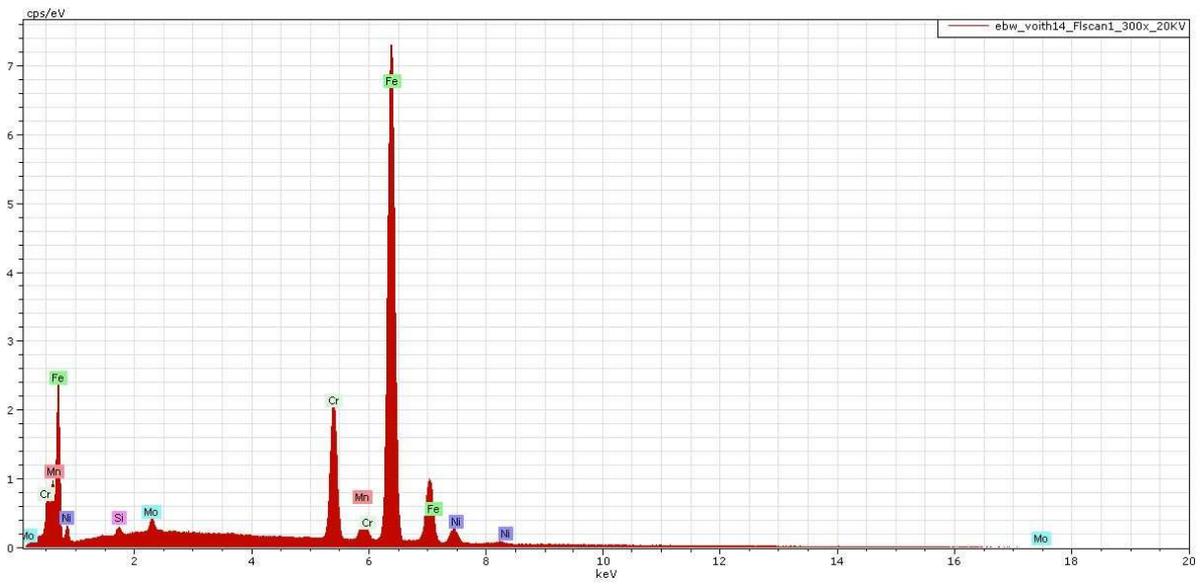


Abbildung 54: EDX-Scan der linken Seite der Probe Längs 1 20-08-1

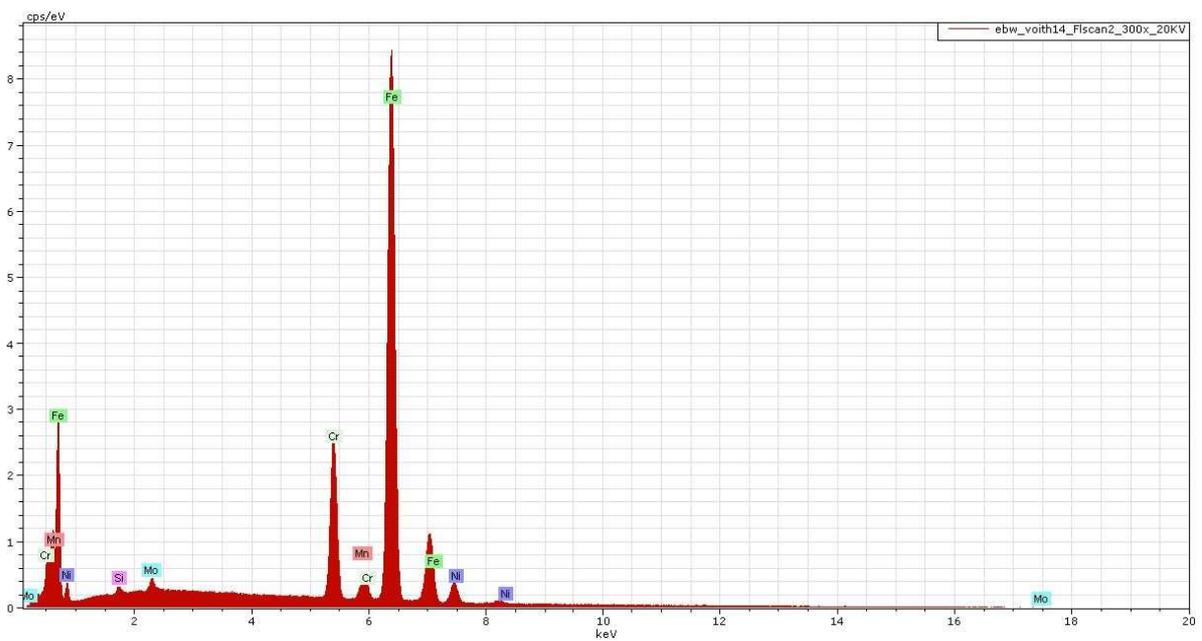


Abbildung 55: EDX-Scan der rechten Seite der Probe Längs 1 20-08-1

Ein zusätzlicher EDX-Scan zeigt, dass die Werkstoffzusammensetzung im Grundwerkstoff und in der Schweißnaht gleich ist (siehe Abbildung 56).

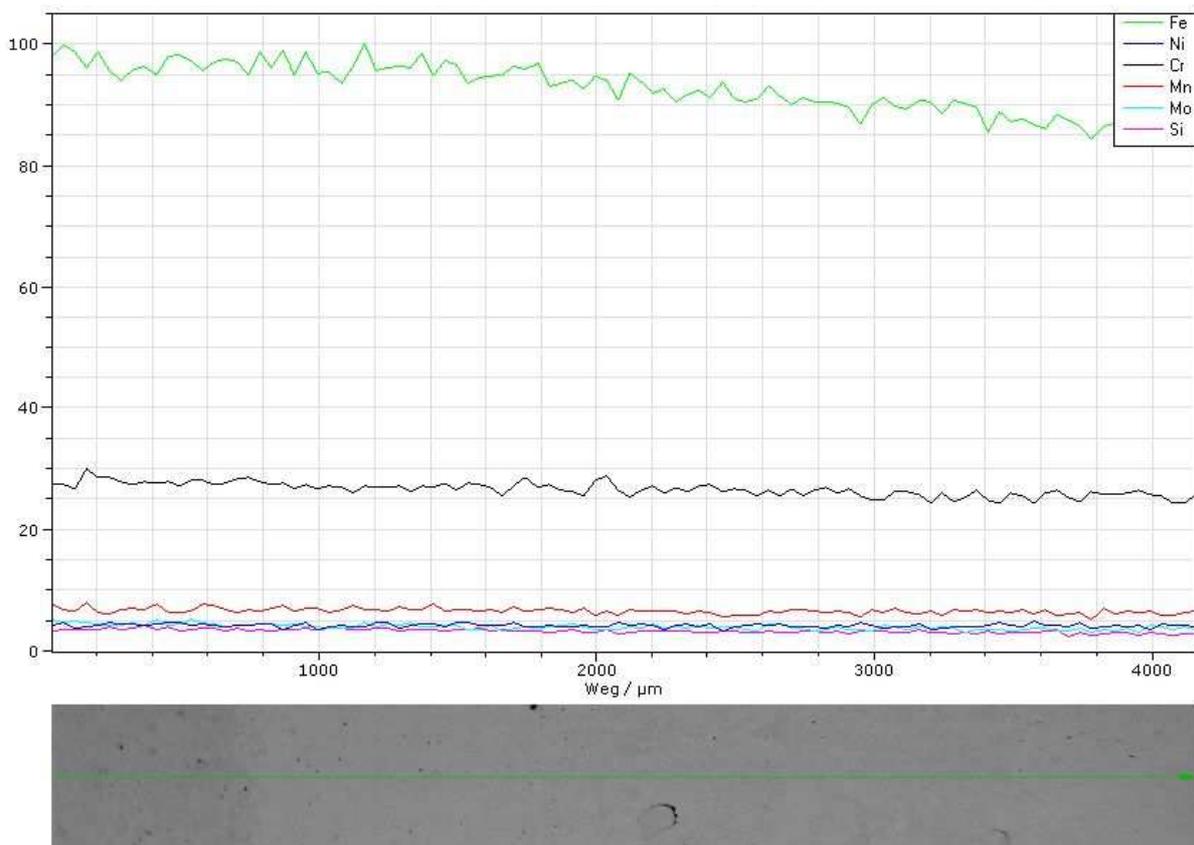
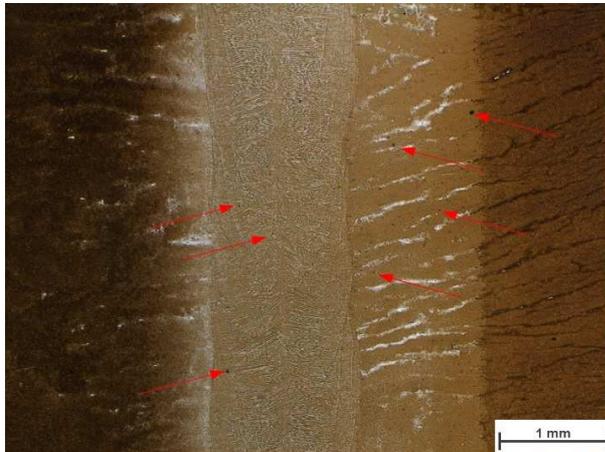


Abbildung 56: EDX-Scan über die Schweißnaht der Probe Längs 1 20-08-3

Daher lässt sich auf eine unterschiedliche Wärmebehandlung der Grundwerkstoffe schließen. Der rechte Grundwerkstoff (siehe Abbildung 52) der Probe quer 20-125-1 entspricht der in Kapitel 3.1 erwähnten Wärmebehandlung. Die Wärmebehandlung des linken Grundwerkstoffes konnte auch nicht mit Hilfe des Lieferanten festgestellt werden.

Abbildung 58 zeigt Position 1 in Abbildung 90. Abbildung 57 zeigt denselben Bereich wie Abbildung 58 nur ist dieser von Probe Längs 20-125-1. Die beiden Grundwerkstoffe sind bei den beiden Proben an unterschiedlichen Seiten verschweißt. Die hellere Färbung einer Wärmeübergangszone entstand nur bei Proben mit unterschiedlichen Grundwerkstoff. Auch in diesem Bereich sind die Linien aus δ -Ferrit vorhanden. Die Schweißnähte der beiden Proben unterscheiden sich in Struktur und Anzahl der Poren nicht. Poren sind sowohl in der Schweißnaht, wie

auch vermehrt in der heller gefärbten Wärmeeinflusszone vorhanden (siehe rote Pfeile in Abbildung 57 und Abbildung 58).

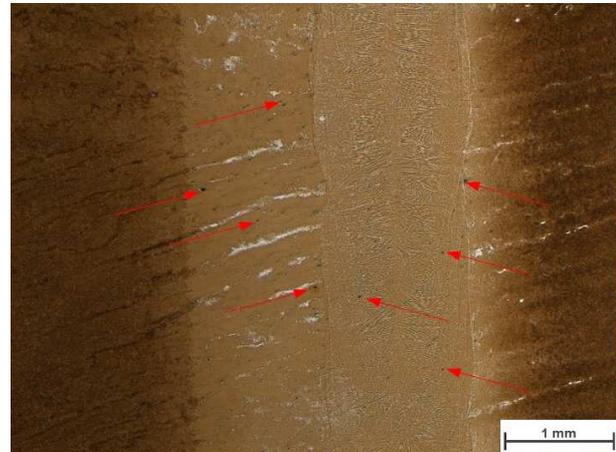


Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0459.jpg



Abbildung 57: Position 1 in Abbildung 90; Probe Längs 20-125-1



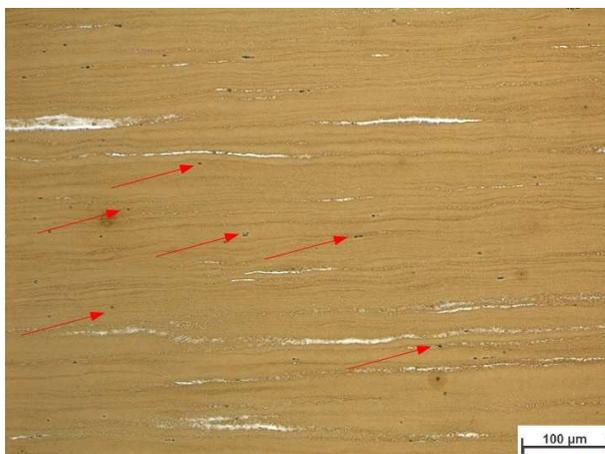
Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0511.jpg



Abbildung 58: Probe Längs 20-08-3

Abbildung 59 zeigt die linke Wärmeeinflusszone der Probe längs 20-125-1. In diesem Bereich sind Poren (siehe rote Pfeile) und linienförmiger δ -Ferrit vorhanden. In der Mitte der Schweißnaht sind auch δ -ferritische Linien vorhanden (siehe Abbildung 60). Die Gefügestruktur sieht bei allen Proben gleich aus.



Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 µm

Bildname: ebw_voith14u0454.jpg



Abbildung 59: Wärmeeinflusszone im linken Bereich der Probe Längs 20-125-1



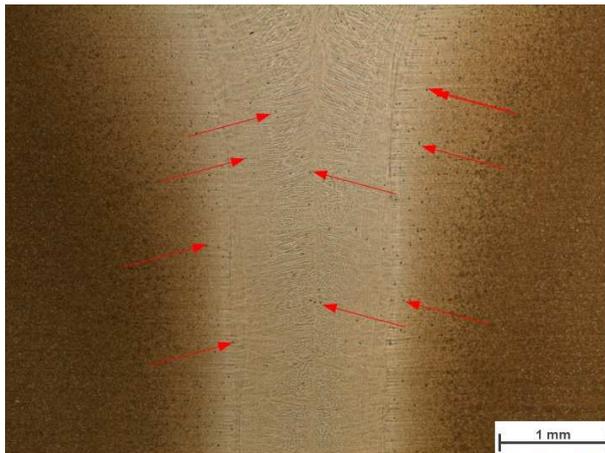
Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: ebw_voith14u0412.jpg



Abbildung 60: Schweißnaht der Probe Quer 20-63-1

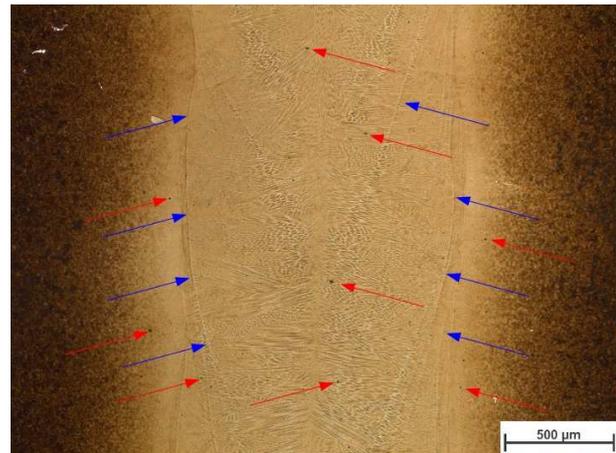
Poren sind in allen Proben vorhanden. Die rot eingezeichneten Pfeile in Abbildung 61 und Abbildung 62 zeigen auf vorhandene Poren. Aufgrund des geringeren Ätzangriffs bei Probe quer 20-16-1 gegenüber der Probe längs 20-63-1 werden auch in der Wärmeübergangszone Poren dargestellt. Die blauen Pfeile in Abbildung 62 zeigen auf Erstarrungslinien der Schweißnaht. Diese Erstarrungslinien sind in allen Proben vorhanden und weisen auch dieselbe Form auf.



Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0372.jpg

Abbildung 61: Probe Quer 20-16-1

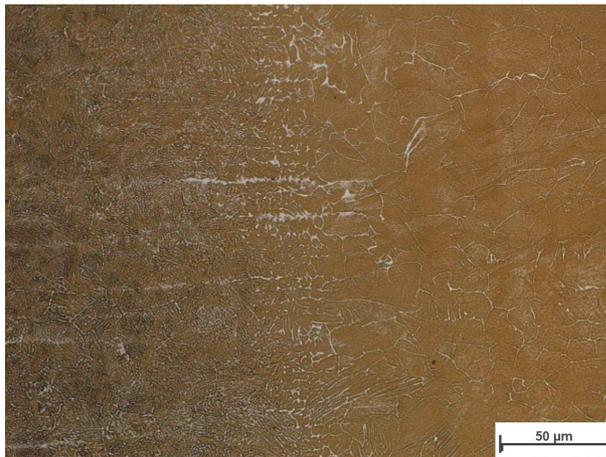


Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm

Bildname: ebw_voith14u0326.jpg

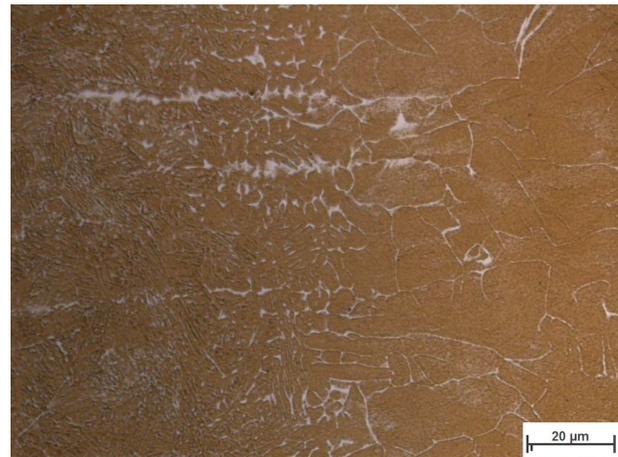
Abbildung 62: Probe Längs 20-63-1

Bei allen Proben sind in der Erstarrungszone δ -ferritische Linien vorhanden (siehe Abbildung 63 und Abbildung 64). Die Häufigkeit dieser Linien in der Schweißnaht ist gering. In Richtung der Wärmeeinflusszone steigt deren Größe und Anzahl stetig an. Sie enden nach der Wärmeeinflusszone.



Mikroskopvergrößerung: 500,0x; Bildbreite: 278,91 µm

Bildname: ebw_voith14u0521.jpg

Abbildung 63: Erstarrungszone der Probe Quer 20-125-1


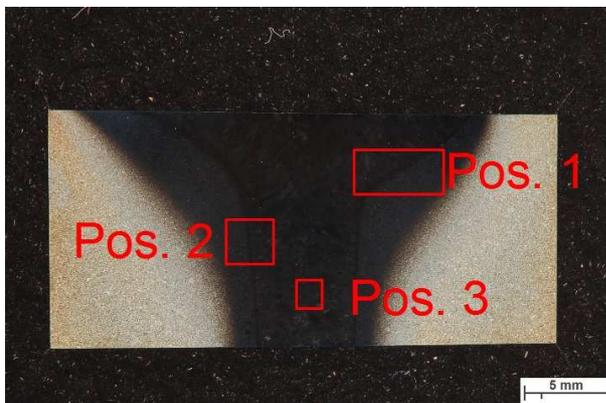
Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: ebw_voith14u0522.jpg

Abbildung 64: δ -Ferritnetz in der Erstarrungszone der Probe 20-125-1

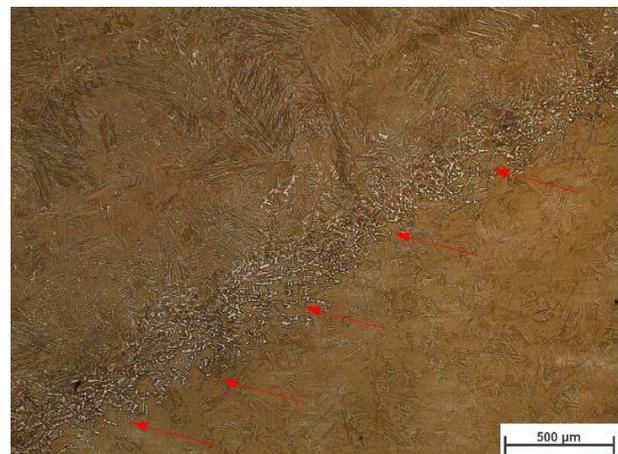
4.2.2.2 Proben mit einer Dicke von 100 mm

Mit zunehmender Oberflächenrauheit sind bei dieser Probendicke vermehrt Hochspannungsüberschläge aufgetreten. Alle Proben weisen dieselben Merkmale auf. Abbildung 66 zeigt die Erstarrungszone im trichterförmigen Bereich der Probe (siehe Position 1 in Abbildung 65). In der Erstarrungszone der Schweißnaht ist δ -Ferrit vorhanden [43].



Makro: Bildbreite/|B|L|SH|OH: 35,60mm|105mm|11|1/2,5s|90mm|20mm

Bildname: ebw_voith14u0582.jpg

Abbildung 65: Markoaufnahme der Probe Quer längs 100-125-1


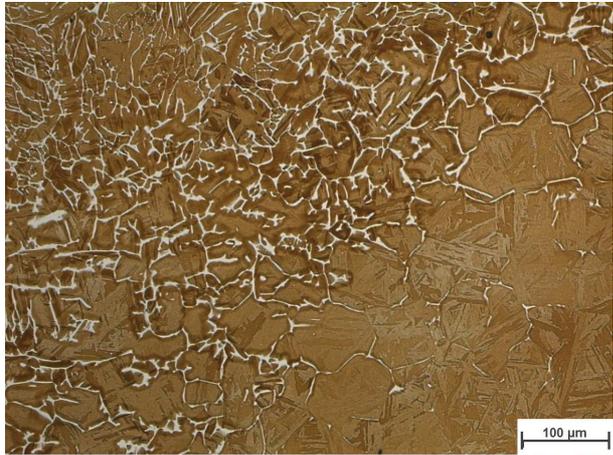
Mikroskopvergrößerung: 50,0x; Bildbreite: 2789,08 µm

Bildname: ebw_voith14u0592.jpg

Abbildung 66: Position 1 aus Abbildung 65

Abbildung 67 zeigt eine Vergrößerung von Abbildung 66. Der δ -Ferrit liegt in diesem Bereich netzförmig vor. Betrachtet man in weiterer Folge die Erstarrungszone im konischen Bereich der Probe (Position 2 in Abbildung 65,) stellt man Unterschiede in

der Struktur fest. In diesem Bereich liegt der δ -Ferrit dendritenförmig vor. Diese dendritische Erstarrungsform steht im Zusammenhang mit der höheren Abkühlgeschwindigkeit in diesem Bereich der Probe [5], [11].



Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 μ m

Bildname: ebw_voith14u0594.jpg



Abbildung 67: Position 1 aus Abbildung 65



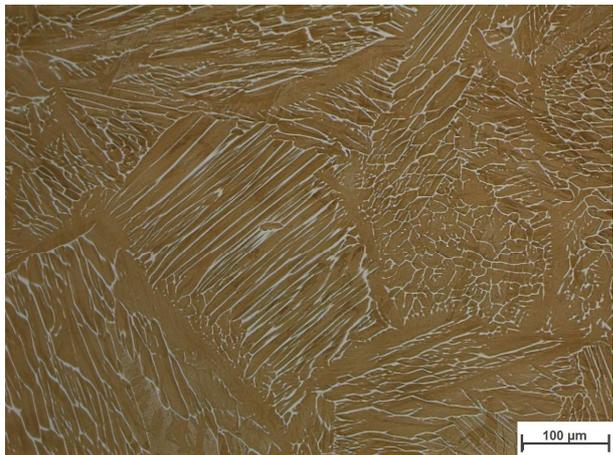
Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 μ m

Bildname: ebw_voith14u0598.jpg



Abbildung 68: Position 2 aus Abbildung 65

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen die Struktur der Schweißnaht der Probe quer oben 100-125-1 und quer oben 100-16-1. Die Struktur der beiden Proben zeigt Regelmäßigkeiten. Die linienförmige Bildung des δ -Ferrits ist bei beiden Proben, obwohl sie unterschiedliche Oberflächenrauheiten besitzen, vorhanden. Die Struktur der Schweißnaht ändert sich stetig in Form und Ausrichtung (siehe Abbildung 71).

