



Markus Neunteufel BSc

Werkstoffkundliche Charakterisierung des Stahles der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897 und schweißtechnische Versuche

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technische Universität Graz

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant

Beurteiler: Assoc. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Norbert Enzinger

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut of Materials Science, Joining and Forming

Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Christof Sommitsch

Graz, im April 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

(signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herr Dipl. Ing. Dr. techn. Rudolf Vallant und Herr Dipl. Ing. Felix Sadrawetz, die meine Masterarbeit betreut und begutachtet haben. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlichst bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinem Kommilitonen Martin Schwald bedanken, der mir mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite stand. Bedanken möchte ich mich für die zahlreichen interessanten Debatten und Ideen, die maßgeblich dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit in dieser Form vorliegt.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Lebensgefährtin Bettina Polgar, die mich während meines gesamten Studiums immer unterstützt hat und mir bei allen Sorgen stets zur Seite stand und all meine Stimmungen mit stoischer Geduld ertragen hat.

Weiters gilt mein Dank meinem Mitbewohner, treuen Freund und Bruder für die vielen ernsten und lustigen Diskussionen über Gott und die Welt die mich so oft den Alltags-trott vergessen ließen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Margot und Werner Neunteufel bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und bei meiner Tante Monika Neunteufel, deren guten Draht nach oben ich viele positive Erfolge zu verdanken habe.

Markus Neunteufel

Graz, 20.03.2018

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Möglichkeit von Reparaturschweißungen an Altstahlkonstruktionen untersucht. Im Speziellen wird hierfür der Stahl der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897 charakterisiert. Im Weiteren werden verschiedene Schweißversuche durchgeführt. Zur Charakterisierung des Stahls werden zunächst die mechanischen Eigenschaften ermittelt. Im Speziellen handelt es sich hier um die Streckgrenze, die Härte und die ertragbare Kerbschlagarbeit. In einem weiteren Schritt wird mittels ausgewählter Ätzverfahren die Makro- und Mikrostruktur des Stahles ermittelt. Im Besonderen wird die Dicke der Seigerungsfreien Zone (Speckschicht) ermittelt. Bei den verwendeten Ätzverfahren handelt es sich um den Baumannabdruck, Nital Ätzung, Klemm Ätzung und Heyn Ätzung. Die hieraus erhaltenen Ergebnisse werden mit einem modernen Baustahl verglichen. Anschließend werden Schweißvorversuche an einem modernen Baustahl mit verschiedenen Parameter setups durchgeführt. Auf Grundlage der ermittelten Speckschichtdicke werden die Parameter setups nach ihrer Einbrandtiefe bewertet und zu jedem der verwendeten Schweißungen ein Setup ausgewählt. Mit diesen Setupsätzen werden die Hauptschweißversuche am Altstahl durchgeführt. Die Ergebnisse werden nach der ÖNORM EN ISO 15613 bewertet. Zusätzlich zu den hier geforderten Tests wird noch eine Bruchprüfung nach ÖNORM EN ISO 9017 durchgeführt. Die daraus resultierenden Ergebnisse zeigen, dass eine Schweißung des Stahles der Linzer Eisenbahnbrücke sowohl mit dem Elektrodenhandverfahren mit basischer Elektrode als auch mit dem Metallaktivgasverfahren problemlos möglich ist, solange die Einbrandtiefe die Speckschicht nicht überragt.

Abstract

In this work, the possibility of repair welding on old steel structures was investigated. In particular, the steel of the “Linzer railway bridge of 1897” was characterized for this purpose and further various welding tests were carried out. To characterize the steel, the mechanical properties were first determined. In particular, these are the yield strength, the hardness and the sustainable impact energy. In a further step, the macro and microstructure of the steel was determined by means of selected etching processes. In particular, the thickness of the segregation free zone (Speckschicht) was determined. The etching methods used are the Baumann print, the Nital etching, the Klemm etching, and the Heyn etching. The results obtained were compared with a modern structural steel. Subsequently, preliminary welding tests were carried out on a modern structural steel with various parameter setups. On the basis of the determined segregation free zone thickness, the parameter setups were evaluated according to their penetration depth and a setup was selected for each of the welds used. This setup sets was used to perform the main welding tests on the old steel. The results were evaluated according to ÖNORM EN ISO 15613. In addition to the tests required here, a fracture test according to ÖNORM EN ISO 9017 was carried out. The resulting results show that welding of the steel of the “Linzer railway bridge of 1897” is possible without any problems with the electrode hand procedure with basic electrode and with the metal active gas procedure as long as the penetration depth does not exceed the segregation free zone.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	2
1.2	Zielsetzung.....	3
2	Historische Analyse.....	5
2.1	Die Linzer Eisenbahnbrücke	5
2.2	Stahlerzeugung im 19. Jahrhundert.....	8
2.2.1	Schweißeisen	11
2.2.2	Flussstahl.....	16
2.3	Desoxidation, Erstarrung und Vergussmethoden.....	31
2.3.1	Desoxidation	31
2.3.2	Erstarrungsverhalten.....	33
2.3.3	Vergussmethoden.....	38
2.4	LD Verfahren.....	39
3	Werkstoffkundliche Charakterisierung des Stahles	41
3.1	Probenentnahme und Probenaufbereitung	41
3.2	Charakterisierung der Mikro- und Makrostruktur.....	44
3.2.1	Methoden zur Darstellung der Mikro- und Makrostruktur.....	45
3.2.2	Einfluss von Legierungselementen auf die Eigenschaften des Stahls ..	51
3.2.3	Ergebnisse und Diskussion.....	56
3.2.4	Zusammenfassung	66
3.3	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	67
3.3.1	Methoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	67
3.3.2	Ergebnisse und Diskussion.....	72
3.3.3	Zusammenfassung	80
4	Schweißtechnische Versuche	82
4.1	Verwendetes Schweißgerät	82
4.2	Schweißtechnische Grundlagen	85
4.2.1	Schweißbarkeit	85

4.2.2	Verwendete Schweißverfahren und Zusätze	91
4.3	Vorversuche.....	98
4.3.1	Aufbau der Versuche	98
4.3.2	Auswertung und Diskussion.....	102
4.4	Hauptversuche.....	109
4.4.1	Aufbau der Versuche	109
4.4.2	Ergebnisse und Diskussion.....	110
5	Zusammenfassung.....	121
6	Ausblick.....	123
7	Literaturverzeichnis	124
8	Abbildungsverzeichnis	129
9	Tabellenverzeichnis	137
10	Abkürzungsverzeichnis	139
Anhang A: Probenentnahme		I
Anhang B: Speckschichtdickenstudie.....		II
Anhang C: EDX Analysen		IV
Anhang D: Kerbschlagbiegeversuch		VI
Anhang E: Schweißpläne		IX
Anhang F: Auswertung der Vorversuche.....		XXIX
Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung		XXXVII
Anhang H: Auswertung Einbrandtiefe Hauptversuche		XLIV
Anhang I: Ergebnisse Bruchprüfung nach EN ISO 9017		LI

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für beiderlei Geschlecht.

1 Einleitung

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts industrialisierte sich, neben vielen anderen Bereichen der Technik, auch die Stahlerzeugung. Es wurden neue Verfahren zur Erzeugung von Stählen entwickelt, durch die Stahl nun in großen Mengen zur Verfügung stand. Zu diesen Verfahren zählten allen voran das Siemens-Martin Verfahren und das Thomas-Gilchrist Verfahren. Wie in vielen anderen Bereichen auch, wurde die Ressource Stahl, die nun in großen Mengen zur Verfügung stand, zur Errichtung von Brücken und Monumentalbauten genutzt.

Da auch heute noch ein großer Bestand an Altstahlkonstruktion in Deutschland, Österreich und der Schweiz (DACH) besteht, die oft aus wirtschaftlichen Gründen bzw. aus Gründen des Denkmalschutzes erhalten werden müssen, wird es umso wichtiger, adäquate Verfahren und Prozesse zu entwickeln, mit denen jene Konstruktionen bestmöglich gewartet und erhalten werden können. Zum einen, ist die Bewahrung von denkmalgeschützten Monumentalbauten ein wichtiger Faktor, hier spielt vor allem das äußere Erscheinungsbild eine entscheidende Rolle. Zum anderen, ist der Erhalt von Brücken und Stegen oft die wirtschaftlich bessere Lösung als der Neubau. Um dies bewerkstelligen zu können, müssen historische Verfahren, wie das Heißnieten, kostspielig zugekauft werden. Werden jedoch statische Schwachstellen durch korrosive Einflüsse oder Materialalterung identifiziert, besteht meist nur die Möglichkeit einer Verstärkung an den gefährdeten Stellen. Dies muss bis dato aufwändig und kostspielig mit Nieten oder Niet-Ersätzen bewerkstellt werden. Abbildung 1-1 zeigt drei Altstahlkonstruktionen aus Österreich, Deutschland und der Schweiz.

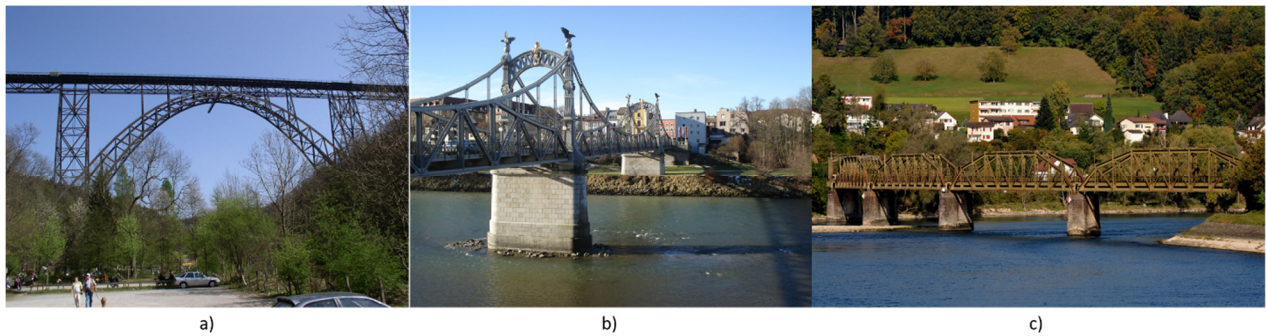


Abbildung 1-1: a) Münstener Brücke bei Solingen um 1894 (D)¹; Salzachbrücke bei Laufen / Oberndorf bei Salzburg (A) um 1901²; c) Aarebrücke bei Koblenz (CH) um 1892³

Aus diesem Grund wird es immer wichtiger, die vorhandenen formschlüssigen Verbindungen durch geeignete stoffschlüssige Verfahren zu ersetzen, mit denen die vorhandenen Bauelemente ergänzt oder verstärkt werden können. Besonders bei Bauwerken wie Brücken für den Straßen oder Zugverkehr ist dies besonders von Bedeutung, da diese durch ihre dynamische Belastung in einem hohen Maße auf Ermüdung beansprucht werden.

Da das Schweißen im Stahlbau das am weitest verbreitete stoffschlüssige Fügeverfahren ist, ist hierauf ein besonderes Augenmerk zu legen. Es ist jedoch wichtig, gerade bei den verwendeten Schmelzschweißverfahren, ein besonderes Augenmerk auf die metallurgischen Besonderheiten von den vorhandenen Altstählen zu werfen. Aus diesen Besonderheiten geht hervor, dass bis dato diese Verfahren nur sehr selten zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund ist aus wirtschaftlicher Sicht ein besonderes Augenmerk auf das Finden von geeigneten Schweißverfahren zu legen.

1.1 Motivation

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der metallographischen Untersuchung des Stahles der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897 und der Durchführung schweißtechnischer Versuche auf dem Stahl dieser Brücke. Die Brücke wurde im Juni 2016 abgetragen, wodurch Probenmaterialien des Stahles dieser Brücke zur Verfügung stehen. Abbildung 1-2 zeigt die Abrissarbeiten jener Brücke. An dieser Stelle möchte ich der Linz AG und Herrn DI Felix

¹ (https://de.wikipedia.org/wiki/M%C3%BCngstener_Br%C3%BCcke)

² (<http://mein.salzburg.com/fotoblog/heimat/2010/12/salzachbruecke.html>)

³ (https://de.wikipedia.org/wiki/SBB_Aarebr%C3%BCcke_Koblenz)

Sadrawetz dafür danken, dass sie das Material für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt haben.



Abbildung 1-2: Abriss der Linzer Eisenbahnbrücke über die Donau, Juni 2016

Durch Atomemissionsspektroskopie erhält man die genaue Zusammensetzung des Stahles, welcher mit modernen Baustählen verglichen wird. Des weiteren werden Baumannabdrücke und Schliffe angefertigt um die Verteilung der Makroseigerungen zu detektieren. Mittels Zugversuche, Biegeversuche und Kerbschlagbiegeversuche werden die mechanischen Gütewerte des Stahles ermittelt und mit modernen Stählen verglichen.

Diese Werte dienen als Grundlage für die schweißtechnischen Versuche bei denen besonders darauf geachtet werden muss, dass der Einbrand möglichst gering gehalten wird. Die Wahl der geeigneten Schweißverfahren, sowie der möglichen Schweißzusätze stellen eine besondere Herausforderung dar.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Masterarbeit ist ein Schweißverfahren zu finden und zu definieren mit dem Stähle aus dem 19. Jahrhundert und dem frühen 20. Jahrhundert geschweißt werden können. Die Instandhaltung und die Anbringung von möglichen Erweiterungsbauten soll somit erleichtert werden.

Die folgenden Aktivitäten sind in dieser Masterarbeit zu berücksichtigen:

- Einarbeitung in das Thema Brückenbau im 19. Jahrhundert
- Einarbeitung in das Thema Stahlherstellung im 19. Jahrhundert

- Metallographische Untersuchung des Stahles der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897
- Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Stahles der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897
- Durchführung von Schweißversuchen
- Erarbeiten eines Schweißplanes für die Anwendungen auf Baustellen

2 Historische Analyse

Das nachfolgende Kapitel beschäftigt sich mit der Errichtung der Linzer Eisenbahnbrücke und mit dem Prozess der Stahlherstellung im 19. Jahrhundert. Hier wird vor allem auf die metallurgischen Charakteristika der jeweils verwendeten Herstellungsverfahren eingegangen. In einem weiteren Schritt werden die zur damaligen Zeit üblichen Vergussverfahren erörtert.

2.1 Die Linzer Eisenbahnbrücke

Durch den gesetzlich geförderten Bau von Lokalbahnen, der 1880 in Kraft getreten ist, wurde auch in Oberösterreich die Erschließung von ländlichen Gebieten forciert. Somit entstand 1888 die „Mühlkreisbahn“, welche Urfahr mit Aigen-Schlägl im oberen Mühlviertel verbindet. Da die „Mühlkreisbahn“ jedoch zunächst am Bahnhof Urfahr endete, wurde 1889 durch das österreichisch-ungarische Parlament eine Vorlage zu einem Lokalbahnprojekt eingebracht. Dieses hatte den Zweck, die „Mühlkreisbahn“ mit der „Kaiserin-Elisabeth-Bahn“, der späteren „Westbahn“, zu verbinden.⁴

Da die 1872 fertiggestellte Reichstraßenbrücke durch den immer mehr werdenden Verkehr zwischen Linz und Urfahr stark ausgelastet war, warb die Stadtgemeinde Linz für eine Lösung, die den Bau einer Lokalbahn zum Ziel hatte. Diese sollte den Bahnhof Urfahr mit dem Staatsbahnhof Linz verbinden. Dafür war jedoch der Bau einer weiteren Donaubrücke notwendig. Um die Entlastung der Reichsstraßenbrücke gewährleisten zu können, sollte diese neue Brücke sowohl für den Wagenverkehr als auch für den Bahnverkehr zugelassen werden. Als Überquerungsort über die Donau war der Nahbereich der Stadt Linz geplant. Im Juni 1892 wurde die Planung für eine kombinierte Straßen- und Eisenbahnbrücke beschlossen. Ein erstes Projekt wurde von der Wiener Bauunternehmung E. Gaertner Anfang Oktober 1894 vorgelegt. Im April 1896 wurde das Projekt von E. Gaertner genehmigt und beschlossen. Weiters wurde bewilligt, dass es sich um eine Brücke mit gemeinschaftlicher Fahrbahn für den Straßen- und Eisenbahnverkehr handeln soll. Dies wurde dadurch begründet, dass dies für die Verkehrsbedürfnisse der nächsten zwanzig Jahre genügen sollte. Nach den Verhandlungen der Interessenvertreter mit den Geldgebern erfolgte im Juni 1897 die Beauftragung des Bauunternehmens E.