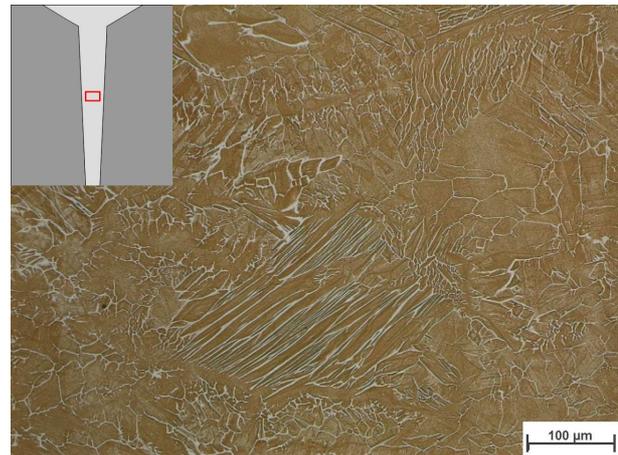


Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 μ m

Bildname: ebw_voith14u0602.jpg



Abbildung 69: Position 3 aus Abbildung 65, Schweißnahtgefüge der Probe Quer Oben 100-125-1



Mikroskopvergrößerung: 200,0x; Bildbreite: 697,27 μ m

Bildname: ebw_voith14u0485.jpg



Abbildung 70: Gefüge der Schweißnaht der Probe Quer Mitte 100-08-1



Abbildung 71: Schweißnahtgefüge der Probe Quer Oben 100-16-1

In der Mitte und im Grund der Schweißnaht liegt δ -Ferrit auch dendritenförmig vor (siehe Abbildung 72 und Abbildung 73). Die Struktur der Schweißnaht ist gleich wie in den bereits behandelten Bereichen.



Abbildung 72: Erstarrungszone der Probe Quer Mitte 100-16-1



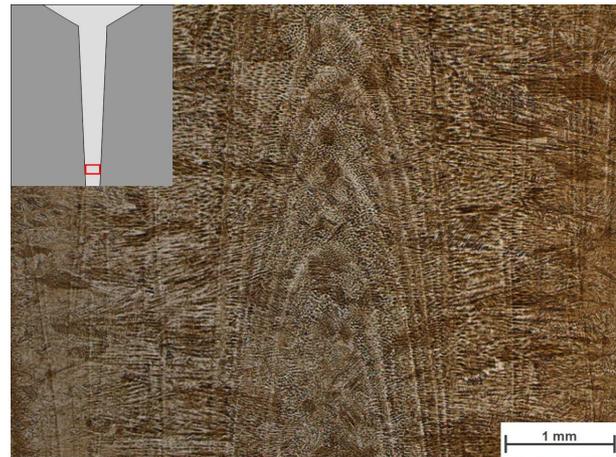
Abbildung 73: Schweißnaht und Erstarrungszone der Probe Quer Unten 100-08-1

Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen die elliptischen Erstarrungslinien in der Wurzel der Schweißnaht. Die elliptische Form zeigt, dass die Proben mit den korrekten Parametern verschweißt wurden.



Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0500.jpg

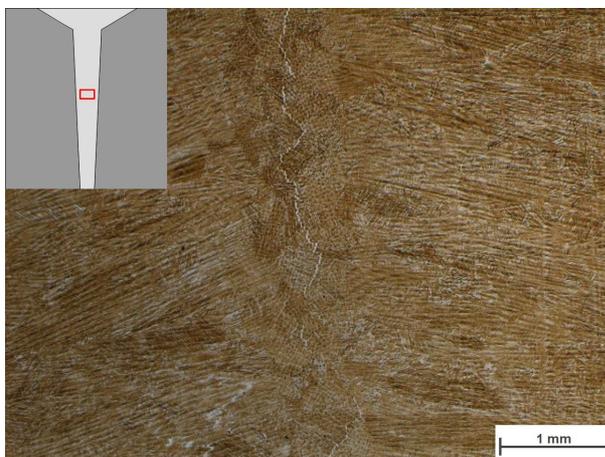

Abbildung 74: Wurzel der Probe 100-08-1


Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0501.jpg


Abbildung 75: Wurzel der Probe 100-08-1

Bei allen Proben ist im mittleren Teil der Schweißnaht eine weiße Linie (siehe Abbildung 76) erkennbar. In diesem Bereich ist dieselbe Struktur wie im Rest der Schweißnaht vorhanden. Bei einer höheren Bildvergrößerung wird die Linie zu einem schattenartigen Bereich. In Abbildung 77 erkennt man unter dem schattenartigen Bereich die Gefügestruktur der restlichen Schweißnaht. Eine Ursache für die Entstehung dieser Linien, kann nicht bestimmt werden.



Mikroskopvergrößerung: 25,0x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: ebw_voith14u0667.jpg


**Abbildung 76: Schweißnahtmitte der Probe Quer
Mitte 100-125-1**


Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: ebw_voith14u0672.jpg


Abbildung 77: Vergrößerung der Abbildung 76

An allen quer zur Schweißrichtung entnommenen lichtmikroskopischen Proben des Blockes 100-16-1 wurden Härtemessungen durchgeführt. In den jeweiligen schweißtechnisch relevanten Zonen, wie Nahtzone und Wärmeübergangszone, weisen alle untersuchten Proben dieselben Härtewerte auf (siehe Anhang).

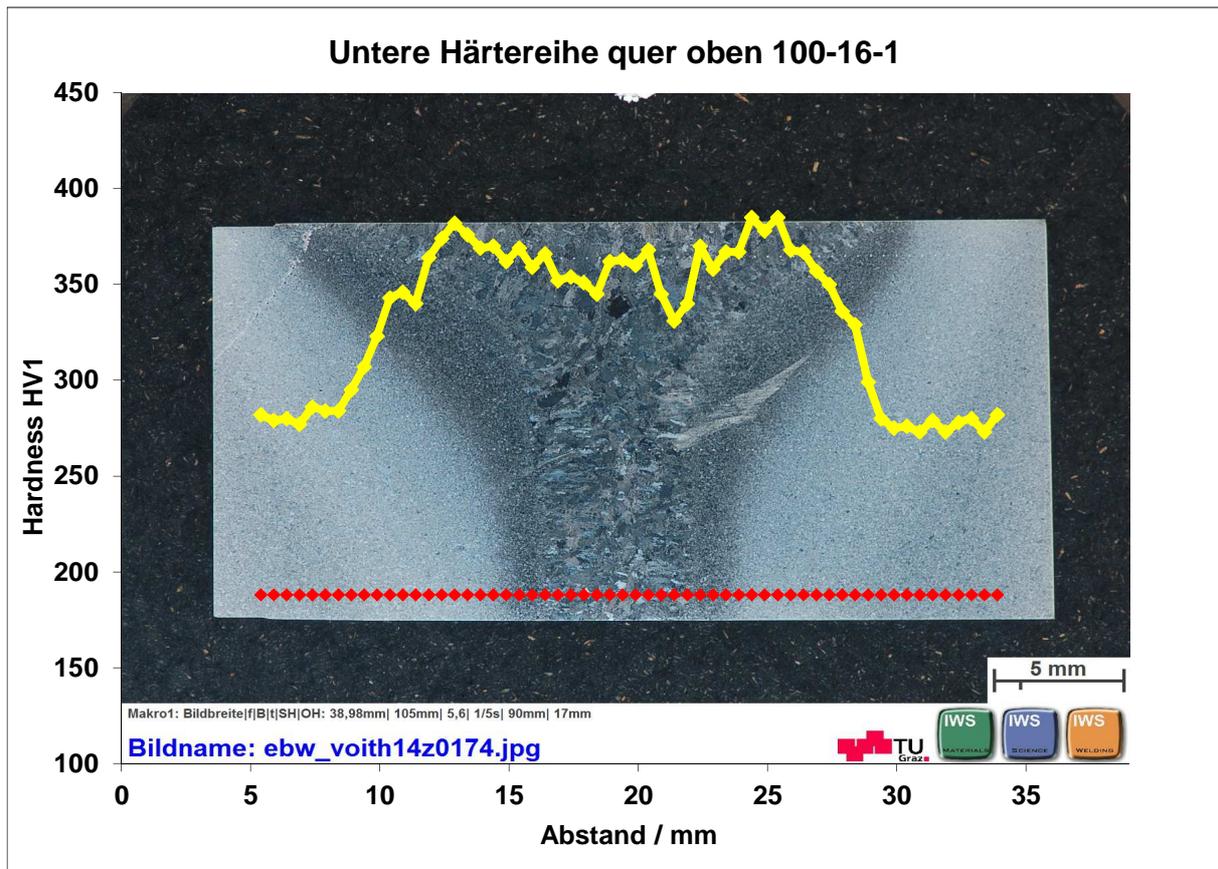


Abbildung 78: Härteline der Probe quer oben 100-16-1

4.3 Zugversuch

Beim Zugversuch soll die Festigkeit der Schweißnaht überprüft werden. Bricht die Probe nicht im Bereich der Schweißnaht sondern im Grundwerkstoff, wird die Schweißnaht als gut gewertet. Die Prüfkraft wird quer zur Schweißnaht eingebracht. Der Zugversuch wird nach DIN 50125 und die Schweißnahtprüfung nach ÖNORM EN 895 durchgeführt [45] [46]. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 10 MPa/s und die Vorkraft 200 N.

Abbildung 79 zeigt die Geometrie der Zugproben und in Tabelle 10 sind die Maße der Proben aufgelistet.

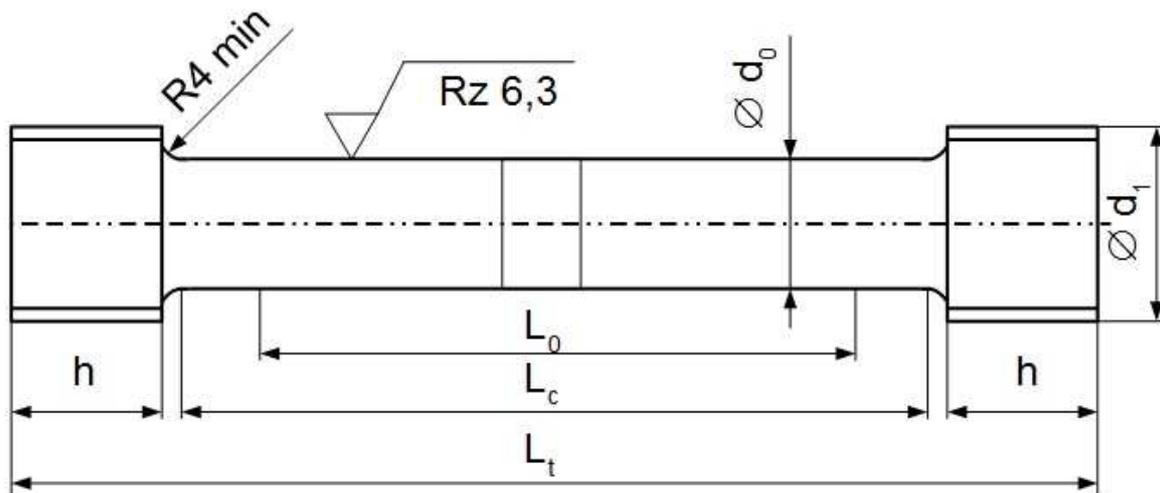


Abbildung 79: Zugprobe DIN 50125 - B 8 x 40 [46]

Tabelle 10: Maße für Zugprobe

D_0	8 mm
D_1	M12
h	10 mm
L_0	40 mm
L_c	48 mm
L_t	75 mm

4.3.1 Proben mit einer Dicke von 20 mm

Tabelle 11 zeigt die Legende, die Zugfestigkeit und die maximal aufgetretene Kraft. Abbildung 80 ist das dazugehörige Spannungs- Dehnungsdiagramm. Alle Proben haben im Grundwerkstoff versagt (siehe Abbildung 81) und somit wird bestätigt, dass die Schweißnaht im Bereich der Zugprobe keine Fehler besitzt. Das rot eingezeichnete Rechteck in der Abbildung 81 stellt die Position der Schweißnaht dar. Die Graphen der Proben 20-125-3-1 und 20-125-3-2 besitzen unterschiedliche Verläufe als die restlichen Proben. Dies ist auf die unterschiedliche Wärmebehandlung der Grundwerkstoffe zurückzuführen. Die Zugfestigkeit und die maximale Prüfkraft sind bei allen Proben annähernd gleich. Bilder der restlichen Proben befinden sich im Anhang Kapitel 10.2.4.