⁴ Streitt, et al., 2016 S. 23

Gaertner mit den Fundierungsarbeiten sowie der Errichtung der Pfeiler und der Widerlager.⁵

Beim Bau von Eisenbahnbrücken benötigte man spezielle Verfahren zur Gründung. Im speziellen Fall der Linzer Eisenbahnbrücke wurde die pneumatische Fundierung durchgeführt, da diese vom ausführenden Bauunternehmen bereits häufig angewendet wurde. Der Bau der Pfeiler wurde am rechten Ufer, dem Linzer Ufer, begonnen. Hier wurde auch ein Schleppgleis eingerichtet. Während des gesamten Bauverlaufs gab es viele Rückschritte die durch Hochwasser und einen Nationalitätenkonflikt bedingt waren.⁶

Im September 1898 erfolgte die Ausschreibung der Tragwerkskonstruktion, wobei die jeweiligen Billigstbieter die Zuschläge erhielten. Tabelle 2-1 zeigt eine Auflistung der Bauunternehmen und ihre jeweiligen Teilprojekte.⁷

Tabelle 2-1: Beteiligte Bauunternehmen und Teilprojekte

Bauunternehmen	Teilprojekt
Anton Biro	Vier Tragwerke über die Inundations-Öffnungen Einbau der Fahrbahnen samt Gehstege
Maschinenfabriken und Constructions-Werkstätten der Österreichischen-Alpine Montangesellschaften	Tragwerke der rechten und mittleren Strombrücke
Prager Brückenbauanstalt der ersten Böhmischemährischen Maschinenfabrik	Tragwerk über die linke Stromöffnung

Wie aus Tabelle 2-1 ersichtlich ist, waren somit die bedeutendsten Bauunternehmungen der Habsburger Monarchie beim Bau der Linzer Eisenbahnbrücke beteiligt.⁸

Als Baumaterial für die Tragwerkskonstruktion war das Siemens Martin Flusseisen vorgeschrieben, der Brückenbelag wurde aus Zoreisen ausgeführt. Aufgrund einer Verordnung von 1892 war vorerst nur basisches Siemens Martin Flusseisen zugelassen, erst 1904 wurde nach einer Reihe von Versuchen auch Thomas Flusseisen zugelassen.

⁵ (Streitt, et al., 2016 S. 26)

⁶ (Streitt, et al., 2016 S. 27)

⁷ (Streitt, et al., 2016 S. 31)

⁸ (Streitt, et al., 2016 S. 31)

Bei der Herstellung von Profilen gab es gegen Ende des 19. Jahrhunderts bereits Bestrebungen zur Normierung. Dies wurde aufgrund der zunehmenden Massenproduktion von T- und Doppel-T-Profilen zwingend nötig. Durch die Beschränkung auf sogenannte Normalprofile, welche in Ihrer Qualität und den verwendeten Materialien beschränkt waren, war es nun erstmals möglich, Baukonstruktionen unabhängig vom Produzenten zu berechnen und zu entwerfen. Die Verbindung der einzelnen Konstruktionselemente erfolgte, wie zu dieser Zeit üblich, mittels Heißnieten. Der Niet war ein Bolzen aus Metall, welcher aus einem Setzkopf und einem Schließkopf bestand. Die Verbindung entstand durch die Stauchung und die Deformation des Bolzenschaftes.⁹

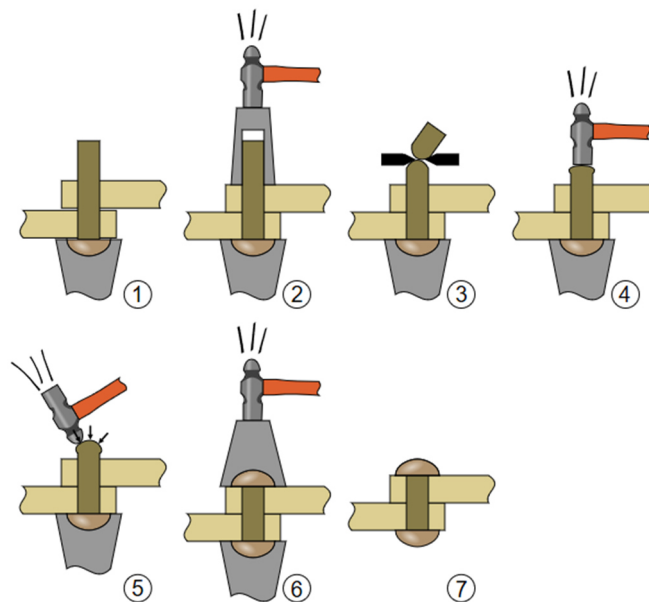


Abbildung 2-1: Herstellverfahren einer Heißnietverbindung¹⁰

Abbildung 2-1 zeigt eine Darstellung des Ablaufes des Heißnietverfahrens. Wie zu erkennen ist, wird zunächst der Bolzen durch die vorgearbeiteten Löcher der zu verbindenden Platten gesteckt. Liegt der Setzkopf bündig auf, wird mit einem Hammer der Schließkopf geformt und somit die Verbindung hergestellt.¹¹

Weiterführend sei zu diesem Thema folgende Veröffentlichung erwähnt.¹²

⁹ (Streitt, et al., 2016 S. 33)

¹⁰ <https://de.wikipedia.org/wiki/Nietvorgang>

¹¹ (Streitt, et al., 2016 S. 34)

¹² (Collette, et al., 2013)

Bei der Bauform von Eisenbahnbrücken unterscheidet man zwischen Hängebrücken, Bogenbrücken und Balkenbrücken. Weiters wird nach der Ausführung der Hauptträger unterschieden. Dieser kann als Vollwandträger, als Gitterträger oder als Fachwerkträger ausgeführt sein. Bei der Linzer Eisenbahnbrücke handelt es sich um eine Fachwerk-Balkenbrücke. Diese Art der Brücken zählen zu den ältesten Brückenkonstruktionen und auch zu denen, die den größten Formenreichtum aufweisen.¹³

Am 14. November 1900 konnte schließlich die Brücke dem öffentlichen Verkehr übergeben werden. Vor dem Abbruch der Brücke, im Juni 2016, war diese die letzte historische Eisenbahnbrücke über die Donau, die noch ihre originale Bausubstanz hatte. Außerdem war die Linzer Eisenbahnbrücke die einzige Brücke in Österreich, die eine Straßenfahrbahn mit einem mittig innenliegenden Gleis besaß.¹⁴

Für genauere Informationen sei an dieser Stelle auf das Buch „Linzer Eisenbahnbrücke, von Ute Streitt, et. al.“ verwiesen.

2.2 Stahlerzeugung im 19. Jahrhundert

Im Allgemeinen erfolgt die Herstellung des Stahls durch Entfernen bzw. Vermindern der Begleitelemente des Roheisens. Typische Elemente die sich im Roheisen befinden können sind Silizium, Mangan, Phosphor, Schwefel, usw.. Als wichtigstes zu vermindertes Element gilt jedoch der Kohlenstoff. Diese Elemente werden durch Oxidation unter Verwendung des Sauerstoffes in der Luft, oder jenen Sauerstoff der in den Erzen gebunden ist, entfernt. Die oxidierten Elemente können somit teilweise gasförmig entweichen oder es bilden sich feste Verbindungen, welche mit den dazugegebenen Zuschlägen eine Schlacke bilden. Diese Schlacke sammelt sich im flüssigen Zustand über dem Metallbad. Dieser Prozess wird Frischen genannt.¹⁵

Wird bei der Erzeugung des Stahls die Schmelztemperatur nicht überschritten, ergeben sich im festen Zustand kleine Kristalle, welche zu Klumpen zusammengeschweißt werden müssen. Das Ergebnis dieses Vorganges wird Puddelstahl oder Schweißisen genannt. Wird jedoch die Schmelztemperatur bei der Herstellung überschritten, so nennt man das Produkt Flusstahl.¹⁶

Aufgrund der fortlaufenden Industrialisierung im 18. und 19. Jahrhundert, stieg der Bedarf an Stahlerzeugnissen sehr stark an. Diesem Umstand geschuldet entwickelten sich in

¹³ (Streitt, et al., 2016 S. 41)

¹⁴ (Streitt, et al., 2016 S. 7)

¹⁵ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 93)

¹⁶ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 93)

dieser Zeit viele Verfahren mit denen qualitativ hochwertiger Stahl (für die damalige Zeit) in großen Mengen herstellbar war. Nachfolgend folgt eine Aufstellung und Beschreibung der wichtigsten Verfahren zur Stahlerzeugung.

Abbildung 2-2 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen Stahlherstellungsverfahren. Es ist zu erkennen, dass die Entwicklung des Flusstahls auf die des Schweißeisens folgte. Weiters ist zu erkennen, dass die Entwicklung der Stahlerzeugung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts sehr stark forciert wurde.^{17,18}

¹⁷ (Hosford, 2012 S. 13)

¹⁸ (Lüddecke, 2006 S. 8)

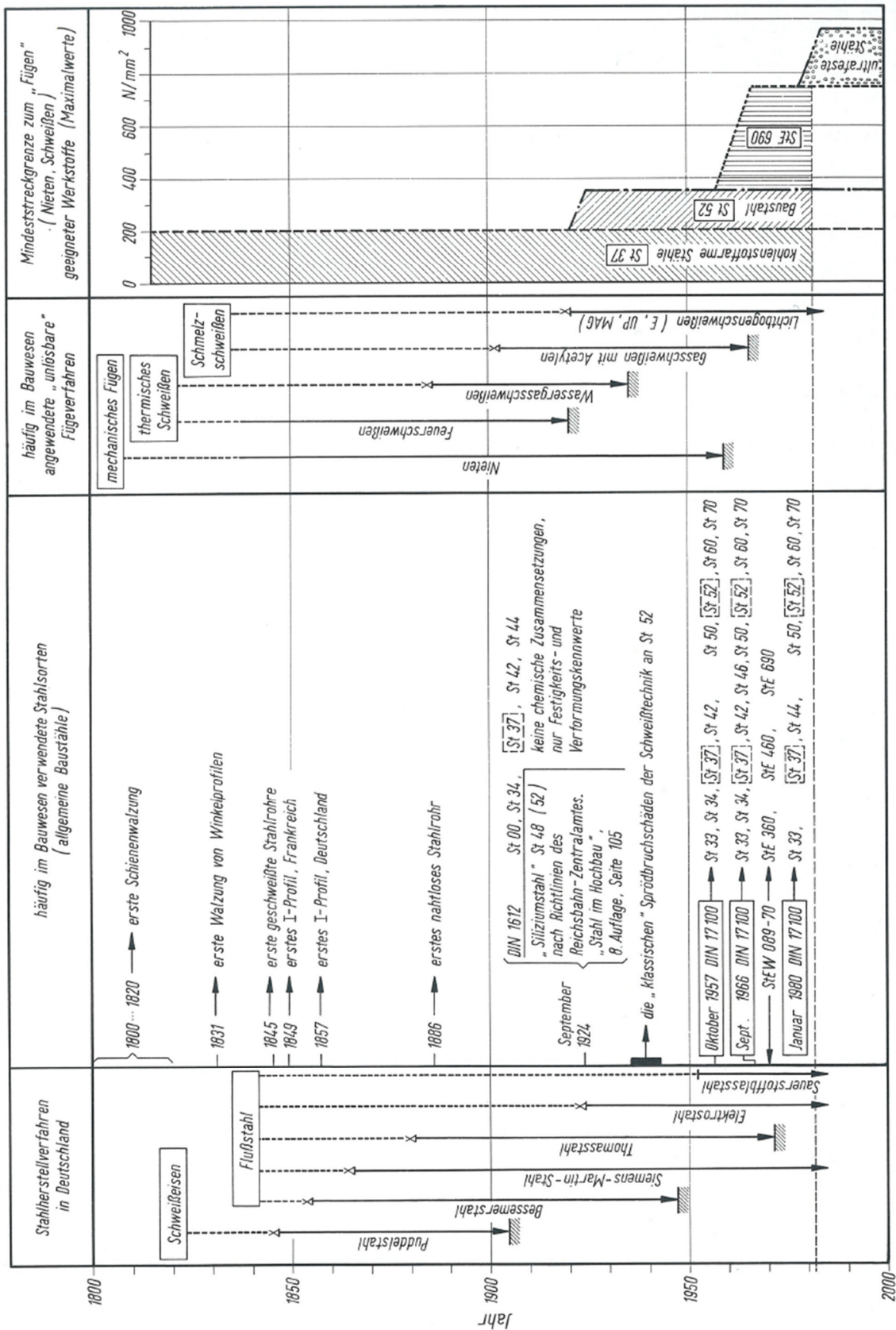


Abbildung 2-2: Darstellung der Stahlerstellverfahren, Fügmethoden, Stahlsorten und Mindeststreckgrenzen über die Jahreszahl¹⁹

2.2.1 Schweiß Eisen

Aufgrund des immer größer werdenden Mangels an Holzkohle, die für das Herdfrischen benötigt wurde, wurde 1784 das Flammofenfrischen oder Puddeln entwickelt. Bei diesem Verfahren konnte die Holzkohle durch Steinkohle ersetzt werden. Der Terminus „Puddeln“, leitet sich vom englischen Wort „to puddle“ ab, was umrühren bedeutet. Bei diesem Verfahren kommt nur die Flamme des Brennstoffes mit dem zu verarbeitenden Eisen in Berührung und nicht, wie früher, der Brennstoff selbst.²⁰

Abbildung 2-3 zeigt die Darstellung eines Puddelofens.

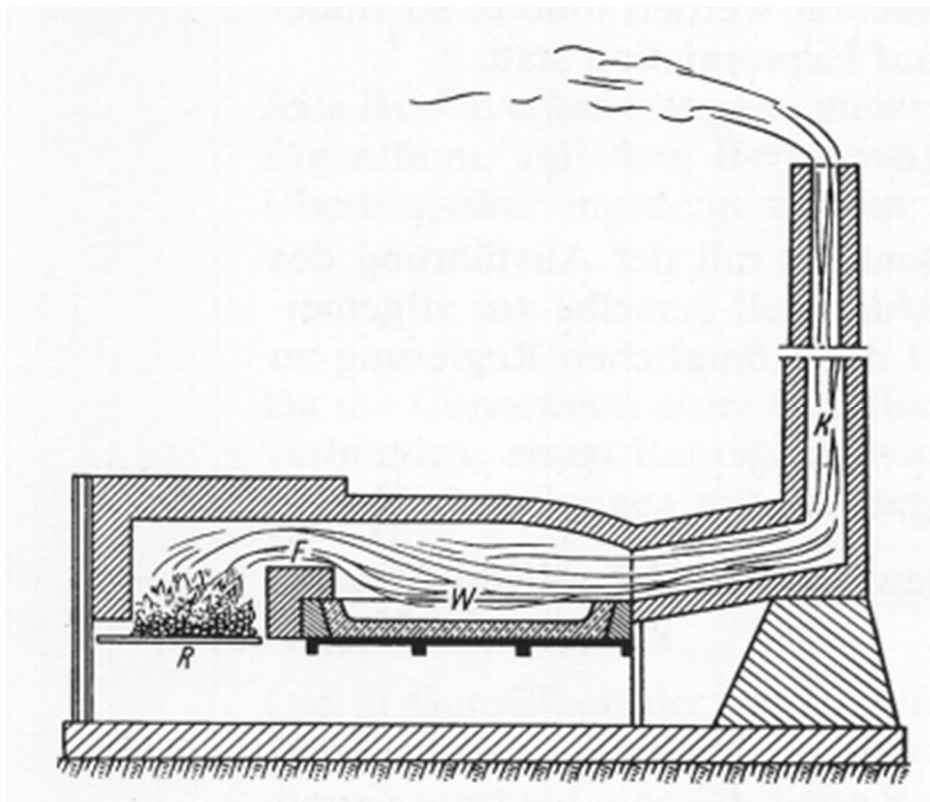


Abbildung 2-3: Darstellung eines Puddelofens²¹

Der Puddelofen besteht aus drei Hauptbestandteilen: der Rostfeuerung (R), dem Arbeitsherd (W) und dem Fuchs oder Kamin (K). Der Aufbau des Arbeitsherds ähnelt einer Pfanne die eine Breite von etwa 1,7 m und eine Länge von etwa 2 m besitzt. Diese besteht aus einer dicken Sohlplatte aus Eisen und einem hohlen Rahmen aus Gusseisen,

¹⁹ (Mang, et al., 1985 S. 11)

²⁰ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 94)

²¹ (<http://genlex.de/schlagwort/puddelofen/>, 2015)

welcher auf der Sohlplatte liegt. Dieser Rahmen wird als Herdeisen bezeichnet und wird zur Kühlung ständig mit kaltem Wasser durchflossen. Der Herdraum wird mit Schlacke ausgekleidet, die zu einem großen Teil aus Magnetit besteht. Diese Schlacke ist ein Nebenprodukt des Puddelverfahrens und wird wegen ihres sehr hohen Schmelzpunktes eingesetzt.²²

Der Fuchs fungiert als Abzugskanal. Durch ihn können die Verbrennungsgase Richtung Kamin abziehen. Die Restwärme, die sich in den Abgasen befindet, wurde häufig zur Beheizung von Dampfkesseln genutzt. Zwischen der Feuerung und dem Arbeitsherd befindet sich eine Mauer die aus feuerfesten Steinen besteht. Diese wird Feuerbrücke genannt. Auch zwischen Arbeitsherd und Fuchs ist eine Mauer angebracht, diese nennt man Fuchsbrücke. Der gesamte Bereich des Herdes wird mit einem Gewölbe überspannt. Dieses fällt in Richtung des Fuchses ab. Im vorderen Bereich der Rostfeuerung befindet sich eine Öffnung durch die das Feuer versorgt werden kann. Diese Öffnung wird als Schüröffnung bezeichnet. Im Bereich des Arbeitsherdes befindet sich die Einsatztür. Durch diese Tür wird der Herd befüllt und entleert. Über eine Öffnung in der Decke des Arbeitsraumes kann der Arbeiter, genannt Puddler, die Rührstange einbringen, welche zum Durchmischen des Stahles benötigt wird.^{23,24}

Der Ofen wird auf helle Glühhitze erwärmt und mit ca. 300 kg Roheisen beschickt. Das eingebrachte Rohmaterial wird unter starker Befuerung geschmolzen. Bereits zu diesem Zeitpunkt wirkt das Rauchgas, welches reich an Kohlendioxid und Luftsauerstoff ist, stark oxidierend und verbrennt zunächst das im Roheisen enthaltene Silizium. Durch diesen Vorgang bildet sich jedoch sofort eine Schlackenschicht über dem Eisen, die das Roheisen zur Gänze bedeckt und wodurch keine Reaktion mehr stattfinden kann. Deswegen muss der Puddler ständig die Masse mit einem Haken durchmischen, wodurch das Eisen wieder in Kontakt mit den oxidierenden Rauchgasen und der Schlacke kommen kann. Die Schlacke selbst wirkt ebenfalls oxidierend auf das Eisen. Neben dem Silizium wird auch Mangan und Eisen oxidiert. Als letzter Bestandteil oxidiert der Kohlenstoff.



Formel (1) zeigt die chemische Reaktion der Entkohlung von Eisen-Kohlenstoffverbindungen durch die Zugabe von Sauerstoff.

²² (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 94)

²³ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 95)

²⁴ (Helmerich, 2005 S. 16)

Die Oxidation des Kohlenstoffes ist an Blasen aus Kohlenmonoxid zu erkennen die aus der Schlacke aufsteigen und mit einer blauen Flamme verbrennen. Durch die immer stärker werdende Gasentwicklung beginnt das Bad zu kochen, wodurch sich der Herd bis zum Rand mit der Schmelze füllt und die Schlacke durch die Arbeitstür abfließen kann. Durch die fortschreitende Entkohlung wird das Schmelzbad immer zähflüssiger, bis die Schmelztemperatur jene im Ofen herrschende Temperatur überschreitet. Daraus ergibt sich, dass sich einzelne Eisenkristalle abscheiden. Diese heben sich als glänzende Punkte von der Schlacke ab. Die Eisenkristalle vermehren sich sehr schnell und verbinden sich zu Klumpen. Durch diesen Prozess wird das Roheisen schrittweise zu Stahl verwandelt, dieser ist jedoch sehr ungleichmäßig entkohlt. Durch das mehrmalige Verühren und Übereinanderhäufen der Klumpen gelingt es dem Puddler einen gleichmäßigen Kohlenstoffgehalt im Stahl einzustellen.^{25,26,27}

Abbildung 2-4 zeigt eine Darstellung des Eisen-Kohlenstoffdiagramms in dem das Ansteigen der Schmelztemperatur mit fallendem Kohlenstoffgehalt dargestellt wird. Der Pfeil zeigt hierbei die Richtung, in die der Prozess stattfindet.

²⁵ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 95)

²⁶ (Aichele, et al., 2015 S. 286)

²⁷ (Lüddecke, 2006 S. 7)

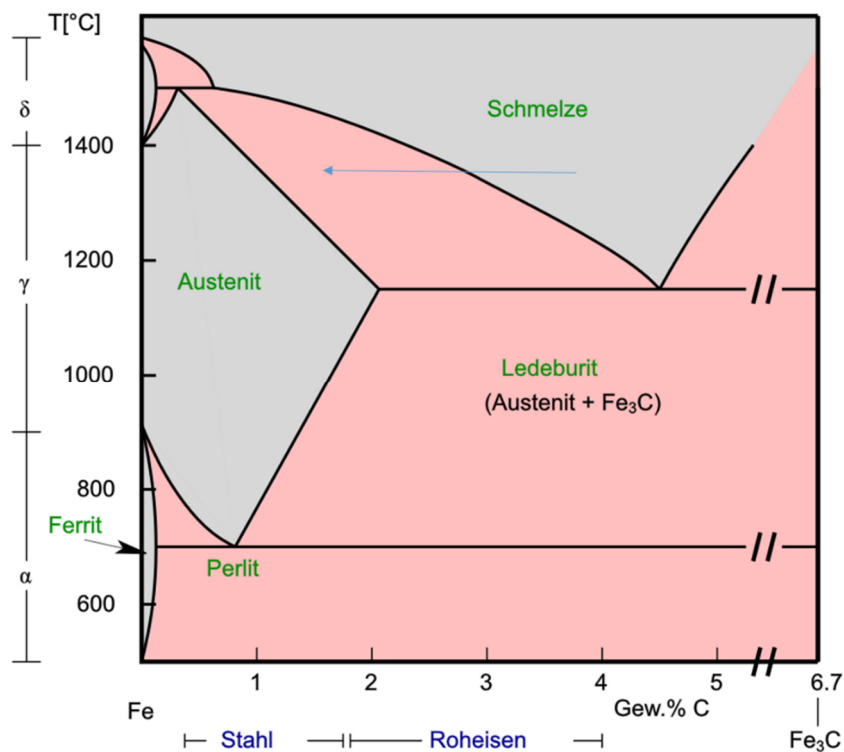


Abbildung 2-4: Darstellung der Entkohlung im Eisen-Kohlenstoffdiagramm²⁸

Der schließlich erhaltene Luppen wird im Folgenden in vier bis sechs Teile zerteilt und über die Einsatztür aus dem Ofen entnommen. Im Weiteren werden diese Luppen mittels eines Dampfhammers zusammengeschweißt. Hier wird durch das Hämmern auch die Schlacke ausgetrieben. In weiteren Schritten kommen die Luppen in das Walzwerk und werden zu den verschiedenen Halbzeugen gewalzt.²⁹

Der im Puddelofen entstehende Abbrand beträgt, je nach Zusammensetzung des Roheisens, zwischen 6% und 15%. Der Brennstoffaufwand für die Erzeugung eines Luppens mit einem Gewicht von einer Tonne, beträgt im Durchschnitt zwischen 750 kg und 1600 kg. Der Durchsatz eines Puddelofens beträgt täglich je nach erhaltenem Stahl zwischen 1800 kg und 4600 kg. Die Schlacke, welche während des Puddelprozesses entsteht, setzt sich aus ca. 55 % Eisen, 10 % Kieselsäure, 0,5 % Mangan und 1 % bis 4 % Phosphor und anderen Bestandteilen zusammen. Somit kann die Schlacke wieder im Hochofen verhüttet werden.³⁰

²⁸ (http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_feconi_gruppe.html)

²⁹ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 95)

³⁰ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 95)

Um den Durchsatz zu erhöhen wurden Puddelöfen entwickelt bei denen Doppelt- oder Vierfachherde zur Anwendung kommen. Hier können somit zwei bis vier Puddler gleichzeitig arbeiten. Weiters kommt eine Befeuernng mittels Gas zum Einsatz, wodurch der Brennstoffverbrauch pro einer Tonne Luppen auf 450 kg reduziert werden kann.³¹

Abbildung 2-5 zeigt ein typisches Gefüge eines Puddelstahls. Es ist zu erkennen, dass sich lamellenartige Schlackeneinschlüsse im Inneren des Gefüges befinden. Diese werden durch das Verschweißen der Luppen eingebracht und sind meist in Längsrichtung vorzufinden. Durch diesen Umstand ergibt sich eine sehr starke Anisotropie. Durch das stark lamellenartige Gefüge und die vielen Schlackeneinschlüsse gilt der Puddelstahl im Allgemeinen als nicht schweißbar.^{32,33,34,35}



Abbildung 2-5: Schweißisen aus einer Brücke von 1890³⁶

In Tabelle 2-2 ist die statistische Zusammensetzung des Schweißeisens angegeben. Wobei n die Stichprobenzahl, m das arithmetische Mittel, s die Standardabweichung und v den Variationskoeffizient angibt. Wie man erkennen kann, hat Puddelstahl einen eher niedrigen Kohlenstoffgehalt, wobei jedoch die Konzentrationen an Schwefel, Phosphor und Stickstoff, die eines modernen Baustahls um ein Vielfaches überschreiten.³⁷

³¹ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 96)

³² (Aichele, et al., 2015 S. 286)

³³ (Helmerich, 2005)

³⁴ (Lüddecke, 2006 S. 59)

³⁵ (Roller, et al., 2015 S. 19)

³⁶ (Helmerich, 2005 S. 35)

³⁷ (Lüddecke, 2006 S. 24)

Tabelle 2-2: Statistische chemische Zusammensetzung von Puddelstahl³⁸

Statistische Kennwerte	Kohlenstoff C in Gew.-%	Silizium Si in Gew.-%	Phosphor P in Gew.-%	Schwefel S in Gew.-%	Stickstoff N in Gew.-%
n [-]	102	102	102	102	102
m	0,025	0,147	0,396	0,061	0,009
s	0,022	0,048	0,113	0,036	0,007
v in %	88,0	32,6	28,5	59,0	77,7
Minimum	0,001	0,120	0,179	0,023	0,001
Maximum	0,091	2,830	0,650	0,135	0,026

2.2.2 Flussstahl

Wie bereits oben erwähnt, wird bei der Herstellung des Flussstahles die Schmelztemperatur überschritten. Im Allgemeinen wird bei der Erzeugung von Flussstahl der Kohlenstoff im Roheisen oxidiert wodurch ein Eisen hergestellt wird, das nur noch geringe Mengen an Kohlenstoff enthält. Dieses kohlenstoffarme Eisen wird „Stahl“ genannt. Der Kohlenstoffgehalt, welcher für das Erzeugnis benötigt wird, wird meist nachträglich zugesetzt.³⁹

Die wichtigsten Vertreter dieses Verfahrens sind das Bessemer Verfahren und dessen Weiterentwicklung, das Thomas Verfahren, sowie das Siemens- Martin Verfahren. Diese sollen nun im Folgenden beschrieben werden.

Der Vorteil dieser Verfahren gegenüber dem Puddelverfahren, ist die größere Ausbringung und die homogenere Zusammensetzung des Stahls, sowie die Möglichkeit Stahl günstiger herstellen zu können.^{40,41}

Abbildung 2-6 zeigt die Anteile der Stahlherstellungsprozesse in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, sowie zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Zu erkennen ist, dass nach der Einführung der Flussstahlproduktion, die Produktion von Puddelstählen kontinuierlich sank, bis diese um 1900 im Brückenbau fast vollkommen verschwunden war.⁴²

³⁸ (Lüddecke, 2006 S. 24)

³⁹ (Hönigsberg, 1914 S. 30)

⁴⁰ (Lüddecke, 2006 S. 8)

⁴¹ (Hosford, 2012 S. 13)

⁴² (Lüddecke, 2006 S. 9)

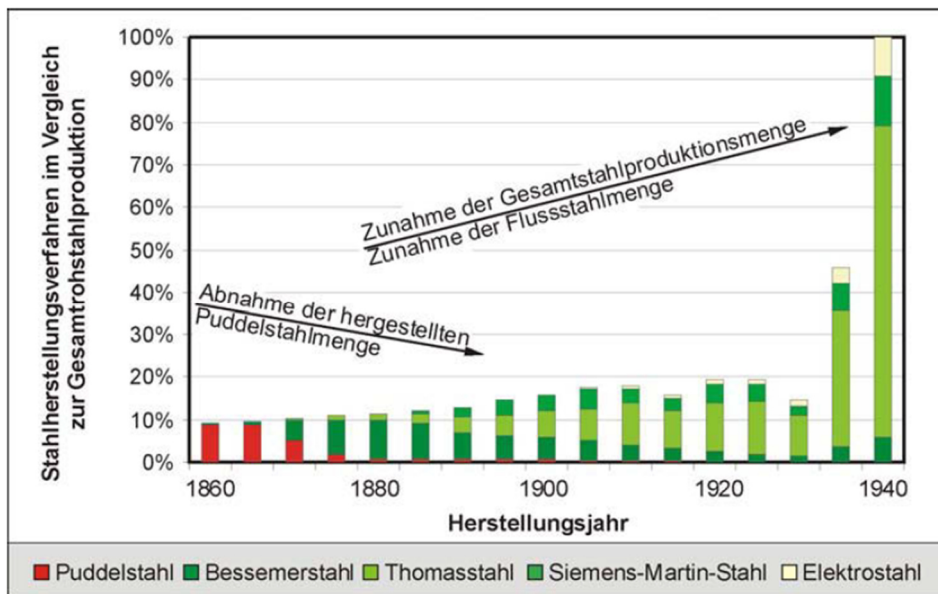


Abbildung 2-6: Darstellung der verwendeten Stahlherstellungsverfahren um 1900⁴³

2.2.2.1 Bessemer / Thomas Verfahren

Das Verfahren wurde in der Mitte des 19. Jahrhunderts von Henry Bessemer entwickelt. Dieser versuchte das Herdfrischverfahren umzukehren, indem er durch den Deckel eines Tiegels, der mit Roheisen gefüllt ist, ein Rohr einführte durch welches er Luft einblies. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren Windfrischverfahren genannt. Es konnten nun in 20 Minuten dieselbe Menge Roheisen gefrischt werden, wie im Puddelofen in 24 Stunden.^{44,45}

Jedoch ergibt sich, vor allem für die kontinentaleuropäische Stahlproduktion, das Problem, dass nicht alle Eisenbegleiter des Roheisens reduziert werden können. Hier sei vor allem das Phosphor erwähnt, welches durch das Bessemer Verfahren kaum angetastet wird, jedoch im kontinentaleuropäischen Roheisen in hohen Anteilen vorhanden ist. Daraus ergibt sich, dass mit dem Bessemer Verfahren nur mit phosphorarmen Roheisen, phosphorarmer Stahl erzeugt werden kann. Dieses musste jedoch importiert werden und machte den kontinentaleuropäischen Markt stark von England abhängig.⁴⁶

Beim Windfrischen wird kein zusätzlicher Brennstoff benötigt. Jedoch muss das Roheisen eine gewisse Zusammensetzung aufweisen, sodass die Eisenbegleitelemente oxidieren können und dadurch eine große Wärmemenge freigesetzt werden kann, die der

⁴³ (Lüddecke, 2006 S. 9)

⁴⁴ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 97)

⁴⁵ (Berns, et al., 2013 S. 397)

⁴⁶ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 97)

Schmelze zugeführt wird. Wäre dies nicht der Fall, würde durch das Durchblasen der Luft dem Schmelzbad Wärme entzogen und so der Frischprozess zum Erliegen kommen. Zu den wichtigsten Elementen gehören beim Bessemer Verfahren allen voran das Silizium, weiters haben auch Mangan, Eisen und Kohlenstoff einen gewissen Einfluss auf die Wärmergenerierung. Bei der Verbrennung von 1 % Silizium bei einer Badtemperatur von 1500°C wird eine Temperaturerhöhung um 190°C erreicht. Für Mangan wird eine Erhöhung von 46°C, für Eisen von 28°C und für Kohlenstoff von 6°C erreicht. Wie zu erkennen ist, bildet Silizium bei diesem Verfahren den eigentlichen Heizstoff, wobei hingegen der Gehalt an Mangan und Kohlenstoff kaum von Bedeutung ist. Somit ergibt sich die in Tabelle 2-3 dargestellte Zusammensetzung des Roheisens. Wie zu erkennen ist, ist das Vorhandensein großer Mengen an Silizium Voraussetzung damit das Verfahren funktioniert.⁴⁷