Tabelle 11: Legende und Werte des Zugversuches der Proben mit einer Dicke von 20 mm

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R _m MPa	F _m kN
	1	20-08-1-1	882	44.31
	2	20-08-1-2	880	44.23
	3	20-16-1-1	881	44.27
	4	20-16-1-2	882	44.34
	5	20-63-1-1	880	44.25
	6	20-63-1-2	880	44.24
	7	20-125-3-1	883	44.40
	8	20-125-3-2	880	44.25

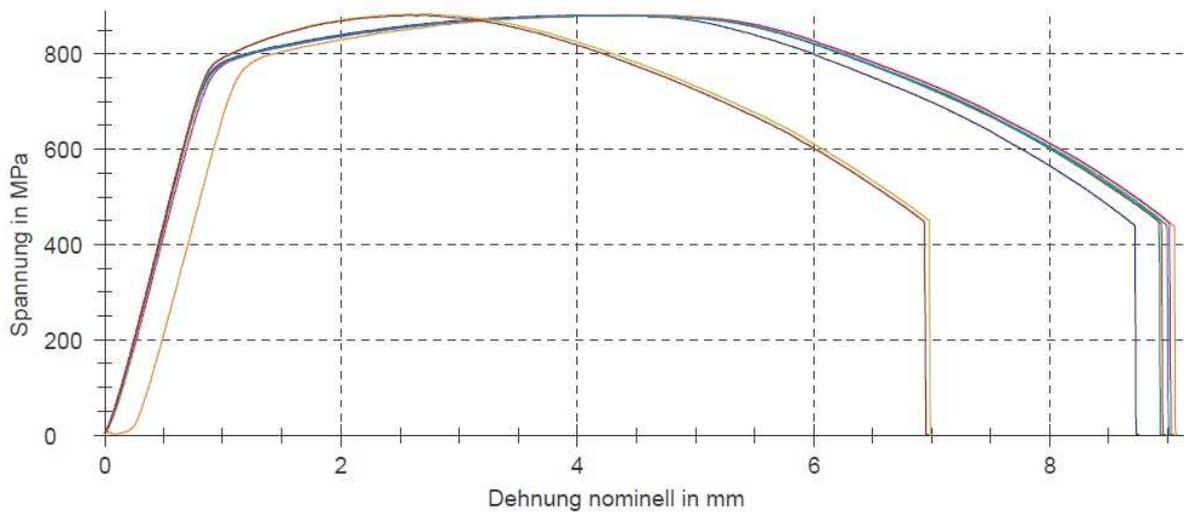


Abbildung 80: Spannungs- Dehnungsdiagramm der Proben mit einer Dicke von 20 mm

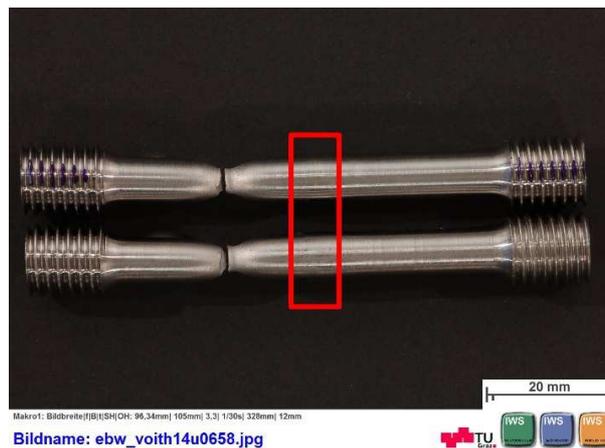


Abbildung 81: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-08-1

4.3.2 Proben mit einer Dicke von 100 mm

Alle Proben besitzen annähernd dieselbe Zugfestigkeit und maximale Zugkraft (siehe Tabelle 12). Die Verläufe im Spannungs- Dehnungsdiagramm sind nahezu ident. Das Versagen ist bei allen Proben im Grundwerkstoff eingetreten (siehe Abbildung 83). Bilder der restlichen Proben befinden sich im Anhang Kapitel 10.2.4.

Tabelle 12: Legende und Werte des Zugversuches der Proben mit einer Dicke von 100 mm

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R _m MPa	F _m kN
	9	100-08-1-oben	848	42.64
	10	100-08-1-mitte	847	42.57
	11	100-08-1-unten	844	42.44
	12	100-16-1-oben	852	42.81
	13	100-16-1-mitte	854	42.91
	14	100-16-1-unten	838	42.14
	15	100-63-1-oben	848	42.63
	16	100-63-1-mitte	847	42.59
	17	100-63-1-unten	843	42.37
	18	100-125-1-oben	853	42.86
	19	100-125-1-mitte	847	42.56
	20	100-125-1-unten	859	43.17

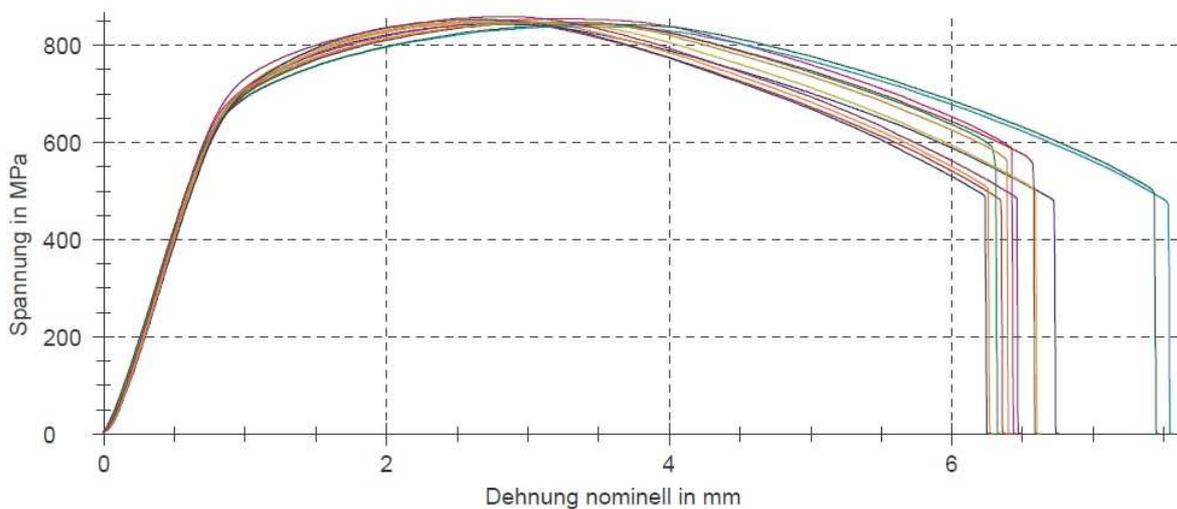
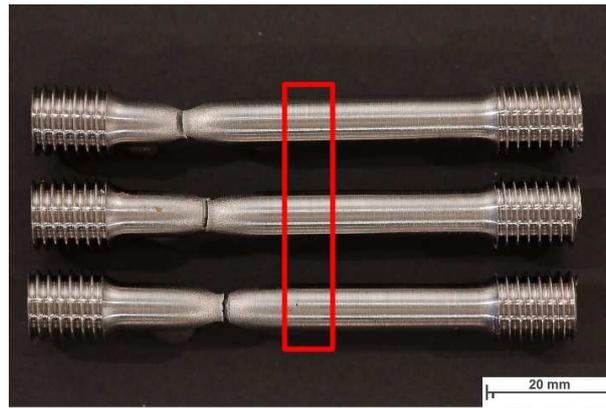


Abbildung 82: Spannungs- Dehnungsdiagramm der Proben mit einer Dicke von 100 mm



Makrot: Bildbreite[B](SH)Oh: 96,34mm| 105mm| 3.3| 130s| 328mm| 12mm

Bildname: [ebw_voith14u0662.jpg](#)



Abbildung 83: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-08-1

4.4 Zusammenfassung

Die Einbrandkerbe der Probe 20-125-1 ist deutlich größer als bei den anderen. Sie besitzt außerdem in ihrer Mitte keine Nahtüberhöhung. Es sind bei dieser Probendicke während des Schweißprozesses keine Überschlüge aufgetreten. Metallographische Unterschiede sind nicht zu erkennen. δ -Ferrit ist in jeder Schweißnaht und Wärmeeinflusszone vorhanden. Die Erstarrungslinien verlaufen annähernd ident. Es sind in allen vier Proben Poren vorhanden. Es sind keine Risse in den Proben entdeckt worden. Die Abweichung der Farbverhältnisse der einzelnen Proben sind Folgen der unterschiedlichen Ätzdauer.

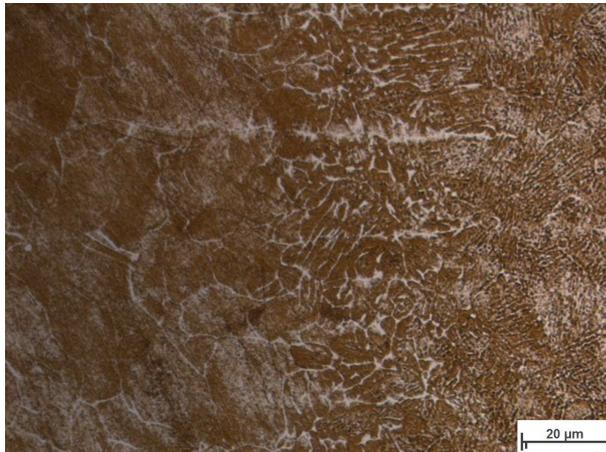
Durch den Zugversuch konnten keine Unterschiede in Folge der Rauheit festgestellt werden. Alle Proben haben nicht in der Schweißnaht, sondern im Grundwerkstoff versagt. Grund für die Abweichung der Verläufe der Proben 20-125-1-1 und 20-125-1-1 ist die Verwendung von zwei unterschiedlichen wärmebehandelten Grundwerkstoffen. Der angegebene Wert für die Zugfestigkeit stimmt mit den während des Zugversuchs gemessenen Werten überein.

Durch die makroskopische und mikroskopische Untersuchung konnten keine Abweichungen der Schweißnähte bei den Proben mit einer Dicke von 100 mm festgestellt werden. δ -Ferrit in der Erstarrungszonen ist in allen Proben vorhanden. Die unterschiedliche Struktur des δ -Ferrits in der Erstarrungszone ist bei allen Proben gegeben.

Es sind keine Poren bei den Proben mit einer Dicke von 100 mm vorhanden. Alle Proben besitzen einen Fehler im Slope Out Bereich Ein schwerwiegender Schweißfehler wurde nur bei der Probe 100-63-1 festgestellt. Die Ursache für diesen Erstarrungsriss ist unklar. Mit zunehmender Oberflächenrauheit häuften sich Hochspannungsüberschlüge während des Schweißprozesses. Alle Proben versagten beim Zugversuch im Grundwerkstoff und erreichten die geforderte Zugfestigkeit.