Tabelle 2-3: Zusammensetzung des Roheisens beim Bessemer Verfahren⁴⁸

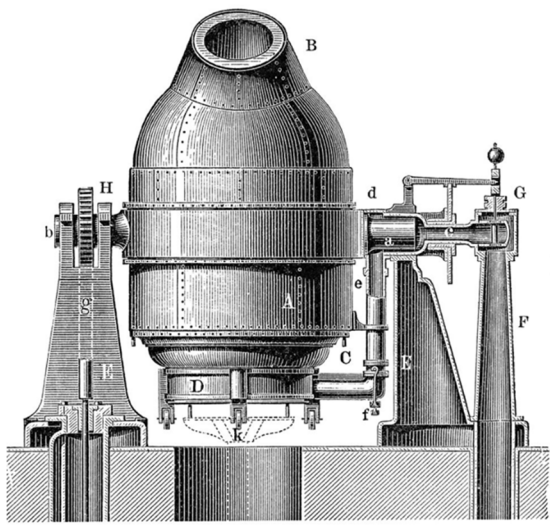
Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
3,5% bis 4%	≥ 2%	0,5% bis 2%	Möglichst wenig	Möglichst wenig

Der für das Bessemer Verfahren benötigte Konverter hat die Form einer Birne und wird aus diesem Grund auch Bessemerbirne genannt. Diese Form ist aus dem Grund entstanden, da somit das flüssige Eisen, welches sich im Konverter befindet, bei liegender Birne den Boden nicht berührt. In Abbildung 2-7 ist eine solche Bessemerbirne dargestellt.⁴⁹

⁴⁷ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 98)

⁴⁸ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 98)

⁴⁹ (Wedding, 1884 S. 21)



A	Hauptkörper	E	Ständer
a	Zapfen	e	Rohr
B	Hals	F	Röhrenmündung
b	Zapfen	f	Bügel
C	Bodenstück	G	Ventil
c	Röhre	H	Zahnrad
D	Windkasten	g	Zahnstange
d	Ruhende Hülse	k	Kolben

Abbildung 2-7: Darstellung einer Bessemerbirne⁵⁰

Der Bessemerkonverter besteht aus einem, mit Blechen zusammengenieteten Stahlmantel und der feuerfesten Auskleidung aus gemahlenem Quarz oder Sand, dem eine geringe Menge Ton zugesetzt wird. An der Außenwand der Birne ist ein Tragrings aus Stahl befestigt. Dieser hat zur Lagerung der Birne zwei Drehzapfen. Wie in Abbildung 2-7 zu erkennen ist, hat der eine Drehzapfen die Aufgabe das Zahnrad zu tragen mit dem das Kippen der Birne möglich gemacht wird. Der zweite Zapfen ist im Gegensatz dazu hohl und hat die Aufgabe die Windzufuhr zu gewährleisten. Über den hohlen Zapfen gelangt der Gebläsewind über ein Rohr in den Windkasten (B), welcher sich unter dem Birnenboden befindet. Im Boden der Bessemerbirne befinden sich eine Vielzahl an Löchern, durch die der Gebläsewind eingeführt werden kann. Die Löcher haben in der Regel einen Durchmesser von 10 bis 20 mm. Der Druck des Windes beträgt 1,5 bis 2 bar. Die Abgase, die während des Bessemer Prozesses entstehen, können über eine verengte Öffnung, dem Hals, entweichen. Dieser Hals dient auch als Auskippöffnung, durch die der fertige Stahl vergossen werden kann, sowie als Arbeitsöffnung, durch die diverse Zuschläge in das Eisen eingebracht werden können.⁵¹

Nach dem Befüllen der Birne wird der Gebläsewind eingeschaltet und die Birne langsam in aufrechte Position gebracht. Der durch das Roheisen strömende Wind reagiert mit dem oben beschriebenen Elementen und verbrennt zunächst das Silizium und dann das Mangan. Wie oben beschrieben, steigt die Temperatur durch die Verbrennung des Siliziums stark an. Die entweichenden Abgase bestehen vorerst zum größten Teil aus Stickstoff.

⁵⁰ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Bessemerbirne>, 2010)

⁵¹ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 101)

Sind das Silizium und das Mangan verbrannt, beginnt die Verbrennung des Kohlenstoffes. Dieser bildet Kohlenmonoxid, welches beim Austritt aus der Bessemerbirne mit dem Sauerstoff in der Luft zu Kohlendioxid verbrennt, wobei sich eine lange leuchtende Flamme bildet.⁵²



Formel (2) zeigt die Reaktion des Kohlenmonoxids und des Sauerstoffes zu Kohlendioxid. Aufgrund des negativen Vorzeichens der Reaktionsenthalpie ist zu erkennen, dass es sich um eine exotherme Reaktion handelt. Es wird also Wärme abgegeben.

Bei der Verbrennung des Kohlenstoffes entsteht ein starker Auswurf, welcher aus Schlackenteilchen besteht. Diese werden durch die austretenden Gase aus der Birne geschleudert. Nach etwa 10 Minuten ist der Kohlenstoff verbrannt, die Flamme erlischt und das Frischen ist beendet. Der gesamte Verlust der durch den Abbrand der Elemente und den Auswurf entsteht ist ca. 10 % bis 12 % des Einsatzes. Will man im Stahl einen gewissen Gehalt an Kohlenstoff einstellen, so muss der Frischprozess unterbrochen werden bevor der Kohlenstoff vollständig verbrannt ist. Der richtige Zeitpunkt für den Abbruch des Prozesses kann man über das Aussehen der Flamme bestimmen. Ist der Frischprozess beendet, so wird der Konverter wieder in die waagrechte Lage gedreht und der Wind abgestellt. Die Kontrolle ob das Ergebnis befriedigend ist, erfolgt durch eine Schöpfprobe aus der eine Schmiedeprobe hergestellt wird.⁵⁴

Als nächster Schritt wird dem Schmelzbad Ferromangan zugesetzt. Daraus folgt eine Desoxydation des Stahls, da Mangan eine hohe Affinität zu Sauerstoff besitzt. Der Sauerstoff ist nach dem Frischprozess am Eisen als Eisen(II)-Oxid (FeO) gebunden. Dieser Vorgang ist erforderlich, da schon geringe Mengen an Eisen(II)-Oxid (FeO) die Rotbrüchigkeit fördern. Rotbrüchig bedeutet, dass der Stahl bei Rotglut, 850°C, nicht verformbar ist. Ein weiterer Grund für das Zugeben von Ferromangan ist das Einstellen eines gewünschten Kohlenstoff- und Mangangehaltes in der Schmelze, da im Ferromangan auch Kohlenstoff gebunden ist. Die Zusammensetzung des Ferromangans kann beliebig erfolgen, so kann für die Herstellung von weicheren Stahlsorten eine Ferromangan Mischung verwendet werden die nur geringe Mengen an Kohlenstoff, jedoch hohe Mengen an Mangan, enthält.⁵⁵

⁵² (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 101)

⁵³ (ChemCargoo, 2016)

⁵⁴ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 102)

⁵⁵ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 104)

Die beim Bessemer Prozess entstehende Schlacke enthält Kieselsäure, Manganmonoxid und Eisenoxide. In geringen Mengen sind auch Tonerde, Kalk und Magnesiumoxid enthalten.⁵⁶

In Tabelle 2-4 ist die Zusammensetzung eines Baustahls, der mit dem Bessemer Verfahren hergestellt wurde, dargestellt. Da die Zusammensetzung jedoch stark vom Ausgangsprodukt abhängt, ergibt sich eine große Schwankungsbreite der Elemente. Der niedrige Phosphorgehalt kommt davon, dass das Ausgangsprodukt bereits sehr wenig Phosphor enthält.

Tabelle 2-4: Zusammensetzung Bessemer Baustahl⁵⁷

Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
0,24 bis 0,3%	0,13 bis 0,35%	0,65 bis 0,75%	0,015 bis 0,016%	0,14 bis 0,15%

Die Problematik für den europäischen Markt besteht, wie bereits oben beschrieben, darin, dass beim Bessemer Verfahren der Gehalt des Phosphors nicht reduziert werden kann. Dieser Umstand ist dem Einfluss der feuerfesten Auskleidung auf das Schmelzbad geschuldet. Die Auskleidung der Bessemerbirne besteht aus einem kieselsäurereichen Futter. Für die Abscheidung von Phosphor wird jedoch eine basische Schlacke benötigt. Dies ist dadurch begründet, dass die, bei der Verbrennung entstehende Phosphorsäure nur durch die Basen in der Schlacke gebunden werden kann. Die basische Komponente ist überwiegend Kalk. Ist jedoch eine größere Menge Kieselsäure anwesend, so löst diese die Bindung der Phosphorsäure mit dem Kalk und setzt die Phosphorsäure wieder frei. Aus der freigesetzten Phosphorsäure würde nun der Phosphor durch Reduktion wieder ins Stahlbad übergehen. Dies ist der Grund warum beim Bessemer-Verfahren die Schlacke nicht basisch werden kann, da diese immer aus dem Birnenauskleidung die Kieselsäure aufnehmen und somit immer sauer sein wird. Aus diesem Grund bezeichnet man das Bessemer Verfahren auch als *saures Verfahren*.^{58,59}

Im Jahr 1878 wurde durch Sidney G. Thomas und Percy C. Gilchrist eine Auskleidung der Bessemerbirne entwickelt die basisch ist und somit das Phosphor abscheiden kann. Die neue Auskleidung besteht aus Dolomit. Das Mineral ist ein Gemenge aus Kalziumkarbonat und Magnesiumkarbonat und kommt in der Natur vor. Die Vorbereitung des

⁵⁶ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 104)

⁵⁷ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 111)

⁵⁸ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 105)

⁵⁹ (Wedding, 1884 S. 24)

Minerals, um es im Konverter zur Anwendung bringen zu können, ist Folgende. Das Gemenge wird in einem Drehrohrofen oder einem Schachtofen bei hohen Temperaturen gesintert. Hierdurch wird das Kohlendioxid ausgetrieben. Das gesinterte Material wird nun gemahlen und mit erwärmten entwässerten Teer gemischt. Durch das Vermengen erhält das Gemisch die gewünschte Verformbarkeit. Die Masse wird nun zu großen Steinen geformt und der Konverter mit diesen ausgemauert. Eine weitere Möglichkeit ist, dass das Gemisch direkt an die Konverter Innenwand aufgestampft wird. Der Konverterboden wird mit demselben Material verkleidet. Hier muss man jedoch darauf achten, dass die Löcher vor dem Verstopfen bewahrt werden. Der Boden wird dann von unten in die Birne eingesetzt. Nun muss die Birne ausgebrannt werden. Durch diesen Prozess wird der Teer zersetzt, wodurch die flüchtigen Bestandteile des Teer gelöst werden. Das Produkt der Zersetzung des Teers ist fein verteilter Kohlenstoff welcher die Dolomit Teilchen fest verbindet und somit eine feste Auskleidung hinterlässt. Wird in die Birne nun gebrannter Kalk zugegeben, entsteht eine stark basische Schlacke, die das Ausscheiden von Phosphor ermöglicht.⁶⁰

Der Boden einer so ausgekleideten Birne muss leicht zu ersetzen sein, da das Problem besteht, dass das Birnenfutter ca. 300 bis 400 Schmelzungen standhält, jedoch der Boden nur 50 bis 70 Schmelzungen.⁶¹

Dieses Verfahren wird aufgrund seines Erfinders als Thomas Verfahren bezeichnet. Eine weitere Bezeichnung lautet, aufgrund der basischen Schlacke, basisches Verfahren. Bei diesem Verfahren werden nun auch neue Ansprüche an das Roheisen gestellt. Es wird nun siliziumarmes und phosphorreiches Roheisen verwendet. Es besteht das Problem, dass sich durch viel Silizium auch viel Kieselsäure bildet, wodurch viel Kalkzusatz benötigt wird und dadurch sehr viel Schlacke entsteht. Weiters wird durch einen Siliziumgehalt von mehr als 0,5 % auch der Auswurf stärker.^{62,63}

Somit ergibt sich, die in Tabelle 2-5 dargestellte Zusammensetzung für das Roheisen.

Tabelle 2-5: Zusammensetzung des Roheisens beim Thomas Verfahren^{64,65}

Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
3% bis 3,5%	0,2% bis 0,7%	0,4% bis 1%	1,8% bis 2,5%	Möglichst wenig

⁶⁰ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 105)

⁶¹ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 106)

⁶² (Wedding, 1884 S. 23, 24)

⁶³ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 106)

⁶⁴ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 106)

⁶⁵ (Wedding, 1884 S. 91)

Durch die Verbrennung von 1 % Phosphor ergibt sich, bei einer Badtemperatur von 1500°C, eine Temperaturerhöhung um rund 120°C. Demnach ist beim Thomas Verfahren, im Gegensatz zum Bessemer Verfahren, der Phosphor das treibende Heizmittel. Der Vorteil, den dieser Umstand mit sich bringt ist, dass das Phosphor erst am Schluss verbrennt, wo auch die größte Temperatur erforderlich ist, da hier durch die fortschreitende Entkohlung des Stahls, die Schmelztemperatur steigt.⁶⁶

Beim basischen Verfahren wird zunächst gebrannter Kalk in die Birne eingebracht. Die Menge des Kalks entspricht in etwa 12 % bis 18 % vom Roheisengewicht. Danach wird das Roheisen, wie beim Bessemer Verfahren, eingebracht. Der Ablauf des Frischens ähnelt jenem des sauren Verfahrens. Es ist zu erwähnen, dass der größte Teil des Phosphors erst nach dem Kohlenstoff verbrennt. Beim Vorhandensein nur noch geringer Mengen an Kohlenstoff, verbrennt der Phosphor schlagartig. Dieser Abschnitt im Frischeprozess wird Nachblasen genannt. Wie beim Bessemer Verfahren kann der Prozess auch hier durch die Beobachtung der austretenden Flamme geregelt werden, weiters wird auch hier eine Schmiedeprobe und eine Bruchprobe genommen. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, so wird auch hier Ferromangan zugesetzt. Weist die Bruchfläche der Bruchprobe jedoch ein grobkörniges Gefüge auf, so ist der Phosphorgehalt im Stahl noch zu hoch und es muss noch einmal gefrischt werden.^{67,68}

In Abbildung 2-8 ist das Arbeitsschema der Thomasbirne dargestellt. Man sieht die Schritte Beschicken, Blasen und Vergießen.

⁶⁶ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 106)

⁶⁷ (Wedding, 1884 S. 119)

⁶⁸ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 107)

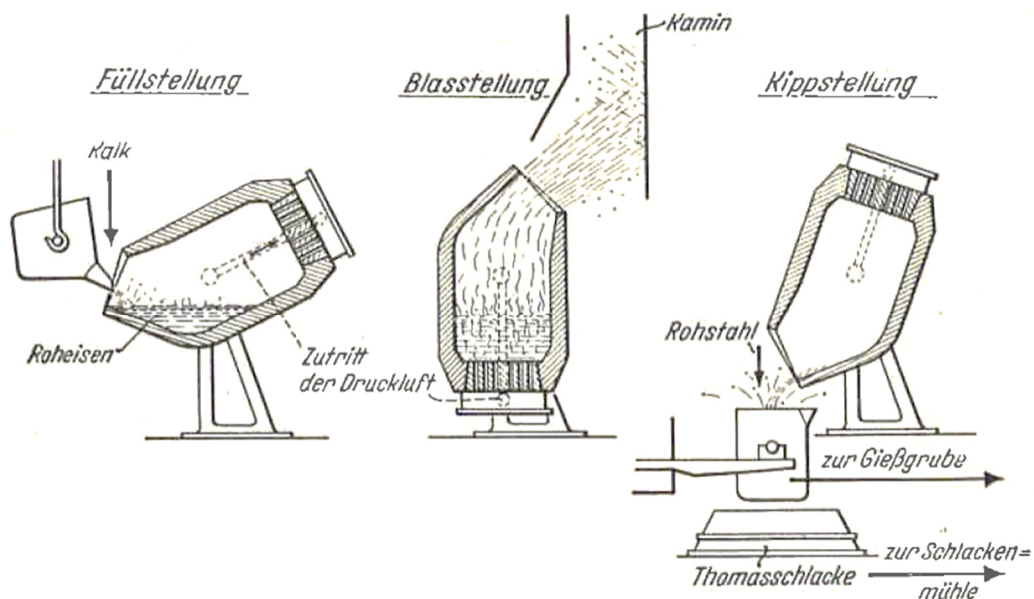


Abbildung 2-8: Arbeitsschema des Thomas-Prozesses⁶⁹

Der Abbrand ist beim Thomas Verfahren, im Gegensatz zum Bessemer Verfahren, etwas höher, 11% bis 14%. Dies hat den Grund, da durch das Nachblasen eine längere Blasezeit benötigt wird.^{70,71}

Somit ergibt sich die in Tabelle 2-6 dargestellte Zusammensetzung des Thomas Baustahls. Wie beim Bessemer Prozess ist auch hier der Kohlenstoffgehalt gering. Es ist auch zu erkennen, dass der Phosphoranteil beim Thomas Stahl gering ist. Wie bereits beim Bessemer Prozess ist auch beim Thomas Verfahren das Ergebnis stark vom Ausgangsprodukt abhängig.