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen beide den Erstarrungsbereich der jeweiligen Schweißnaht. Sie besitzen dieselbe Vergrößerung. Abbildung 84 zeigt eine Probe mit einer Dicke von 20 mm und Abbildung 85 eine Probe mit einer Dicke

von 100 mm. In beiden Proben ist δ -Ferrit vorhanden. Bei der 100 mm dicken Probe ist das δ -Ferritnetz deutlich größer als bei der Probe mit einer Dicke von 20 mm.



Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: [ebw_voith14u0517.jpg](#)



Abbildung 84: Erstarrungszone der Probe 20-63-1



Mikroskopvergrößerung: 1000,0x; Bildbreite: 139,45 µm

Bildname: [ebw_voith14u0533.jpg](#)



Abbildung 85: Erstarrungszone der Probe 100-16-1

Durch die durchgeführten Härtemessungen konnten keine Unterschiede zwischen den Oberflächenrauheiten und Dicken festgestellt werden. Alle untersuchten Proben besitzen in denselben Bereichen auch annähernd die gleichen Härtewerte.

5 Resultat

Mit den Versuchen konnte kein Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Elektronenstrahlschweißprozess festgestellt werden. Alle Proben weisen makroskopisch wie mikroskopisch dieselben Merkmale auf. Die durchgeführten Zugversuche, egal mit welcher Probendicke, besitzen alle fast ähnliche Werte.

Mit zunehmender Oberflächenrauheit bei den Proben mit einer Dicke von 100 mm stiegen die Anzahl der Überschläge. Der vorhandene Erstarrungsriss in Probe 100-63-1 kann nicht dem Einfluss der Oberflächenrauheit zugeordnet werden, da der Einfluss von Überschlägen auf die Rissbildung unklar ist.

Die Aussagen, dass eine zu glatte Stoßoberfläche die Bildung des Dampfkanals behindert [7] und eine Oberflächenrauheit von $R_a > 3,6$ zu Fehlern in der Schweißnaht führt [10], können nicht bestätigt werden.

Bei den verwendeten Proben wurden alle Stoßflächen gefräst. Somit wurde sichergestellt, dass alle Form- und Lagetoleranzen eingehalten wurden. Ob für die Einhaltung der Form und Lagetoleranzen ein Zuschneiden der zu verschweißenden Bauteile mittels einer konventionellen Bandsäge ausreicht, kann nicht bestätigt werden, weil dies im Zuge dieser Arbeit nicht untersucht wurde.

Bei den Proben mit einer Dicke von 20 mm spielen die untersuchten Oberflächenrauheiten keine Rolle. Bei einer Schweißtiefe von 100 mm sollte R_a 1,6 nicht überschritten werden, da sonst vermehrt Hochspannungsüberschläge auftreten. Die Verwendung von Stoßflächen mit Oberflächenrauheiten von R_a 6,3 und R_a 12,5 sollten vermieden werden, da diese die Einhaltung der Lagetoleranzen und das Reinigen der Stoßflächen unnötig erschweren.

6 Ausblick

Für weitere Untersuchungen sollte man sich nur auf technisch und wirtschaftlich relevante Oberflächenrauheiten konzentrieren. Mit konventionellen spanenden Fertigungsverfahren können mit überschaubarem wirtschaftlichen Aufwand Oberflächenrauheiten von R_a 0,8 (geschlichtet) bis R_a 3,6 (geschruppt) hergestellt werden [29]. Zudem sollten die Versuche mit der Rauheit R_a 3,6 ergänzt werden.

Eine Prüfung der Schweißnähte mittels Kerbschlagbiegeversuch könnte noch mehr Aufschluss auf die Auswirkung der Oberflächenrauheit auf den Elektronenstrahlprozess geben.

Für eine Bestimmung der weißen Linie in mitten der Schweißnähte mit einer Dicke von 100 mm kann eine Untersuchung mittels einer Mikrosonde durchgeführt werden.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf der Potentiallinien bei unterschiedlichen Steuerspannungen [1]	4
Abbildung 2: Elektronenstrahlgenerator [6].....	4
Abbildung 3: Virtueller und reeller Crossover [1]	5
Abbildung 4: Fokussierung eines Elektronenstrahls mittels einer elektromagnetischen Linse [1].....	6
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Stigmators [8].....	7
Abbildung 6: Schematische Darstellung eines Ablenkens [8].....	7
Abbildung 7: Reflexionen des Elektronenstrahls von der Werkstückoberfläche [1]	8
Abbildung 8: Aufschmelzen der Schweißfuge [5]	9
Abbildung 9: Aufschmelzvorgang beim Elektronenstrahlschweißen [11].....	10
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Komponenten einer Elektronenstrahlmaschine [13]	11
Abbildung 11: Verschiedene Ausführung von Arbeitskammern [8] [4].....	12
Abbildung 12: Verschiedene Vakuumpumpen [1].....	13
Abbildung 13: Ausführung von I-Nähten [4].....	13
Abbildung 14: Rundnähte [2]	14
Abbildung 15: Sonstige Schweißnahtformen [4].....	14
Abbildung 16: Oberflächenaufbau eines metallischen Werkstoffes [7]	16
Abbildung 17: Entmagnetisierung eines Bauteils mittels eines Wechselmagnetfeldes [23]	17
Abbildung 18: Gestaltungsabweichungen [26].....	18
Abbildung 19: Darstellung des Mittenrauwertes R_a , der Glättungstiefe R_p und der maximalen Rautiefe R_{max}	18
Abbildung 20: Darstellung der gemittelten Rautiefe R_z [30]	19
Abbildung 21: Entstehung des Schweißgefüges in Abhängigkeit der Kristallisationsgeschwindigkeit R und des Temperaturgradienten G [39].....	22
Abbildung 22: Schöfflerdiagramm X4CrNiMo13-4	23
Abbildung 23: Martensitumwandlung [41].....	24

Abbildung 24: Dehngrenze bei erhöhter Temperatur und verschiedenen Wärmebehandlungen [40] 25

Abbildung 25: Abkühlkurve von reinem Eisen (links) und Ausschnitt des Eisen-Kohlenstoffschaubildes [20]..... 26

Abbildung 26: Einfluss der Legierungselemente auf die Umwandlung [20] 27

Abbildung 27: Elektronenstrahlschweißanlage des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU-Graz..... 30

Abbildung 28: Probenbezeichnung 30

Abbildung 29: Probengeometrie der 20 mm und 100 mm dicken Proben 31

Abbildung 30: Vorbereitete Probe 20-08-1 32

Abbildung 31: Aufspannung einer Probe einer Dicke von 20 mm..... 33

Abbildung 32: Aufspannung einer Probe mit einer Dicke von 100 mm..... 33

Abbildung 33: Probenentnahme bei 20 mm dicken Proben..... 36

Abbildung 34: Probenentnahme bei 100 mm dicken Proben (Seitenansicht)..... 37

Abbildung 35: Probe 20-16-1 geätzt mit V2A..... 38

Abbildung 36: Probe 20-16-1 geätzt mit LiBI 38

Abbildung 37: Makroaufnahme der Einbrandkerbe der Probe 20-63-2 39

Abbildung 38: Makroaufnahme der Wurzel der Probe 20-63-2..... 39

Abbildung 39: Längsschnitt der Probe 20-08-2 geätzt mit Adler..... 40

Abbildung 40: Längsschnitt der Probe 100-16-2 geätzt mit Adler..... 40

Abbildung 41: Darstellung der Form der Schweißnaht 41

Abbildung 42: Schnitt quer zur Schweißrichtung der Probe 100-125-1 41

Abbildung 43: Schnitt quer zur Schweißrichtung der Probe 100-63-1 41

Abbildung 44: Oberfläche des Risses der Probe 100-63-1..... 42

Abbildung 45: Position 1 in Abbildung 44 42

Abbildung 46: Einbrandkerbe der Probe 20-63-1 43

Abbildung 47: Einbrandkerbe der Probe 20-125-1 43

Abbildung 48: Makroaufnahme der Probe Quer 20-125-1 44

Abbildung 49: Mikrohärtmessung in einer δ -Ferritlinie..... 44

Abbildung 50: Mikrohärtmessung in der Wärmeeinflusszone 44

Abbildung 51: Linker Grundwerkstoff der Probe Quer 20-125-1 45

Abbildung 52: Rechter Grundwerkstoff der Probe Quer 20-125-1	45
Abbildung 53: Untere Härtereihe der Probe quer 20-16-1	46
Abbildung 54: EDX-Scan der linken Seite der Probe Längs 1 20-08-1	47
Abbildung 55: EDX-Scan der rechten Seite der Probe Längs 1 20-08-1	47
Abbildung 56: EDX-Scan über die Schweißnaht der Probe Längs 1 20-08-3.....	48
Abbildung 57: Position 1 in Abbildung 90; Probe Längs 20-125-1	49
Abbildung 58: Probe Längs 20-08-3	49
Abbildung 59: Wärmeeinflusszone im linken Bereich der Probe Längs 20-125-1	49
Abbildung 60: Schweißnaht der Probe Quer 20-63-1	49
Abbildung 61: Probe Quer 20-16-1	50
Abbildung 62: Probe Längs 20-63-1	50
Abbildung 63: Erstarrungszone der Probe Quer 20-125-1.....	51
Abbildung 64: δ -Ferritnetz in der Erstarrungszone der Probe 20-125-1	51
Abbildung 65: Markoaufnahme der Probe Quer längs 100-125-1	51
Abbildung 66: Position 1 aus Abbildung 65	51
Abbildung 67: Position 1 aus Abbildung 65	52
Abbildung 68: Position 2 aus Abbildung 65	52
Abbildung 69: Position 3 aus Abbildung 65, Schweißnahtgefüge der Probe Quer Oben 100-125-1	52
Abbildung 70: Gefüge der Schweißnaht der Probe Quer Mitte 100-08-1	52
Abbildung 71: Schweißnahtgefüge der Probe Quer Oben 100-16-1	53
Abbildung 72: Erstarrungszone der Probe Quer Mitte 100-16-1	53
Abbildung 73: Schweißnaht und Erstarrungszone der Probe Quer Unten 100-08-1	53
Abbildung 74: Wurzel der Probe 100-08-1.....	54
Abbildung 75: Wurzel der Probe 100-08-1.....	54
Abbildung 76: Schweißnahtmitte der Probe Quer Mitte 100-125-1.....	54
Abbildung 77: Vergrößerung der Abbildung 76.....	54
Abbildung 78: Härteline der Probe quer oben 100-16-1	55
Abbildung 79: Zugprobe DIN 50125 - B 8 x 40 [46].....	56
Abbildung 80: Spannungs- Dehnungsdiagramm der Proben mit einer Dicke von 20 mm	57

Abbildung 81: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-08-1	57
Abbildung 82: Spannungs- Dehnungsdiagramm der Proben mit einer Dicke von 100 mm	58
Abbildung 83: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-08-1	59
Abbildung 84: Erstarrungszone der Probe 20-63-1	61
Abbildung 85: Erstarrungszone der Probe 100-16-1	61
Abbildung 86: Prüfbericht der Charge 1 Teil 1	73
Abbildung 87: Prüfbericht der Charge 1 Teil 2	74
Abbildung 88: Prüfbericht der Charge 2 Teil 1	75
Abbildung 89: Prüfbericht der Charge 2 Teil 2	76
Abbildung 90: Makroaufnahme der Probe längs 20-08-3	77
Abbildung 91: Härtelinie der Probe quer 20-16-1	78
Abbildung 92: Härtelinie der Probe quer 20-63-1	78
Abbildung 93: Härtelinie der Probe quer 20-125-1	79
Abbildung 94: Härtelinie der Probe quer mitte 100-16-1	79
Abbildung 95: Härtelinie der Probe quer unten 100-16-1	80
Abbildung 96: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-16-1	80
Abbildung 97: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-63-1	80
Abbildung 98: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-125-1	81
Abbildung 99: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-16-1	81
Abbildung 100: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-63-1	81
Abbildung 101: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-125-1	81