Tabelle 2-6: Zusammensetzung Thomas Baustahl⁷²

Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
0,05 bis 0,1%	Spuren	0,3 bis 0,5%	0,05 bis 0,08%	0,04 bis 0,07%

Das für die Stahlerzeugung benötigte Roheisen kann entweder direkt dem Hochofen entnommen werden, oder einem Schachtofen. Schachtofen werden typischerweise als Ku-

⁶⁹ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 108)

⁷⁰ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 109)

⁷¹ (Wedding, 1884 S. 122)

⁷² (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 111)

polöfen ausgeführt. Im Kupolofen wird das Roheisen, das zuvor in Sandformen vergossen und anschließend in Masseln zu Erstarrung gebracht wurde, unter Zuhilfenahme von Koks geschmolzen. Jenes Verfahren bei dem das Roheisen direkt aus dem Hochofen entnommen wird, ist aufgrund der wegfallenden Umschmelzkosten billiger. Jedoch tritt hier das Problem auf, dass beim Hochofenbetrieb stets eine Schwankung in der Zusammensetzung zu erwarten ist. Aus diesem Grund wird das Roheisen in großen kippbaren Behältern gesammelt. Diese Behälter heißen Roheisenmischer. Aus ihnen kann bei Bedarf jederzeit Roheisen entnommen werden. Durch die Verwendung von Roheisenmischemern ergeben sich zwei Vorteile. Zum einen kann in ihnen das Roheisen auch über arbeitsfreie Tage gelagert werden, daraus folgt die Ersparnis der Umschmelzkosten. Zum anderen wird das Roheisen im Mischer entschwefelt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass Mangan die Neigung besitzt sich mit Schwefel zu Mangansulfid zu verbinden. Diese Verbindung ist im Gegensatz zu Eisensulfid nicht im flüssigen Eisen lösbar, wodurch sich eine schwefel- und manganreiche Schlacke ausbildet, die sich in Folge ihrer geringen Dichte an der Oberfläche sammelt.⁷³

Ein Nachteil des Thomas und Bessemer Verfahrens ist jedoch, dass sich durch den Frischprozess Stickstoff aus der Luft in der Schmelze einlagert. Daraus folgt eine starke Alterungsanfälligkeit, die zum Beispiel bei Kerbschlagbiegeversuchen (siehe Kapitel 3.3.1) einen starken Abfall der Kerbschlagarbeit verursacht.⁷⁴

2.2.2.2 Siemens Martin Verfahren

Das Siemens Martin Verfahren wurde um 1864 entwickelt und ist ein weiteres wichtiges Verfahren zur Erzeugung von Flusstahl. Hier erfolgt die Herstellung des Stahls auf dem Herd eines Flammofens. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren auch Herdfrisch Verfahren genannt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass hier für die Erzeugung von Stahl, auch Alteisen, Späne und Schrott verwendet werden kann.^{75,76}

Beim Siemens Martin Verfahren wird als Brennstoff erstmals Gas angewandt. Die Gas-erzeugung erfolgt durch die unvollständige Verbrennung von Kohle. Es wird in den Schachtraum eines Gaserzeugers oder Generators eine hohe Schicht an Kohle eingebracht. Dieser Schachtraum ist gemauert und hat an seinem unteren Ende einen Rost. Die unvollständige Verbrennung erfolgt nun durch einen Luftstrom der von unten nach

⁷³ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 98)

⁷⁴ (Roik, 1983 S. 35)

⁷⁵ (Aichele, et al., 2015 S. 287)

⁷⁶ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 112)

oben geblasen wird. Das somit entstehende Abgas besteht nicht, wie bei einer vollkommenen Verbrennung, aus Kohlendioxid und Stickstoff, vielmehr ist es ein Gasgemisch aus Schwefelgasen, Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Dieses Gasgemisch wird Generatorgas genannt und verbrennt bei hoher Wärmeentwicklung, wodurch es sehr gut als Brennstoff geeignet ist. Durch die nun mögliche Anwendung von Gas als Brennstoff, kann auch die Zuführung von Luft geregelt werden, wodurch der Luftüberschuss vermindert wird. Dies hat zum einen eine höhere Verbrennungstemperatur zur Folge und zum anderen werden auch die Wärmeverluste über die Abgase reduziert. Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Verbrennungstemperatur ist das Vorwärmen des Verbrennungsgases durch die Abgase des Frischprozesses.⁷⁷

Durch diesen Prozess wird auch der Brennstoffverbrauch reduziert. In Abbildung 2-9 ist ein Gaserzeuger mit einem korbähnlichen Rost dargestellt.

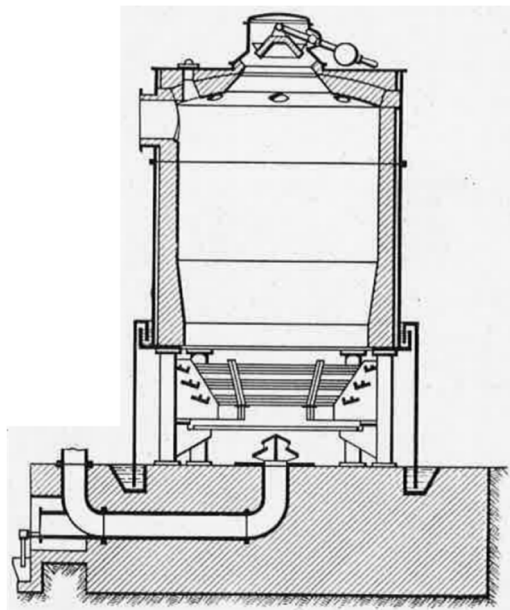


Abbildung 2-9: Gaserzeuger mit korbähnlichem Rost⁷⁸

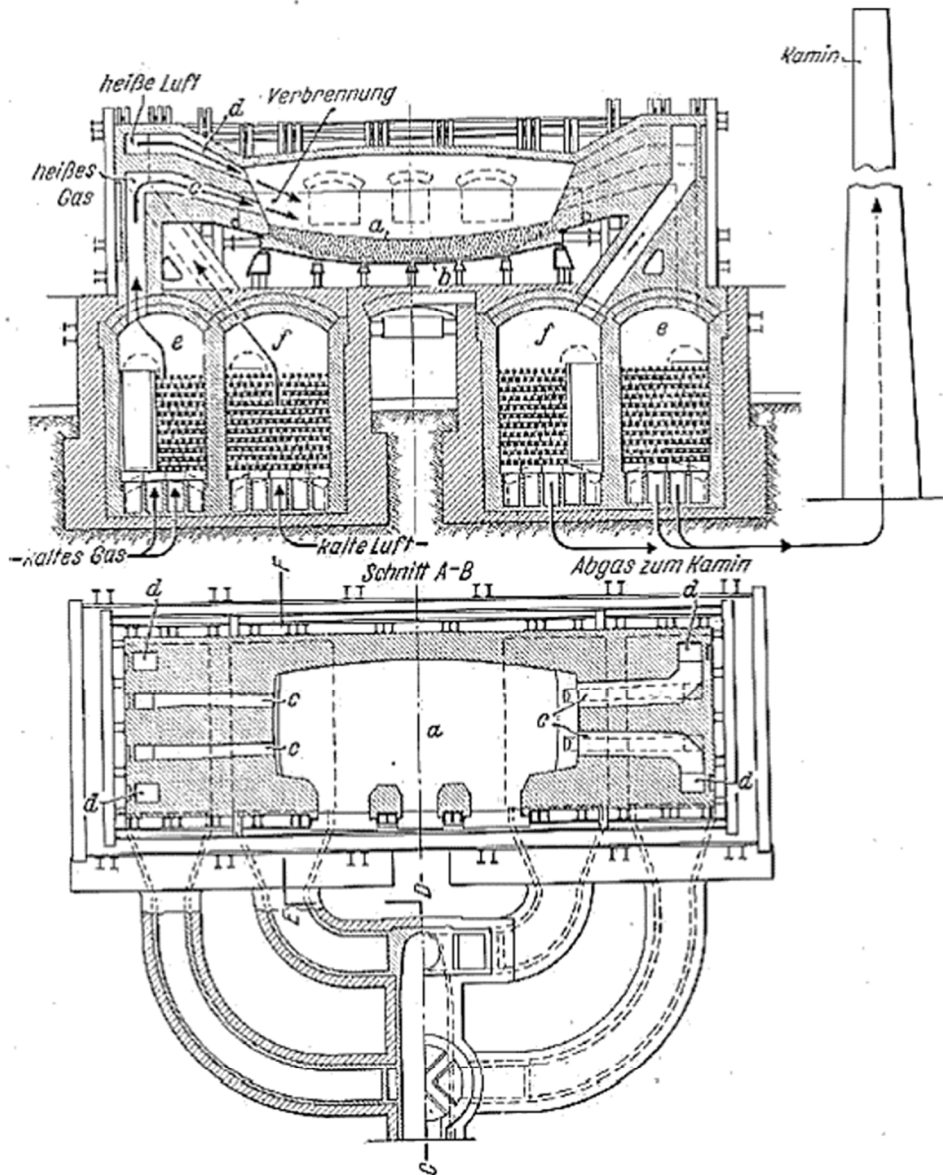
Abbildung 2-10 und Abbildung 2-11 zeigen einen Siemens Martin Ofen im Längs- und Querschnitt. Er besteht aus einem Herd, der auf starke gusseiserne Herdplatten (b) aufgestampft wird. Wobei das Futter basisch oder sauer sein kann. Das basische Futter ist reich an Dolomit, wo hingegen das saure Futter aus Kieselsäure besteht. Es münden mehrere Kanäle (c und d), welche Züge genannt werden, in den Ofen. Diese stellen eine

⁷⁷ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 112, 113)

⁷⁸ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 113)

Verbindung zu den Wärmespeichern (e und f) her, wobei e die Gaskammern und f die Luftkammern sind. Durch die Kanäle strömt von der einen Seite vorgewärmtes Gas (c) und vorgewärmte Luft (d) in die Brennkammer. Im Ofenraum vermischt sich das Gas mit der Luft und verbrennt. Die hier entstehende Flamme schmilzt den Einsatz und erhitzt das eingebrachte Rohmaterial. Auf der anderen Seite des Brennraums kann das heiße Abgas abziehen und das zweite Paar Wärmetauscher erhitzen bevor es über den Kamin entlassen wird. Sind die Wärmespeicher vollständig erhitzt, so kann über ein Klappensystem die Richtung des Gas- und Luftstromes umgekehrt werden, wodurch die Wärme zum Vorheizen nun vom zweiten Wärmespeicherpaar genommen wird und das erste Wärmespeicherpaar durch die Abgase erhitzt wird. An der Längsseite des Ofenraumes befinden sich Türen, durch die die Beschickung geschieht. Weiters können durch diese Öffnungen auch Reparatur- und Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden. Gegenüber der Arbeitstüren befindet sich das Stichloch (g), welches zum Ablassen des fertigen Stahls dient. Das Stichloch ist während des Schmelzvorganges durch eine eingestampfte Masse verschlossen.⁷⁹

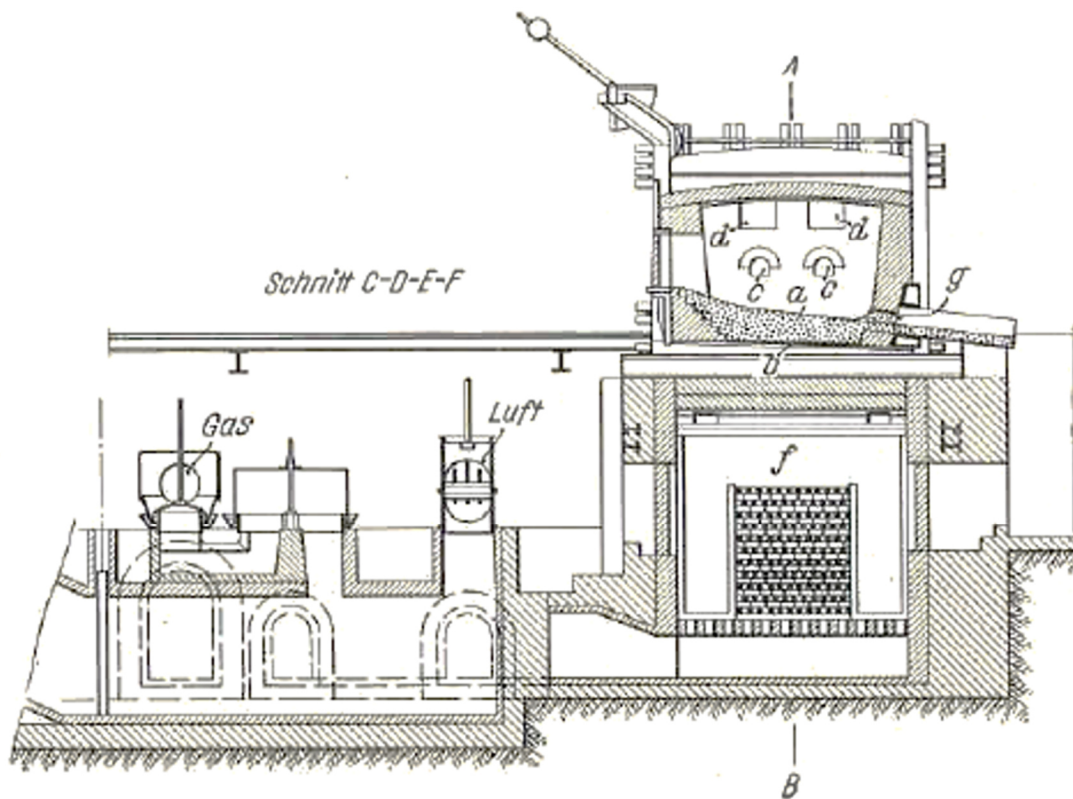
⁷⁹ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 115)



a	Brennkammer	e	Gasspeicher
b	Auskleidung	f	Gasspeicher
c	Gaskanäle	g	Auslassöffnung
d	Auslasskanäle		

Abbildung 2-10: Mit Generatorgas beheizter Siemens-Martin Ofen⁸⁰

⁸⁰ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 116)



a	Brennkammer	e	Gasspeicher
b	Auskleidung	f	Gasspeicher
c	Gaskanäle	g	Auslassöffnung
d	Auslasskanäle		

Abbildung 2-11: Querschnitt eines Siemens-Martin Ofens⁸¹

Die Einsätze im Siemens Martin Ofen funktionieren auf dieselbe Weise wie jene beim Windfrisch Prozess. So besteht die saure Auskleidung, wie die Auskleidung des Bessemer Prozesses, aus Quarzsand mit Tonzusatz und die basische Auskleidung, wie die des Thomas Prozesses aus einem Dolomit-Teer-Gemisch. Vergleiche hierzu Kapitel 2.2.2.1. Da auch bei diesem Verfahren der Phosphorgehalt nur durch basische Auskleidungen reguliert werden kann, ist diese Auskleidung auch die am meisten verwendete im Siemens Martin Ofen. Die Erzeugnisse des sauren Siemens Martin Ofens werden meist nur für harte Stahlsorten bzw. wegen ihrer sehr dünnflüssigen Schmelze zur Herstellung von Stahlguss verwendet. Wie beim Bessemer Verfahren ist auch beim sauren

⁸¹ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 117)

Siemens Martin Ofen ein Grundmaterial (Roheisen und Schrott) erforderlich, welches besonders phosphorarm ist.⁸²