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Legierungselemente von X4CrNiMo13-4 in %	20
Tabelle 2: Mechanische Kennwerte bei verschiedenen Anlasstemperaturen [38]....	25
Tabelle 3: Werkstoffzusammensetzung der beiden Chargen	28
Tabelle 4: Mechanische Kennwerte der Chargen.....	28
Tabelle 5: Maschinenkennwerte der Elektronenstrahlanlage	29
Tabelle 6: Schweißparameter für Proben mit einer Dicke von 20 mm und 100 mm .	34
Tabelle 7: Linsenstrom der Proben mit einer Dicke von 100 mm	35
Tabelle 8: Ätzmittel [43]	38
Tabelle 9: Härtewerte der Probe Quer 20-125-1 in Abbildung 48.....	44
Tabelle 10: Maße für Zugprobe	56
Tabelle 11: Legende und Werte des Zugversuches der Proben mit einer Dicke von 20 mm.....	57
Tabelle 12: Legende und Werte des Zugversuches der Proben mit einer Dicke von 100 mm.....	58
Tabelle 13: Härtewerte der Probe längs 20-08-1 in Abbildung 90	77

9 Literaturverzeichnis

- [1] H. Schultz, *Elektronenstrahlschweißen*, 2. Auflage. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, 2000.
- [2] V. Adam, U. Clauß, D. v. Dobeneck, T. Krüssel, and T. Löwer, *Elektronenstrahl - Schweißen: Grundlagen einer faszinierenden Technik*, 1. Auflage. pro-beam AG & Co. KGaA, 2011.
- [3] K. A. Woeste, *Elektronenstrahlschweißen metallischer Werkstoffkombinationen*. Aachen, 2005.
- [4] K.-J. Matthes, W. Schneider, and H. Letsch, *Schweißtechnik: Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012, pp. 475–477.
- [5] U. Dilthey, *Schweißtechnischer Fertigungsverfahren 1*, 3. Auflage. Aachen: Springer, 2006.
- [6] “pro-beam Strahlgeneraeror,” 2012. [Online]. Available: http://www.pro-beam.com/de/app/media/original/Generator_de.pdf.
- [7] D. v. Dobeneck, T. Löwer, and V. Adam, *Elektronenstrahlschweißen: Das Verfahren und seine industrielle Anwendung für höchste Produktivität*. Verlag moderne Industrie, 2001.
- [8] “Probeam,” 2012. [Online]. Available: <http://www.pro-beam.com/>.
- [9] DVS Merkblatt 2803, *Elektronenstrahlschweißen in der Mikrotechnik*. 1974.
- [10] DVS Merkblatt 2703, *Elektronenstrahlschweißen ind der Luft- und Raumfahrt*. 1975.
- [11] H. J. Fahrenwaldt and V. Schuler, *Praxiswissen Schweißtechnik*, 2. Auflage. Wiesbaden: Vieweg Praxiswissen, 2006.

- [12] S. Panzer, T. Ardenne, H. Frost, and H. Schurath, “Vermeidung technologisch- und werkstoffbedingter Hochspannungsüberschläge in der Elektronenkanone beim Elektronenstrahlschweißen,” Halle, 1987.
- [13] K.-R. Schulze, “Immer dasselbe und doch jedes Mal anders,” *Schweißen Schneid.*, vol. 63, 2011.
- [14] R. Killing, *Kompendium der Schweißtechnik: Verfahren der Schweißtechnik*. Düsseldorf, 1997.
- [15] J. Ruge, *Handbuch der Schweißtechnik: Verfahren und Fertigung*. Braunschweig: Springer, 1980.
- [16] Erarbeitet von der Fachgruppe “Schweißtechnische Ingenieurausbildung” der Arbeitsgruppe “Schulung und Prüfung,” *Fügetechnik, Schweißen*, 6th ed. DVS, 2004.
- [17] DVS Merkblatt 3213, *Empfehlung zum Reinigen der Fügezone für das Elektronenstrahlschweißen*. 2010.
- [18] DVS Merkblatt 3201, “Grundsätze für das Konstruieren von Bauteilen für das Elektronenstrahl- schweißen im Fein- und Hochvakuum,” 2010.
- [19] C. Sommitsch, *Werkstoffkunde*. Graz: Technische Univesität Graz.
- [20] H.-J. Bargel, H. Hilbrans, K.-H. Hübner, O. Krüger, and G. Schulze, *Werkstoffkunde*, 10. Auflag. Wiesbaden: Springer, 2007.
- [21] M. Marinescu, *Elektrische und magnetische Felder*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [22] H. Bernstein, *Elektrotechnik/Elektronik für Maschinenbauer*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.

- [23] “Entmagnetisieren,” 2014. [Online]. Available: <http://elektronik-kurs.net/elektrotechnik/magnetisierung-und-entmagnetisierung/>.
- [24] M. Ziolkowski and H. Brauer, “Modelling of Seebeck effect in electron beam deep welding of dissimilar metals,” *COMPEL Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 140–153, 2009.
- [25] J. Dillinger, *Fachkunde Metall*. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel Verlag, 2007.
- [26] D. Muhs, H. Wittel, D. Jannasch, and J. Voßiek, *Roloff / Matek Maschinenelemente*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2007.
- [27] “<http://www.tiefbohr-lexikon.de>,” 2014. .
- [28] H. Dubbel, K. Grote, and J. Feldhusen, “Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau,” 2007.
- [29] A. Frischherz, *Tabellenbuch für Metalltechnik*. Wien: MANZ Verlag Schulbuch, 2002.
- [30] B. Denkena and H. K. Tönshoff, *Spanen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [31] H. Berns and W. Theisen, *Eisenwerkstoffe - Stahl und Gusseisen*. Bochum: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [32] F. Strassburg and H. Wehner, *Schweißen nichtrostender Stähle*. Düsseldorf: DVS, 2009.
- [33] “Grundpraktikum Materialwissenschaften,” Christian- Albrechts- Universität zu Kiel, 2013.
- [34] W. Wolfgang, *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2004.

- [35] *Theoretische Ausbildung IWE*. Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH, 2008.
- [36] E. Möller, *Handbuch Konstruktionswerkstoffe*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013.
- [37] U. Heubner, “Merkblatt 821 Edelstahl Rostfrei – Eigenschaften,” *Informationsstelle Edelstahl Rostfrei*, 2014.
- [38] *Werkstoffdatenblatt 1.4313*. Deutsche Edelstrahlwerke.
- [39] G. Schulze, *Die Metallurgie des Schweißens*. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [40] *Datenblatt 1.4313*. Thyssenkrupp Materials Schweiz, pp. 1–4.
- [41] W. Weißbach, *Werkstoffkunde-Strukturen, Eigenschaften und Prüfung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2007.
- [42] D. Fofanov and D. Risch, “Merkblatt 827 Magnetische Eigenschaften nichtrostender Stähle,” *Informationsstelle Edelstahl Rostfrei*, 2013.
- [43] “www.metallograph.de,” 2014. .
- [44] P. Häckel, C. Sommitsch, and P. Mayr, “Entstehung und Stabilität von Delta-Ferrit beim Schweißen von 9 % Chromstählen,” Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2013.
- [45] ÖNORM EN 895, *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen Querzugversuch*, Brüssel. Österreichisches Normungsinstitut, 1995.
- [46] DIN 50125, *Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2004.

10 Anhang

10.1 Prüfberichte des Werkstoffes

		COGNE ACCM SPECIAL Sp. a. 11100 AOSTA - VIA PARAVERA 16 - 110296 CAP. SOC. 143.500.000 EURO - VERS. VA. 11/05/2010 (09) - R.E. n. 40-50/4		Unternehmen mit Management-Systeme nach ISO 9001:2008 und ISO 14001 ISO 15189 n. ISO 1401		ARNHEMERPROEFZEDUCNIS 3.1 (EN 10204:2004) (A03) BESCHEINIGUNGS-NR 2013025966 PAGE 1/2	
(A06) BESTELLER :	COGNE EDELSTAHL GmbH	1256334					
(A07) KUNDENBESTELLN.R.:	AOSTA, VIA PARAVERA 16 - ITALIA						
(A01) HERSTELLERWERK :	QUALITÄTSTELLE						
(A05) AUSSTELLER :	(A04) ZEICHEN DES HERSTELLERWERKES.:	COGNE					
(A08) WERKAUFTRAGS-NR.:	25156528 /20						
DIE ZERTIFIZIERTE PRODUKTE SIND IN ÜBEREINSTIMMUNG MIT DER BESTELLUNG							
INFORM. VORSCHRIFT :	GD017231101780	46889	LMA Maschinen Bearbeitet	FLACHSTAHL SCHAREK TOLERANZ :	+ 5,000	- 0,0000	
(B01) ERZEUGNIS :	BN VERGUETET	252,000	(B12) LANGE (MM) :	02000	/06000		
(B03) OBERFLÄCHENENDE :	WN.1.4313 X3CRN10 13-4	01780MARKEBEZEICHNUNG :	E415H				
(B04) LIEFERZUSTAND :	202000	(B07) LOS-NR.:	947940				
(B11) MASSE (MM) :		KURZZEICH. P. SCHMELZE-NR 794					
(B02) STAHLSORTE :							
(B08) SCHMELZE-NR.:							
(B06) KENNZEICHNUNG :							
STRECKES-TENTOURB-T(D5)							
SCHWELZUNG IM ELEKTROOFEN + AOD							
WÄRMENACHBEHEIT	6,6						
UNTERSCHÜTZUNG							
(C71) CHEM. ZUSAMMENSETZ - SCHMELZE ANALYSE NACH ASTM E1019-A753-E1086-E415-A580							
Kontrollnummer - Masse :020000476193 -	83,700 KG						
ELEMENTE	C	Si	Mn	P	S	N	Cr
ERREICHT	0,028	0,42	0,73	0,021	0,0030	0,021	12,85
ELEMENTE	Mo	Ni	Co				
ERREICHT	0,46	4,44	0,040				
HARTEPRÜFUNG IM LIEFERZUSTAND							
Kontrollnummer - Masse :020000476193 -	15,730 KG						
VORSCHRIFT	EN ISO 148-1-KV2						
ERREICHT	265						
KERBSCHÄGZAEHCKEIT IM LIEFERZUSTAND							
Kontrollnummer - Masse :020000476193 -	15,730 KG						
VORSCHRIFT	EN ISO 148-1-KV2						
(C40) PROBENFORM	KV						
(C03) PRÜFTEMPERATUR °C	20-						
MASSEINHEIT	J						
ERREICHT	118	120	156				
ZUGVERSUCH IM LIEFERZUSTAND							
Kontrollnummer - Masse :020000476193 -	15,730 KG						
VORSCHRIFT	EN-ISO6892-1						
(C02) PROBENRICHTUNG: T							
MASSEINHEIT	RM	RP02	A5				
ERREICHT	861	781	21,4	61,6			

Abbildung 86: Prüfbericht der Charge 1 Teil 1



COGNÉ ACCIUM SPECIALS s.p.a.
 11100 ACETI - VIA PARAVERA, 16
 TEL. +39 0465 3601 - FAX +39 0465 362286
 CF. 02116720987 - CODICE UNIV. VERS.
 VAT IT0457320076 - R.E.A. n. 40-56474

Unternehmen mit Management-Systemen von ISO
 9001:2008 und zertifiziert gemäß ISO 9001,
 ISO 9001:2008 e ISO 14001.

ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1 (EN 10204-2:2004)
 (A03) BESCHLEIßUNGS-NR 2013025956
 PAGE 2/2

REINHEITSGRAD - Masse : 020000476193 - 15.730 KG
 VORSCHRIFT - DIME0602 K4
 ERREICHT GENL_d

SICHTPRÜFUNG UND MASSKONTROLLE GEMÄSS EN 10221 KLASSE C UND EN 10060: BESTANDEN.
 US-PRÜFUNG GEMÄSS EN10228 Tab.5 Qual.Klasse 4, und SEPI923 PN D2 Gruppe 4 Klasse B: BESTANDEN.
 DAS MATERIAL WURDE NICHT REPARATURGESCHWEISST.
 VERWECHSLUNGSPRÜFUNG NACH PORTABLE SPECTROKOPISCHER PRÜFMETHODE: DURCHGEFÜHRT.
 FREI VON VERUNREINIGUNGEN DURCH RADIOAKTIVITÄT.
 HARTEPRÜFUNG - Masse : 020000476193 - 15.730 KG
 VORSCHRIFT - HARTPRÜFUNG PRÜFBEFINDUNG :

KERBSCHLAGZÄHLIGKEIT	
Kontrollennummer - Masse : 020000476193 - 15.730 KG	
VORSCHRIFT - EN ISO 148-1-KV2	{C02} PROBENRICHTUNG: L
{C40} PROBENFORM	KV Z0
{C03} PRÜFTEMPERATUR °C	J
MASSGENAUIGKEIT	104 122 172

GEMÄSS CE RICHTLINIEN: 2011/65 - 2000/53 2002/95(ROHS) 2003/11 - 2005/618.
 KENNZEICHNUNG: HERSTELLERZEICHEN, WERKSTOFF-NR., SCELZEN-NR.,
 PROBE-/LOS-NR.
 DAS QUALITÄTSMANAGEMENT-SYSTEM IST ZERTIFIZIERT DURCH ISO UND ERFÜLLT DIE ANFORDERUNGEN NACH EN ISO 9001:2008 UND ISO TS
 16949:2009 (LETZTGENANNTES GILT NUR FÜR WÄRMEGEWALZTE, GESCHALTE, GESCHLIFFENE STAEBE UND ATOMISIERTE PULVER).
 ALLE NORMEN IN DER LETZTEN REVISION.

{201} DATUM 30.05.2013 VANESSA MICONI MV (AUSSTELLER) - ATTEST ELEKTRONISCH ERSTELLT

Abbildung 87: Prüfbericht der Charge 1 Teil 2



COGNÉ ACCION SPECIALS P.A.
 11100, AVENUE DE LA PARAVIERA, 15
 CHATELAIN, 13355400 L'ÉVRY-VAL
 VILLENEUVE-LEZ-ROUEN - R.E.A. n. 00 50924

Ultrasonen mit Magnetpulver-Systeme von KQ
 ISO 15 1548 & ISO 14001

ABNAHMEPRÜFZEUGNIS 3.1 (EN 10204:2004)
 (A03) BESCHREIBUNGS-NR 2013009702
 PAGE 2/2

BEINHEITSGRAD
 Kontrollennummer - Masse : 020000481675 - 17,270 KG
 VORSCHRIFT
 GEN1_0 DIN50602 K4
 ERREICH

STICHPRÜFUNG UND MASSKONTROLLE GEMÄSS EN 10221 KLASSE C UND EN 10060: BESTANDEN.
 US-PRÜFUNG GEMÄSS EN 10221, Tab. 5 Qual. Klasse 4, und SEP1923 PN D2 Gruppe 4 Klasse B: BESTANDEN.
 DAS MATERIAL WURDE NICHT REPARATURGESCHWEISST.
 VERWECHSLUNGSPRÜFUNG NACH EN 10221: DIE PRÜFBEDINGUNGEN SIND GEGENÜBER DEN ANFORDERUNGEN
 FREI VON VERUNREINIGUNGEN DURCH RADIOAKTIVITÄT.
 HARTEPRÜFUNG
 Kontrollennummer - Masse : 020000481675 - 17,270 KG
 VORSCHRIFT
 EN ISO 6506 HB PRÜFBEDINGUNG :

KERBSCHLAGZÄHLIGKEIT
 Kontrollennummer - Masse : 020000481675 - 17,270 KG
 VORSCHRIFT
 EN ISO 148-1-KV2 (CO2) PROBENRICHTUNG: T
 MASSEINHEIT
 136 J 20
 158 J 144

GEMÄSS CE RICHTLINIEN: 2011/65 - 2000/53 2002/95 (ROHS) 2003/11 - 2005/618.
 KENNZEICHNUNG: HERSTELLERZEICHEN, WERKSTOFF-NR., SCHAUFEN-NR.,
 PROBE-/LOS-NR.
 DAS QUALITÄTSMANAGEMENT-SYSTEM IST ZERTIFIZIERT DURCH ICG UND ERFÜLLT DIE ANFORDERUNGEN NACH EN ISO 9001:2008 UND ISO TS
 16949:2009 (LETZTGENANNTES GILT NUR FÜR WÄRMEGEWÄLTZTE, GESCHMELZTE, GESCHLEIFENE STAEBE UND ATOMISIERTE PULVER).
 ALLE NORMEN IN DER LETZTEN REVISION.

{201} DATUM 28.02.2013 POLLASTRELLI ANDREA FC (AUSSTELLER) - ATTEST ELEKTRONISCH ERSTELLT

Abbildung 89: Prüfbericht der Charge 2 Teil 2

10.2 Härtemessung

10.2.1 Probe längs 20-08-3



Abbildung 90: Makroaufnahme der Probe längs 20-08-3

Tabelle 13: Härtewerte der Probe längs 20-08-1 in Abbildung 90

Messpunkte Links	Härte HV10	Messpunkte Mitte	Härte HV10	Messpunkte Rechts	Härte HV10
1	400	4	425	9	312
2	398	5	399	10	312
3	403	6	432	11	310
		7	403		
		8	407		

10.2.2 Probe quer 20-16-1

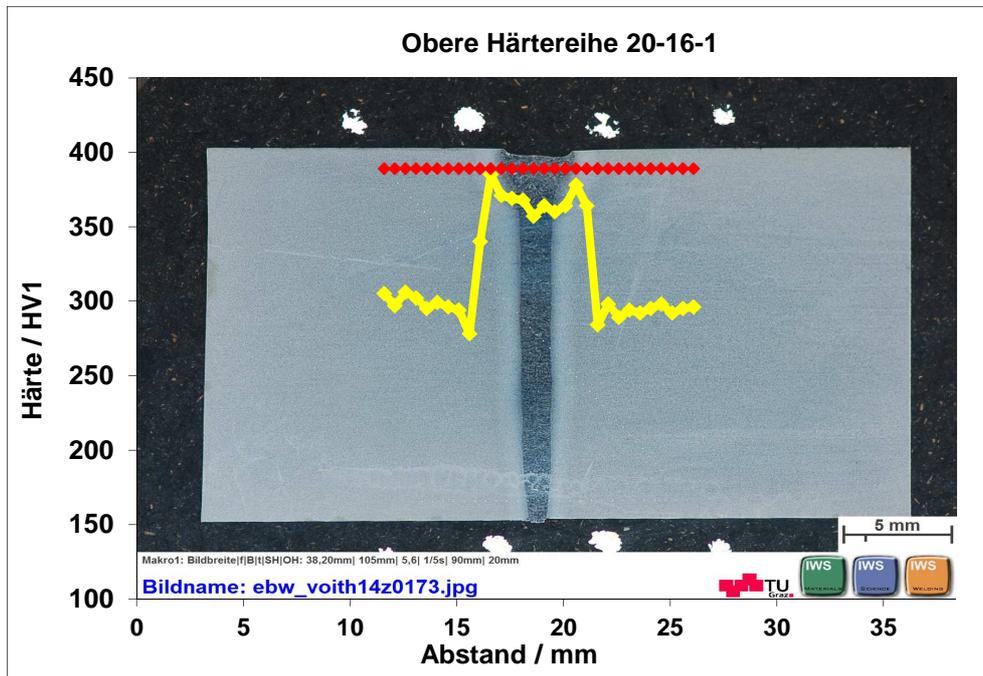


Abbildung 91: Härtelinie der Probe quer 20-16-1

10.2.3 Probe quer 20-63-1

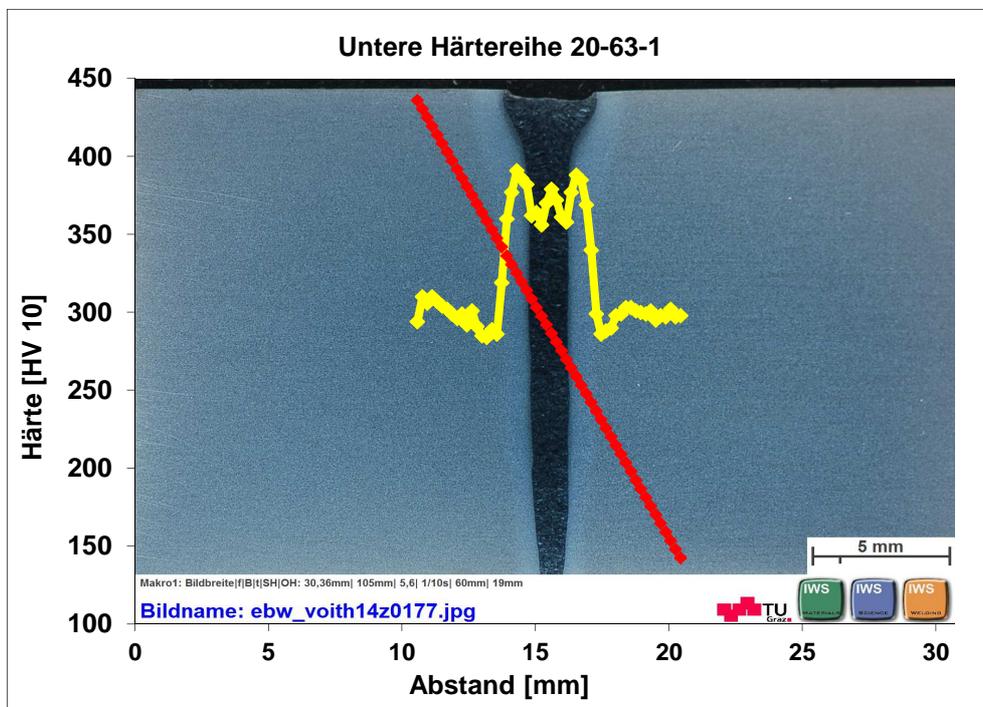


Abbildung 92: Härtelinie der Probe quer 20-63-1

10.2.4 Probe quer 20-125-1

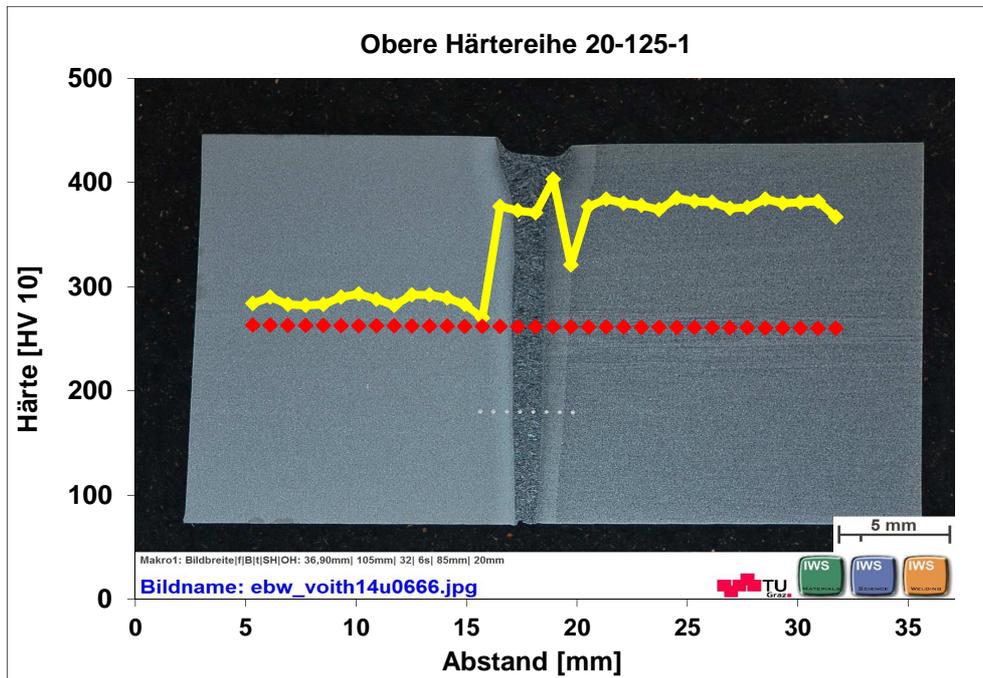


Abbildung 93: Härtelinie der Probe quer 20-125-1

10.2.5 Probe Quer mitte 100-26-1

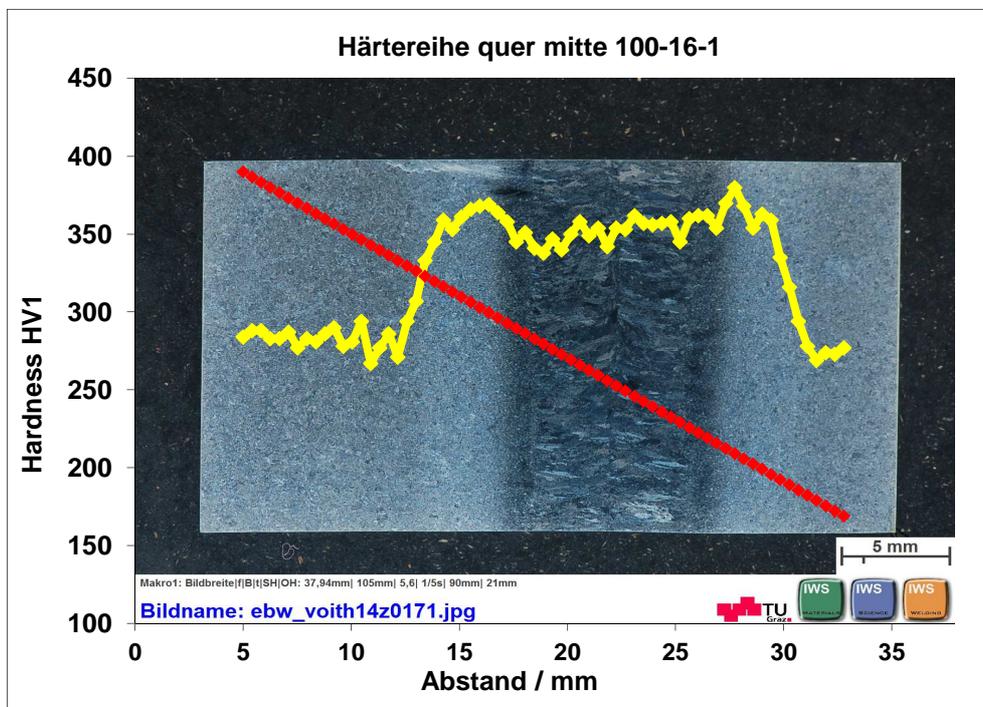


Abbildung 94: Härtelinie der Probe quer mitte 100-16-1

10.2.6 Probe quer unten 100-26-1

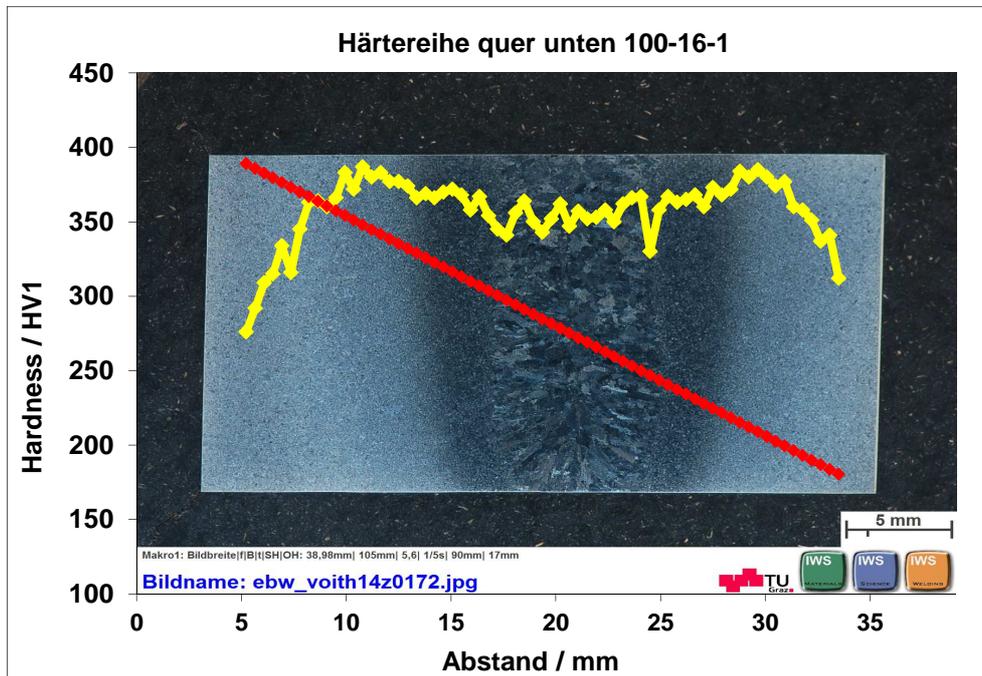


Abbildung 95: Härtelinie der Probe quer unten 100-16-1

10.3 Zugproben

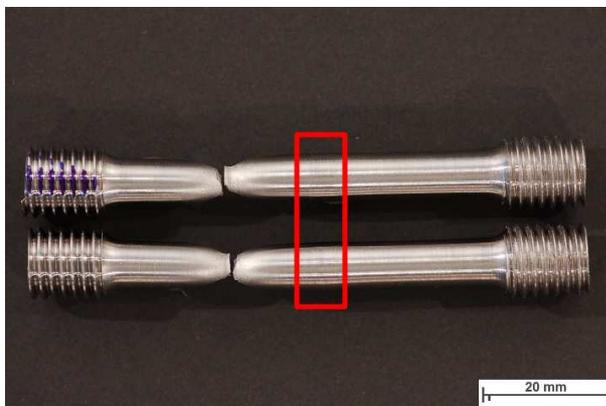


Abbildung 96: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-16-1

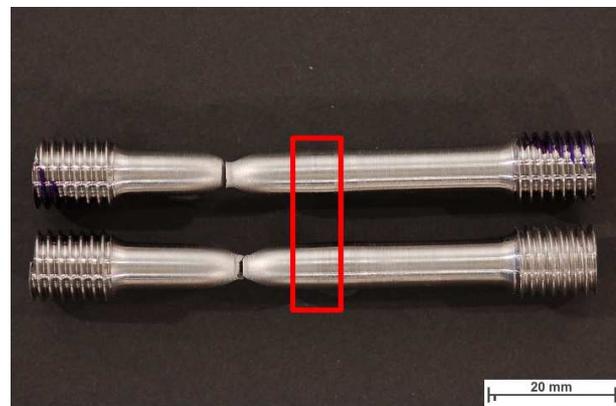
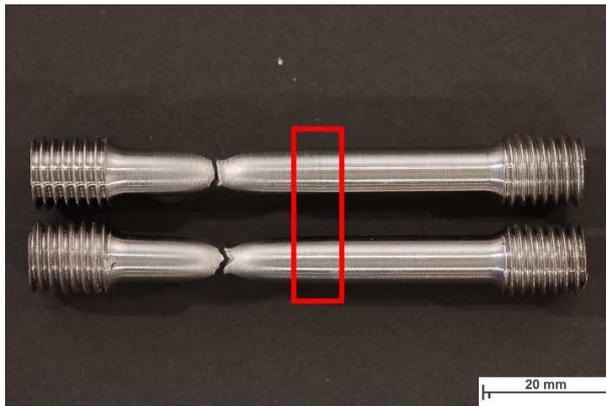


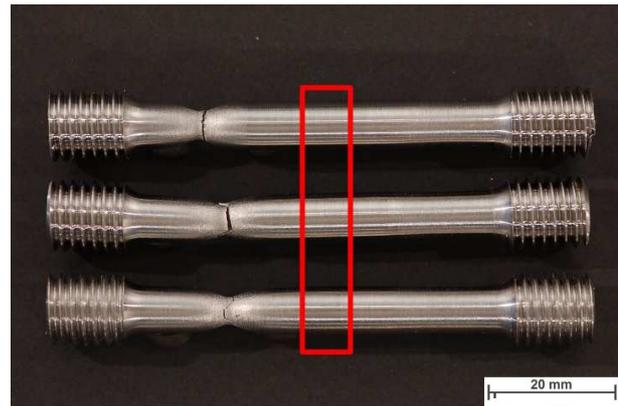
Abbildung 97: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-63-1



Makrot: Bildbreite|B|t|SH|Oh: 96,34mm|105mm| 3.3| 130s| 328mm| 12mm

Bildname: [ebw_voith14u0661.jpg](#)

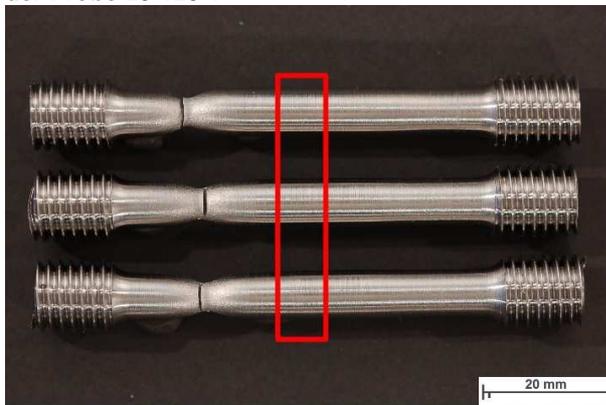
Abbildung 98: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 20-125-1



Makrot: Bildbreite|B|t|SH|Oh: 96,34mm|105mm| 3.3| 130s| 328mm| 12mm

Bildname: [ebw_voith14u0663.jpg](#)

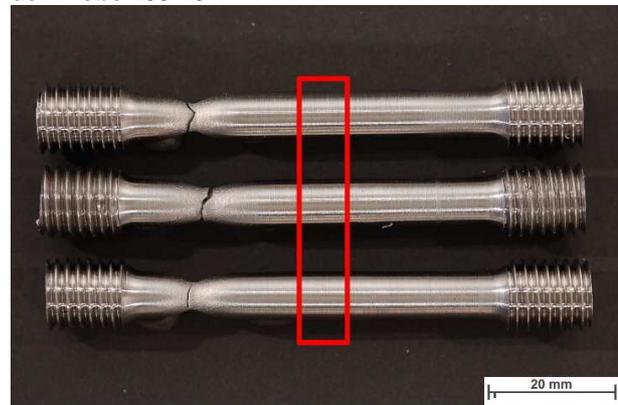
Abbildung 99: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-16-1



Makrot: Bildbreite|B|t|SH|Oh: 96,34mm|105mm| 3.3| 130s| 328mm| 12mm

Bildname: [ebw_voith14u0664.jpg](#)

Abbildung 100: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-63-1



Makrot: Bildbreite|B|t|SH|Oh: 96,34mm|105mm| 3.3| 130s| 328mm| 12mm

Bildname: [ebw_voith14u0665.jpg](#)

Abbildung 101: Zugproben nach dem Zugversuch der Probe 100-125-1