Die metallurgischen Vorgänge beruhen in erster Linie auf Frischvorgängen. Das Verbrennungsgas enthält Gase, die eine oxidierende und reduzierende Wirkung haben. Dies sind vorwiegend Sauerstoff und Kohlendioxid (oxidierend) und Wasserstoff (reduzierend). Diese Gase wirken nun unter Zuhilfenahme der gebildeten Schlacke auf das Stahlbad ein. Das meist verwendete Verfahren ist das Roheisen-Schrott-Verfahren. Hier wird als erstes das Roheisen eingebracht. Die Menge des Roheisens beträgt in etwa 15 % bis 35 % des gesamten Einsatzes. Mit dem Roheisen wird auch gleichzeitig der Kalk eingebracht. Dieser wird benötigt um die Verunreinigungen abscheiden zu können. In weiterer Folge wird nun der Schrott zugegeben und der gesamte Inhalt zum Schmelzen gebracht. Während der Befeuerung der Ofenkammer wird allmählich das Silizium, dann das Mangan und schließlich der Kohlenstoff verbrannt. Handelt es sich um eine basische Auskleidung, wird auch das Phosphor verbrannt. Da bereits während des Einschmelzens Gase über das Material streichen, die Sauerstoff enthalten, und da oftmals Rost an den Schrottteilen haftet, verbrennt bereits in dieser Phase Kohlenstoff, da der Sauerstoff einen Frischprozess hervorruft. Um den Frischprozess zu beschleunigen, kann man Eisen-erzstücke oder auch Walzzunder auf das Schmelzbad werfen. Bei basischem Futter ist das Silizium nach dem Schmelzvorgang bereits vollständig abgeschieden. Bei Mangan verhält sich dies etwas anders. Hier wird das Mangan zwar rasch oxidiert, die basische Schlacke verhindert jedoch eine vollständige Verbrennung, sodass nach dem Schmelzvorgang eine beträchtliche Menge des Mangans wieder aus der Schlacke in die Schmelze rückgeführt werden kann. Dies kann bis zu 45 % betragen. Phosphor verbrennt, bei basischem Futter, teilweise auch schon während des Schmelzvorganges. Aufgrund des Kalkes in der Schlacke des basischen Prozesses und begünstigt durch die Anwesenheit von Mangan in der Schmelze, scheidet sich auch der Schwefel teilweise ab. Wird das Generatorgas aus Kohle hergestellt die einen hohen Gehalt an Schwefel aufweisen, so kann der Gehalt an Schwefel in der Schmelze steigen. Aufgrund des Anstieges der Schmelztemperatur mit abnehmendem Kohlenstoffgehalt, vergleiche hierzu Abbildung 2-4, ist die Temperaturregelung, also das Mischungsverhältnis von Generatorgas und Luft, von großer Bedeutung. Nach Beendigung des Frischprozesses wird dem Stahl, wie beim Windfrischeverfahren, Ferromangan zugesetzt. Dieses hat einerseits eine desoxidierende Wirkung und andererseits bildet sich Mangansulfid welches

⁸² (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 118)

eine Abscheidung von Schwefel zur Folge hat. Ist der Frischprozess beendet, wird der Ofeninhalt über das Stichloch entleert, wonach eine neue Beschickung erfolgen kann.⁸³

Im Siemens Martin Ofen ergibt sich, im Gegensatz zum Windfrischen, ein geringerer Abbrand. Je nach Zusammensetzung der Beschickung ergibt sich ein Abbrand von 5 % bis 8 % des Einsatzgewichtes. Wird Eisenerz zugegeben ergibt sich ein Zubrand.⁸⁴

Tabelle 2-7 zeigt die Zusammensetzung eines Baustahles aus dem basischen Siemens Martin Ofen. Wie schon beim Bessemer Prozess und beim Thomas Prozess sei auch hier gesagt, dass es sich bei den Werten nur um Anhaltspunkte handelt, da auch hier die genaue Zusammensetzung sehr stark von der Beschickung abhängig ist.

Tabelle 2-7: Zusammensetzung basischer Siemens Martin Baustahlblech⁸⁵

Kohlenstoff	Silizium	Mangan	Phosphor	Schwefel
0,05 bis 0,12%	Spuren	0,2 bis 0,45%	0,02 bis 0,05%	0,03 bis 0,05%

2.3 Desoxidation, Erstarrung und Vergussmethoden

In diesem Kapitel werden die heute und damals üblichen Desoxidations-, Erstarrungs- und Vergussmethoden erklärt. Im Speziellen wird auf die im 19. Jahrhundert üblichen Methoden eingegangen, moderne Methoden werden nur vollständigheitshalber erwähnt. Bei den im 19. Jahrhundert üblichen Desoxidationsmethoden handelt es sich vorwiegend um die Zugabe von Ferromangan. Der Stahl wurde in einem weiteren Schritt unberuhigt im Kokillenguss vergossen und dann zur weiteren Verarbeitung ins Walzwerk gebracht.

2.3.1 Desoxidation

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln erwähnt, enthält die Stahlschmelze nach dem Frischprozess zum Teil erhebliche Mengen an Oxiden. Diese entstehen durch die Berührung der Schmelze mit Sauerstoff und Stickstoff. Aufgrund der vorherrschenden hohen Temperaturen können diese in großen Mengen aufgenommen werden. Den Pro-

⁸³ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 120)

⁸⁴ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 121)

⁸⁵ (Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik, 1944 S. 123)

zess der Entfernung des Sauerstoffs aus der Stahlschmelze bezeichnet man als Desoxidation. Dieser Prozess funktioniert auf dem Prinzip, dass manche Elemente eine höhere Affinität zu Sauerstoff besitzen als andere. Folgend seien Elemente in aufsteigender Affinität zu Sauerstoff dargestellt: Mn – V – C – Si – B – Zr – Al. Wie zu erkennen ist, hat Mangan die höchste Affinität, womit die Zugabe des Ferromangans nach den Frischprozessen zu erklären ist.



Formel (3) zeigt die Abspaltung der Oxide von Eisenoxid und die Bildung von Manganoxiden aufgrund der höheren Affinität der Oxide zu Mangan.

Der so gebundene Sauerstoff kann aufsteigen, womit nur noch ein Rest an Sauerstoff in der Schmelze verbleibt. Das Aufsteigen des gebundenen Sauerstoffs und somit die Oxidabscheidung wird durch Bewegungen des Schmelzbades unterstützt.^{86,87}

Der Restsauerstoff in der Schmelze liegt als Eisenoxid (FeO) vor. Dieser reagiert mit dem Kohlenstoff nach Formel (4).



Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Kohlenstoffgehalt die Erzeugung von Kohlenmonoxid und damit das hochsteigende Kohlenmonoxid zunimmt. Daraus lässt sich ableiten, dass bei geringerem Kohlenstoffgehalt im Stahl der Sauerstoffgehalt höher ist. Dies ist der Grund warum vor allem Stähle mit Kohlenstoffgehalten unter 0,1 % der Sauerstoff entzogen werden muss. In Abbildung 2-12 ist der Zusammenhang zwischen Sauerstoffgehalt im Stahl und dem Kohlenstoffgehalt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmenden Kohlenstoffgehalt die Oxidkonzentration im Stahl geringer wird.^{88,89}

⁸⁶ (Bargel, et al., 2008 S. 152)

⁸⁷ (Weißbach, 2007 S. 102)

⁸⁸ (Bargel, et al., 2008 S. 152)

⁸⁹ (Weißbach, 2007 S. 104)

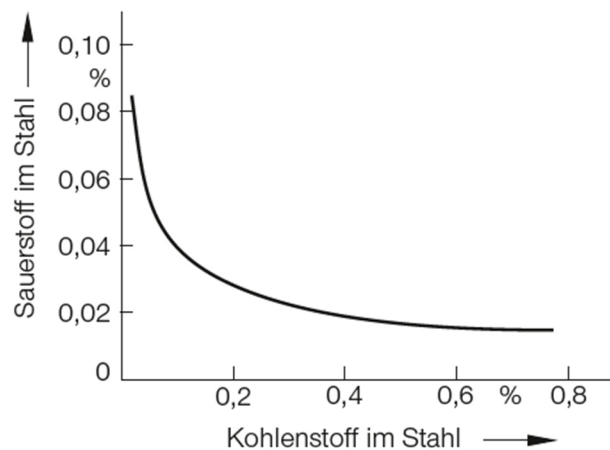


Abbildung 2-12: Zusammenhang Kohlenstoffgehalt und Sauerstoffgehalt im basischen Siemens Martin Ofen⁹⁰

Bei modernen Stählen werden zur Herstellung oxidarmer Stähle vor allem Al, Ti und B eingesetzt. Diese Elemente haben den Vorteil, dass sie neben dem Kohlenstoff auch den Stickstoff binden. Somit entstehen Nitride (TiN, BN, AlN), Carbide (TiC, BC, AlC) und Carbonitride (Ti (C; N), B (C; N)).⁹¹

2.3.2 Erstarrungsverhalten

Nach der Art der Desoxidation unterscheidet man drei Arten der Erstarrung:

- unberuhigte Erstarrung
- beruhigte Erstarrung
- besonders beruhigte Erstarrung

Durch diese Bezeichnungen erhält man Rückschlüsse auf das Erstarrungsverhalten des Stahls in der Kokille.

Der **unberuhigt vergossene Stahl** wird heute mit FU gekennzeichnet. Bei ihm wird zur Desoxidation nur Mangan zugegeben. Dadurch lässt sich erkennen, dass es sich bei den Stählen des späten 19. Jahrhunderts um eben solche unberuhigt vergossene Stähle handelt. Durch die Zugabe von Mangan entsteht Mangansulfid (MnS) und Manganoxid (MnO). Diese Verbindungen sind unempfindlich gegen Rotbrüchigkeit.⁹²

⁹⁰ (Bargel, et al., 2008 S. 152)

⁹¹ (Bargel, et al., 2008 S. 153)

⁹² (Bargel, et al., 2008 S. 153)

Unter Rotbrüchigkeit versteht man, wie bereits oben kurz erwähnt, Brucherscheinungen, die bei der Warmumformung aufgrund von hohen Schwefelgehalten entstehen können. Dies hat den Hintergrund, dass Schwefel im Stahl unlöslich ist. Durch diese Unlöslichkeit bilden sich bei 1200 °C niedrig schmelzende Eutektika (Eisensulfide). Diese reichern sich an den Korngrenzen an und führen durch ihre geringe Verformbarkeit zu Brüchen.⁹³

In der ruhenden Schmelze stellt sich zwischen dem Kohlenstoff und den Eisenoxiden (FeO) ein Gleichgewicht ein. Dieses wird durch den Vergussprozess gestört und hat zur Folge, dass Kohlenmonoxid (CO) entsteht und in der Schmelze hochsteigt. Durch dieses „Kochen“ werden eingeschlossene Gase (N₂, H₂) mitgerissen, welches in weiterer Folge zur Badunruhe führt. Da dieses Gleichgewicht vor allem an den Phasengrenzen zwischen fest und flüssig, also an der Kokillenwand gestört wird, reichern sich im Inneren der Restschmelze Kohlenstoff und anderen niedrighschmelzenden Elementen an. Daraus folgt eine ungleichmäßige Verteilung der Elemente. Vor allem der Schwefel und der Phosphor, aber auch Mangan und Kohlenstoff, lagern sich im Inneren des Gussblockes an. Dieser Bereich wird Blockseigerung genannt. Die Konzentrationen an Schwefel und Phosphor können hier das Vierfache des Durchschnittswertes erreichen. Die Randzone hingegen ist arm an Verunreinigungen, diese wird als Speckschicht oder seigerungsarme Zone bezeichnet. Die oben genannten Blasen aus Kohlenmonoxid entweichen nicht vollständig, dadurch kann zwischen der „Speckschicht“ und der Blockseigerung ein Blasenkranz entstehen.^{94,95,96}

In Tabelle 2-8 sind typische Werte von Schwefel, Phosphor, Kohlenstoff und Mangan in einem unberuhigt vergossenen Stahl zu sehen. Es ist zu erkennen, dass, wie oben beschrieben, der Schwefel und Phosphorgehalt in der Kernzone, im Vergleich zum Gesamtquerschnitt, hoch ist.

⁹³ (Gräfen, 1993 S. 862)

⁹⁴ (Bargel, et al., 2008 S. 153)

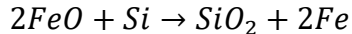
⁹⁵ (Weißbach, 2007 S. 106)

⁹⁶ (Petersen, 2013 S. 14)

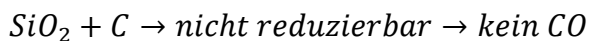
Tabelle 2-8: Verteilung von Schwefel und Phosphor im Vergleich zum Gesamtquerschnitt⁹⁷

Bereich	Phosphor	Kohlenstoff	Mangan	Schwefel
Gesamtquerschnitt	~0,07	~0,08	~0,32	~0,05
Kernzone (Blockseigerung)	~0,19	~0,12	~0,41	~0,11
Randzone (Speckschicht)	~0,04	~0,04	~0,28	~0,018

Beruhigt vergossene Stähle werden mit FN gekennzeichnet. Bei diesen Stählen werden die Oxide vorwiegend durch Silizium zu SiO_2 gebunden. Durch die höhere Affinität von Sauerstoff zu Silizium als zu Kohlenstoff, wird das Oxid durch den Kohlenstoff nicht mehr reduziert. Daraus folgt, dass sich kein Kohlenmonoxid (CO) bildet, wodurch keine Badbewegung entsteht. Dies hat zur Folge, dass das Schmelzbad ruhig erstarrt. Formel (5) zeigt den Vorgang der Desoxidation durch Silizium.



(5)



Durch die ruhige Erstarrung werden die Entmischungsvorgänge stark reduziert, wodurch sich Seigerungszone nur sehr schwach ausbilden können. Teilweise steigt das SiO_2 in die Schlacke, ein großer Teil dieser Verbindung verbleibt jedoch als SiO_2 Partikel in der Schmelze. Da sich das SiO_2 beim Erstarren jedoch gleichmäßig im Block verteilt, bildet sich bei beruhigt vergossenen Stählen keine Speckschicht aus. Meist wird zusätzlich zu Silizium auch Mangan zugegeben, dieses bewirkt wie auch bei unberuhigten Stählen eine Entschwefelung.^{98,99}

Als **besonders beruhigt vergossene Stähle** werden Stähle bezeichnet, denen neben Silizium und Mangan auch noch Aluminium, Niob, Titan, Vanadium und Zirkonium zugegeben werden. Solche Stähle werden mit FF gekennzeichnet. Durch das Aluminium wird der Restsauerstoff zu Al_2O_3 und der Stickstoff zu AlN abgebunden. Daraus ist ersichtlich, dass bei diesen Stählen nicht nur der Sauerstoff, sondern auch der Stickstoff gebunden wird, wodurch die Anfälligkeit auf Verformungsalterung reduziert wird. Weiters wird durch

⁹⁷ (Roik, 1983 S. 36)⁹⁸ (Bargel, et al., 2008 S. 154)⁹⁹ (Petersen, 2013 S. 14)

das AlN eine Feinkörnigkeit bewirkt, durch diese kommt es zu einem Anstieg der Kerbschlagzähigkeit und des Verformungsvermögens, dies führt zu einer Abnahme der Übergangstemperatur.^{100,101}

Formel (6) zeigt die Desoxidation von besonders beruhigten Stählen mittels Aluminium. Aus Formel (7) ist zu erkennen, dass Aluminium sehr affin zu Stickstoff ist und diesen bindet, wodurch Denitrierung stattfinden kann.



Tabelle 2-9 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der drei oben beschriebenen Erstarrungsvarianten von Stählen. Es ist zu erkennen, dass sich diese Stähle in ihrer Zusammensetzung oft stark unterscheiden, was natürlich auf die unterschiedlichen Legierungselemente zurückzuführen ist.

¹⁰⁰ (Bargel, et al., 2008 S. 154)

¹⁰¹ (Petersen, 2013 S. 15)

Tabelle 2-9: Gegenüberstellung der Erstarrungsvorgänge¹⁰²

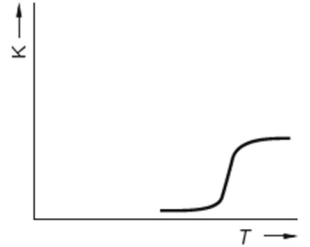
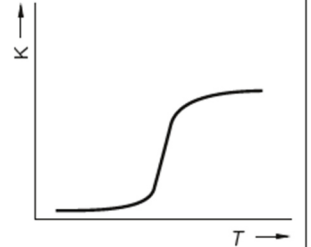
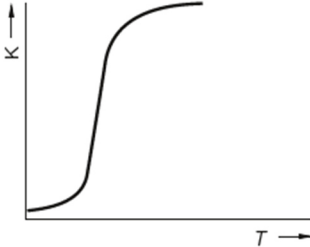
Merkmale	Vergießungsart		
	FU	R (nach DIN 17006)	FF
chemische Zusammensetzung	Si: Spuren Mn: 0,2 ... 0,4% C _{max} : 0,25%	Si: 0,1 ... 0,4% Mn: 0,2 ... 0,6%	Si: 0,1 ... 0,4% Mn: 0,2 ... 0,6% Al _{metallisch} : > 0,02%
wichtige Reaktionen	FeO + C → CO + Fe FeS + Mn → MnS + Fe FeO + Mn → MnO + Fe	FeS + Mn → MnS + Fe 2FeO + Si → SiO ₂ + 2Fe	FeS + Mn → MnS + Fe 2FeO + Si → SiO ₂ + 2Fe 3FeO + 2Al → Al ₂ O ₃ + 3Fe FeN + Al → AlN + Fe
Ausmaß der Blockseigerung	stark	gering	gering
Lunkerbildung	keine	ausgeprägt	ausgeprägt
Oberflächengüte	besser	schlechter	schlechter
Verformungseigenschaften	Speckschicht: gut Kern: schlechter und ungleichmäßig	besser und gleichmäßiger	am besten und gleichmäßig
Alterungsanfälligkeit	groß	geringer	am geringsten
Schweißbeignung	Speckschicht: gut Kern: sehr schlecht	besser	am besten
Kerbschlagarbeit K			

Abbildung 2-13 zeigt eine grafische Gegenüberstellung von unberuhigt vergossenen und beruhigt vergossenen Stählen. Es ist bei den unberuhigt vergossenen Stählen der CO-Blasenkrans zu erkennen, der die Blockseigerung und die Speckschicht trennt, dieser Effekt ist bei beruhigt vergossenen Stählen nicht zu erkennen.

¹⁰² (Bargel, et al., 2008 S. 155)

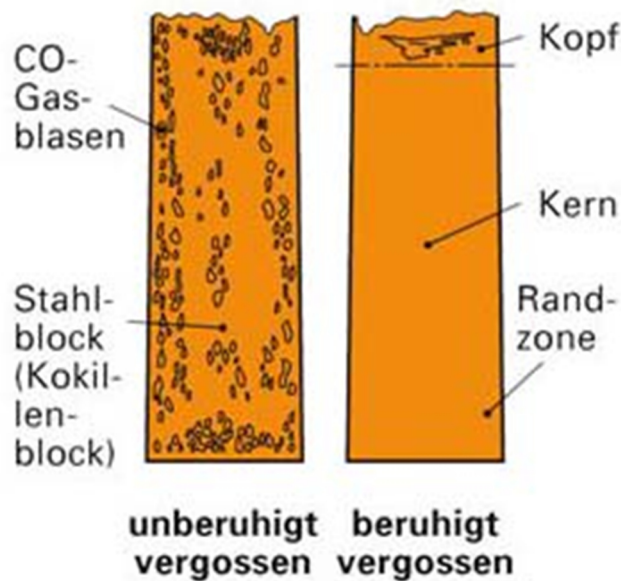


Abbildung 2-13: Gegenüberstellung unberuhigt / beruhigt vergossener Stahl¹⁰³

Es sei erwähnt, dass in der weiteren Arbeit immer unberuhigt vergossene Stähle behandelt werden, da es sich Ende des 19. Jahrhunderts ausschließlich um eben solche handelte und es sich bei den untersuchten Proben um einen solchen handelt.

2.3.3 Vergussmethoden

Da früher der Strangguss (ab ca. Mitte 20. Jahrhundert) noch nicht erfunden war, wurde der Stahl vorwiegend im Blockguss oder Kokillenguss nach der Stahlerzeugung und Desoxidation vergossen. Der Kokillenguss ist dadurch gekennzeichnet, dass es sich hierbei um einen diskontinuierlichen Gießvorgang handelt. Es werden Blöcke oder Brammen gegossen. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist neben der geringeren Wirtschaftlichkeit, im Vergleich zum Strangguss, dass die Erstarrung sehr schnell von statten geht, wodurch die Bildung von Hohlräumen und Seigerungen gefördert wird. Die Gussblöcke werden in einem weiteren Schritt im Walzwerk zu Walzerzeugnissen verarbeitet.¹⁰⁴

Moderne Stähle hingegen werden seit einigen Jahrzehnten direkt durch Strangguss verarbeitet. Dieser bietet eine sehr hohe Wirtschaftlichkeit, da die Ausbringung durch den kontinuierlichen Gussvorgang, ein Vielfaches der des Blockgusses ist. Ein weiterer Vor-

¹⁰³ (<http://www.poly-mech.ch/poly-mech/web-stahlerstellung/desoxidieren.html#a2>)

¹⁰⁴ (Roik, 1983 S. 36)

teil dieses Verfahrens ist, dass der (verlorene) Kopf nur einmal im gesamten Gussvorgang vorhanden ist. Bei diesem Verfahren wird der Stahl auf eine durch Wasser gekühlte Kupferkokille gegossen, somit kann ein nahezu endloser Strang erzeugt werden. Die Kokille lässt sich in nahezu allen Halbzeugformen herstellen. Bei diesem Gussverfahren muss zwingend beruhigter Stahl vergossen werden, da ansonsten die Badunruhe den Gussvorgang stören würde.^{105,106}

2.4 LD Verfahren

Moderne Stähle werden meist mit dem Linz-Donawitz-Verfahren (LD-verfahren, 1949) oder Sauerstoffblasverfahren hergestellt. Bei diesem Verfahren wird in einen gefüllten Konverter eine Wassergekühlte Lanze eingeführt. Der Konverter ist mit einer basischen Auskleidung ausgestattet. Die Füllung des Converters besteht zu einem großen Teil aus flüssigem Roheisen. Weitere Füllungsbestandteile sind, ein Kühlmittel (Eisenschwamm oder Schrott) und Dolomit oder Kalk. Durch die Lanze wird von oben reiner Sauerstoff auf die Schmelze geblasen. Durch diesen Vorgang folgt eine starke Verbrennung von den Eisenbegleitern und in weiterer Folge eine starke Durchmischung. Weiters folgt durch den Blasprozess eine Temperaturzunahme. Eine bessere Durchmischung wird durch das Einblasen von Argon, über Öffnungen am Boden, erzeugt. Wie auch bei den Prozessen des 19. Jahrhunderts, nehmen auch hier, die Anteile von Mangan, Silizium, Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel in der Schmelze kontinuierlich ab.¹⁰⁷

Abbildung 2-14 zeigt eine Darstellung des LD Verfahrens.

¹⁰⁵ (Bargel, et al., 2008 S. 153)

¹⁰⁶ (Roik, 1983 S. 37)

¹⁰⁷ (Bargel, et al., 2008 S. 149)

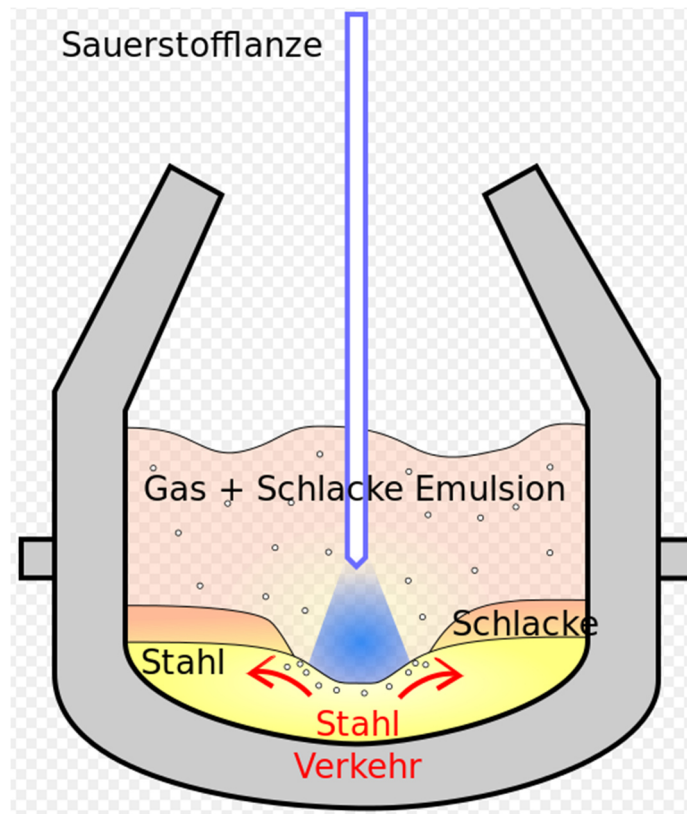


Abbildung 2-14: Prinzip LD-Verfahren¹⁰⁸

Dieses Verfahren soll hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt sein, da die, in der vorliegenden Arbeit, untersuchten Stähle vor 1949 hergestellt wurden und somit dieses Verfahren als Herstellverfahren ausgeschlossen werden kann.

¹⁰⁸ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Linz-Donawitz-Verfahren>)

3 Werkstoffkundliche Charakterisierung des Stahles

Aufgrund der Ergebnisse, welche die Literaturrecherche ergaben, wurde schnell klar, dass kein Weg an einer metallographischen Untersuchung des Stahles der Linzer Eisenbahnbrücke vorbei führen kann.

Zum einen ist die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von zentraler Bedeutung für die Beurteilung der Schweißseignung respektive der Heiß- und Kaltrissanfälligkeit. Zum anderen spielen auch die Dicke der seigerungsfreien Zone (Speckschichtdicke) und die Mikrostruktur eine wichtige Rolle. Diese Parameter werden mittels verschiedener Ätzverfahren ermittelt.

Des Weiteren werden auch zerstörende Prüfverfahren angewendet um die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes zu bestimmen und somit Rückschlüsse auf die Schweißseignung erhalten zu können.

3.1 Probenentnahme und Probenaufbereitung

In der praktischen Anwendung sollte bei den vorliegenden Proben von der Linzer Eisenbahnbrücke, siehe Abbildung 3-2, die Probenentnahme, im europäischen Raum, immer der EN 10027 entsprechen. In der Praxis ist dies jedoch meist nicht möglich, da dadurch der Querschnitt oft zu stark geschwächt wird. Aus diesem Grund werden meist Kleinproben für die Charakterisierung des Stahles verwendet. Diese müssen Querschnittsbereichen entnommen werden, die statisch nicht zur Gänze ausgelastet sind. Es bietet sich oft die halbe Steghöhe, also meist die neutrale Faser, als Entnahmestelle an. Bei den Proben handelt es sich meist um Bohrkernscheiben mit Durchmessern von 45 mm bis 70 mm. Zu bevorzugen sind Bohrkernscheiben mit einem Durchmesser von 60 mm und größer.^{109,110;111}

Abbildung 3-1 zeigt Ausführungsarten solcher Kernbohrungsproben und wie die einzelnen Elemente genutzt werden.

¹⁰⁹ (Helmerich, 2005 S. 25)

¹¹⁰ (Roller, et al., 2015 S. 30)

¹¹¹ (ÖNORM EN 10027-1: 2016 12 01, 2016)

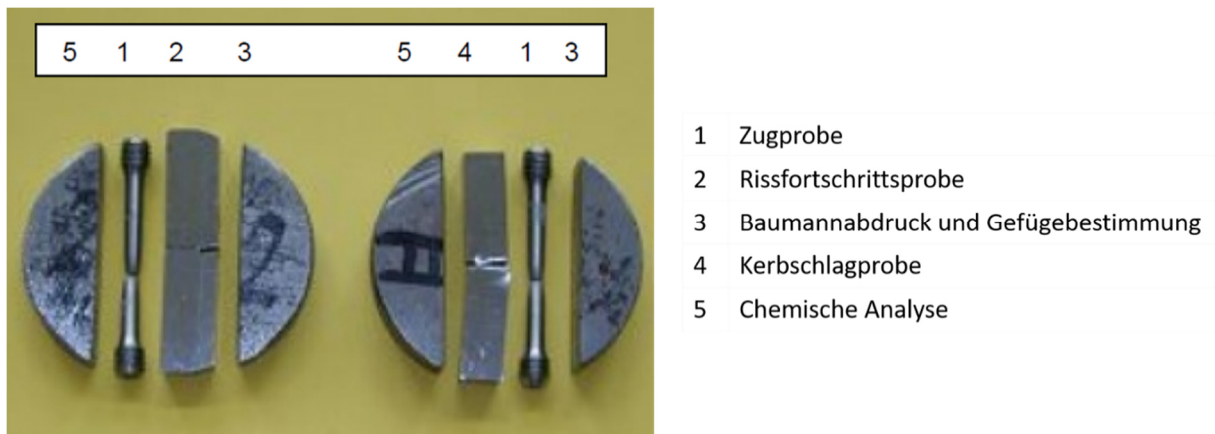


Abbildung 3-1: Probenbeispiele für Kernlochproben¹¹²

In dieser Arbeit werden jedoch, soweit es möglich ist, Normproben entnommen. Diese Entscheidung wird aus dem Grund getroffen, da genügend Material zur Verfügung steht und somit die Rahmenbedingungen andere sind als sie in der Praxis, im Baustelleneinsatz, vorherrschen.

Hier sei erwähnt, dass vor jeder Reparaturschweißung an Altstahlkonstruktionen, eine Werkstoffanalyse gemacht werden muss, da sich die Werkstoffe zu jener Zeit, wie oben beschrieben, stark unterscheiden können.¹¹³

Das gesamte zur Verfügung stehende Probenmaterial ist in Abbildung 3-2 dargestellt. Nebenstehend sind die Bezeichnungen der einzelnen Teile angegeben, wobei die Abkürzung WL für das Winkelmaterial und PL für das Plattenmaterial steht. Bei dem zur Verfügung stehenden Plattenmaterial handelt es sich um Doppelplatten. Dies bedeutet, dass z.B. die Platte PL1, aus zwei Platten (PL1_1 und PL1_2) besteht, die mit Nieten zusammengehalten werden.

¹¹² (Helmerich, 2005 S. 25)

¹¹³ (Roller, et al., 2015 S. 10)



Abbildung 3-2: Gesamtansicht aller zur Verfügung stehender Proben

Aus dem in Abbildung 3-2 dargestellten Material werden die Proben für die werkstoffkundliche Charakterisierung, wie in Tabelle 3-1 dargestellt, entnommen. Im Anhang A können die detaillierten Abbildungen zur Probenentnahme betrachtet werden.

Tabelle 3-1: Probenübersicht

Baumannabdruck	Nital	Klemm	Zugversuch	Kerbschlagbiegeversuch
PL3_1_BM	-	-	-	-
PL3_o_2_BM1 PL3_o_2_BM2	PL3_o_2_Ni1 PL3_o_2_Ni2	PL3_o_2_KI	PL3_o_2_ZV	PL3_o_2_Kb1 PL3_o_2_Kb2 PL3_o_2_Kb3 PL3_o_2_Kb4 PL3_o_2_Kb5 PL3_o_2_Kb6
PL3_u_2_BM1 PL3_u_2_BM2	PL3_u_2_Ni1 PL3_u_2_Ni2	PL3_u_2_KI	PL3_u_2_ZV	PL3_u_2_Kb1 PL3_u_2_Kb2 PL3_u_2_Kb3 PL3_u_2_Kb4 PL3_u_2_Kb5 PL3_u_2_Kb6
PL3_3_BM	-	-	-	-
WL1_1_BM	-	-	-	-
WL1_2_BM	WL1_2_Ni1 WL1_2_Ni2	WL1_2_KI1 WL1_2_KI2	WL1_2_ZV	WL1_2_Kb1 WL1_2_Kb2 WL1_2_Kb3

3.2 Charakterisierung der Mikro- und Makrostruktur

In diesem Abschnitt wird anhand der oben gezeigten Proben, die Makro- und Mikrostruktur des Werkstoffes ermittelt. Hierfür werden vorweg die theoretischen Grundlagen zu den verschiedenen Abdruck- und Ätzverfahren erörtert. Anschließend werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

3.2.1 Methoden zur Darstellung der Mikro- und Makrostruktur

Im folgenden Kapitel werden die in der Arbeit verwendeten Darstellungsmethoden von Makroseigerungen und Mikrostrukturen beschrieben. Bei den verwendeten Verfahren handelt es sich um die Makroätzung nach Heyn und dem Baumannabdruck. Wobei die Erstere zur Darstellung von Phosphorseigerung und zur Detektierung der Verformungsrichtung dient. Der Baumannabdruck hingegen dient der qualitativen Darstellung von Schwefelseigerungen. Diese beiden Verfahren sind vor allem bei Flusstahl sehr aussagekräftig, da hier, wie bereits oben erwähnt, die Speckschicht klar abgegrenzt dargestellt wird und somit diese vermessen werden kann. Weiters kommt in der Arbeit noch die Nital Ätzung zur Anwendung. Mit diesem Verfahren lässt sich die Mikrostruktur von unlegierten Stählen darstellen. Eine weitere Anwendung ist die Klemm Ätzung, einem Farbätzverfahren für unlegierte Stähle. Schließlich kommt bei dieser Untersuchung noch die Adler-Ätzung zur Anwendung, die zur Anwendung kommt, ist die Adler Ätzung. Diese wird zur Darstellung von Einbrandtiefen und Wärmeeinflusszonen verwendet.

Weiters wurde die Wirkung verschiedener Legierungselemente beschrieben, welche sich im Altstahl befinden können.

3.2.1.1 *Baumann Abdruck*

Der Baumannabdruck ist ein makroskopisches Abdruckverfahren zum Nachweis von Eisen- und Mangansulfiden in unlegierten Stählen und Automatenstählen. Weiters liefert er auch Rückschlüsse über die Anordnung und die Verteilung der Sulfide. Für dieses Verfahren benötigt man Silberbromid Fotopapier welches in Schwefelsäure eingelegt wird. Nun wird das grob geschliffene Probestück auf das Fotopapier gepresst. Die Sulfide des Stahles reagieren mit der Schwefelsäure und bilden Schwefelwasserstoff. Der Schwefelwasserstoff reagiert mit dem Silber des Silberbromid Fotopapiers zu dunklem Silbersulfid. Durch den Baumannabdruck ergeben sich qualitative Darstellungen von Profilquerschnitten, womit man die Seigerungszone des Flusstahls erkennen kann.¹¹⁴

Abbildung 3-3 zeigt die Baumannabdrücke des Flusstahlquerschnitts. Hierbei handelt es sich bei a) um eine Platte und bei b) um ein Winkelprofil. Man kann erkennen wie die Schwefelseigerungen verteilt sind. In der Randzone sieht man die überwiegend seigerungsfreie Speckschicht und im Inneren des Querschnitts sind die dunklen Blockseigerungen zu erkennen.

¹¹⁴ (Vander Voort, 1999 S. 48-51)

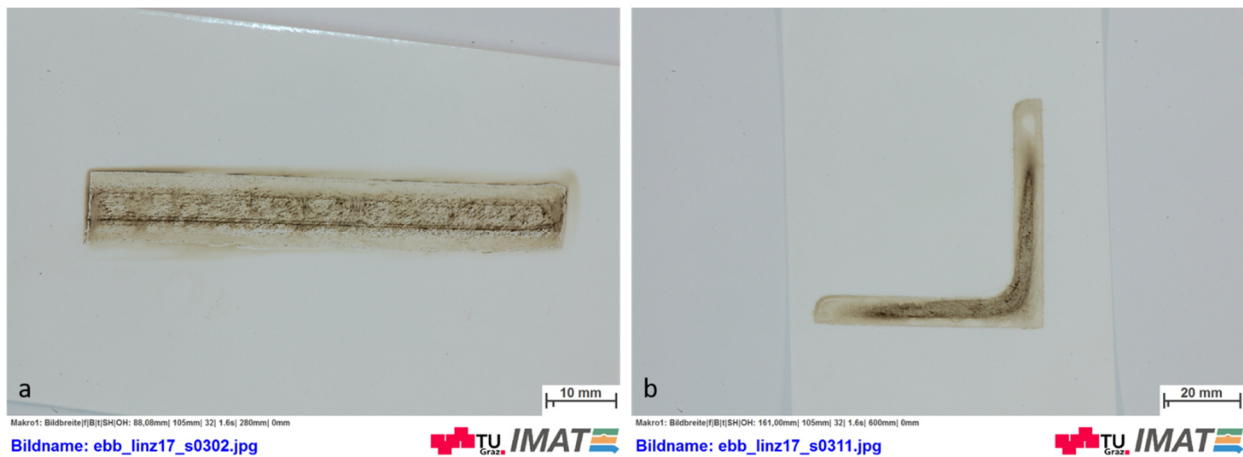


Abbildung 3-3: Baumannabdrücke des Flusstahls von a) Platte; b) Winkelprofil

Der Verfahrensablauf funktioniert wie folgt: Das Silberbromid Fotopapier wird in einer Lösung aus 100 ml destilliertem Wasser und 5ml Schwefelsäure (95 – 97 %ig) getränkt. Das getränkte Fotopapier wird dann für circa 1 bis 5 Minuten auf die Schliifffläche des Probenstückes gedrückt. Es ist zu beachten, dass die Probe nicht verrutscht. Im nächsten Schritt muss gespült werden. Um das erhaltene Bild zu stabilisieren trinkt man es, in einem weiteren Schritt, in ein Fotofixierbad (6 g Natriumthiosulfat in 100 ml Wasser). Nach dem Waschen und Trocknen sind die sulfidreichen Bereiche durch eine dunkle Färbung zu erkennen.¹¹⁵

3.2.1.1 Ätzung nach Heyn

Dieses Verfahren ist ein Makroätzverfahren und zählt zu den Flächenätzverfahren. Bei diesem wird die Oberfläche in der Regel grob geschliffen. In einem weiteren Schritt wird die Oberfläche mit einer Ätzlösung behandelt wodurch Kontraste entstehen, die mit dem bloßem Auge klar erkennbar sind. Aufgrund des schwachen Ätzangriffes entstehen bei diesem Verfahren, im Gegensatz zu den Tiefenätzverfahren, keine Ätzrillen. Durch das Heyn'sche Verfahren können Phosphor-, Kohlenstoff- und Schwefelseigerungen in un- und niedriglegierten Stählen und Stahlguss dargestellt werden. Aufgrund von plastischen Verformungen ordnen sich Seigerungszonen und Einschlüsse zeilenförmig an. Da die Anordnung in Verformungsrichtung erfolgt, kann durch dieses Ätzverfahren der Faser- verlauf dargestellt werden und auf die Verformungsrichtung eindeutig rückgeschlossen werden.¹¹⁶

¹¹⁵ (Petzow, 1978 S. 63)

¹¹⁶ (Vander Voort, 1999 S. 48-51)

Abbildung 3-4 zeigt zwei mit Heyn geätzte Schliffe. Es ist hier deutlich die Verformungsrichtung zu erkennen.

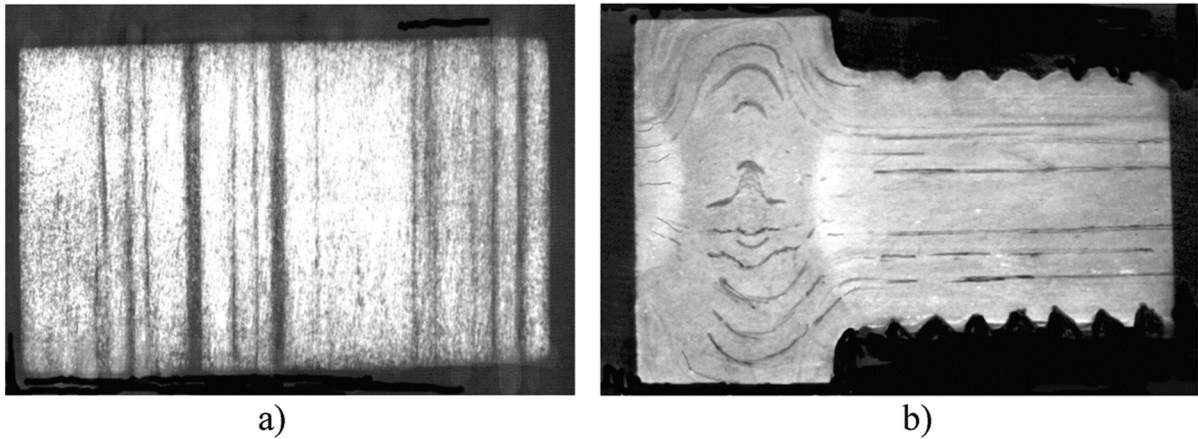


Abbildung 3-4: Mit Heyn geätzte Schliffe a) Längsschliff eines Automatenstahls; b) Kraftflussverlauf einer geschmiedeten Schraube¹¹⁷

Dieses Ätzverfahren kann auch für den Nachweis von Schweißlagen und Wärmeeinflusszonen in Schweißverbindungen heran gezogen werden. Abbildung 3-5 zeigt die Darstellung einer Mehrlagenschweißung. Hier sind die einzelnen Schweißlagen und die Wärmeeinflusszone zu erkennen. Die Letztere ist als dunkle Zone am Rand der Schweißflanken zu sehen.

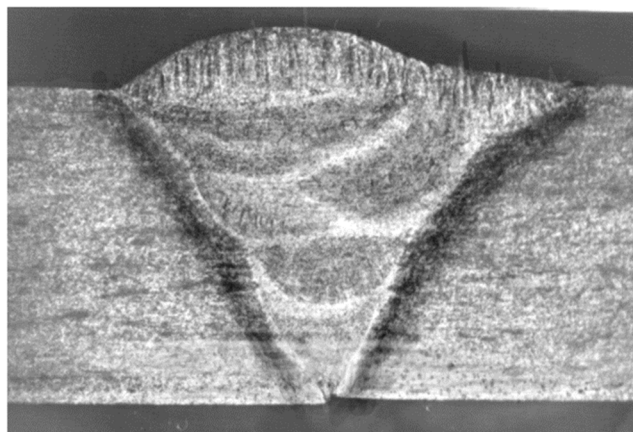


Abbildung 3-5: Mehrlagenschweißung, geätzt mit Heyn¹¹⁸

¹¹⁷ (Salbert, 2010 S. 19)

¹¹⁸ (Salbert, 2010 S. 19)

Der Verfahrensablauf ist wie folgt: Die Stahlprobe wird bis zu einer Körnung von 240 geschliffen und anschließend in eine Lösung aus 120 ml destilliertem Wasser und 20 g Kupfer(II)-ammoniumchlorid getaucht. Die Probe wird der Lösung so lange ausgesetzt bis sich auf der Schliffoberfläche ein rauer Kupferniederschlag ausbildet. Dies dauert in der Regel zwischen zwei und zehn Minuten. Die abgelagerte Kupferschicht wird anschließend unter fließendem Wasser mit einem Wattebausch abgewischt. Durch Wiederholung der Ätzung kann der Kontrast erhöht werden.¹¹⁹

3.2.1.2 Nital Ätzung

Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Mikroätzverfahren. Dies bedeutet, dass das Gefüge unter einem Mikroskop sichtbar gemacht wird. Das Gefüge ist ab etwa einer 50 – fachen Vergrößerung sichtbar. Bei den Mikroätzverfahren unterscheidet man zwei Gruppen, die nasschemische Ätzung und die elektrolytische Ätzung. Die Nital Ätzung zählt zur Gruppe der nasschemischen Ätzverfahren und ist eine so genannte Korngrenzenätzung. Das bedeutet, dass das Ätzmittel ausschließlich die Korngrenzen angreift. Eine Ausnahme macht hier der Perlit, bei ihm wird auch das Korninnere angegriffen.¹²⁰

Bei der Nital Ätzung handelt es sich um eine Tauchätzung. Sie ist das am häufigsten angewandte Ätzverfahren und findet Anwendung bei reinem Eisen, unlegierten Stählen, legierten Stählen und Grauguss. Sie dient zur Ermittlung von Seigerungen, Gefügestrukturen und Randentkohlungen. Das Nital Verfahren kann auch zur Tiefenätzung zur Anwendung kommen, hierfür muss die Ätzdauer und die Konzentration der Salpetersäure, auf 10 %, erhöht werden.¹²¹

Abbildung 3-6 zeigt die Darstellung einer Nital Ätzung unter dem Lichtmikroskop. Bei dem Probenmaterial handelt es sich um den in der Arbeit verwendeten Flussstahl. Zu erkennen sind Ferritkörner und Seigerungen.

¹¹⁹ (Petzow, 1978 S. 63)

¹²⁰ (Petzow, 1978 S. 25)

¹²¹ (Metallograph)

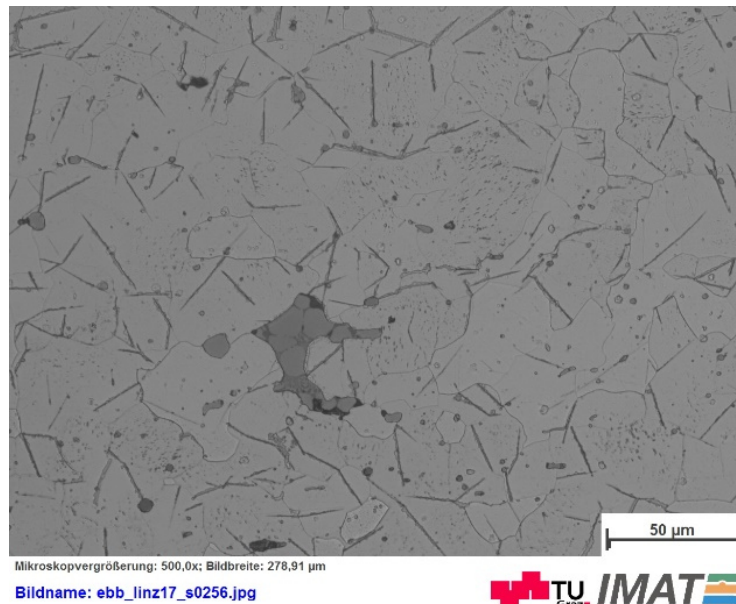


Abbildung 3-6: Winkelmaterial (WL1_2_NI1) - Nital Ätzung des Flusstahls

Der Verfahrensablauf ist wie folgt: Die eingebettete Probe wird bis zu einer Rauheit von 1 Mikrometer poliert. Anschließend erfolgt eine Reinigung der Probe mit Wasser und Alkohol. In weiterer Folge wird die Probe mittels einer Probenzange in das Ätzmittel getaucht und im Ätzmittel bewegt. Die Bewegung dient dazu, dass eine gleichmäßige Ätzung entsteht. Die Verweildauer im Ätzmittel dauert nur wenige Sekunden. In dieser Arbeit wurde die 3 %-ige Nital Ätzung verwendet, diese besteht aus 97 ml Alkohol (aus meist 95 %-igem Ethanol) und 3 ml Salpetersäure. Nach dem Ätzzvorgang wird die Ätzfläche noch mit Wasser gespült und getrocknet.¹²²

3.2.1.3 Ätzung nach Klemm

Bei der Klemm Ätzung handelt es sich wie bei der Nital Ätzung um ein Mikroätzverfahren. Dieses eignet sich zur Darstellung von Karbitausscheidungen an den Korngrenzen und Seigerungen bei unlegierten und legierten Stählen und Gusseisen. Für diese Anwendungsbereiche wird die Klemm Ätzung als Klemm I bezeichnet. Ein weiteres Anwendungsgebiet der Ätzung sind Kupferlegierungen und Lötungen (Klemm II und Klemm III). In dieser Arbeit findet nur Klemm I Anwendung. Wie bei der Nital Ätzung handelt es sich hier auch um eine Tauchätzung die bei Raumtemperatur stattfindet. Die Klemmätzung

¹²² (Petzow, 1978 S. 64)

ist, anders als die Nital Ätzung, ein Farbätzverfahren. Das bedeutet, dass sich die Ferritkörner, je nach ihrer Orientierung, verfärben. Der Zementit bildet sich weiß ab. Ein weiterer Vorteil der Klemm Ätzung ist, dass Seigerungen zu erkennen sind, die mit anderen Ätzverfahren nicht sichtbar sind, zum Beispiel Phosphorseigerungen in unlegierten Stählen. Bei der Klemmätzung handelt es sich um eine Kornflächenätzung, dies bedeutet, dass bei diesem Verfahren die Schliiffläche nicht angeätzt wird, die Flächen werden nur gefärbt. Dies hat zur Folge, dass auch feinste Ausscheidungen kontrastiert werden können.

Abbildung 3-7 a) zeigt ein mit Klemm I geätztes Tiefziehblech, die bunten Flächen bilden den Ferrit ab, der Zementit ist hingegen weiß. In b) sind Schwefelseigerungen in einem Baustahl dargestellt, diese zeigen sich in gelb-braun und grenzen sich deutlich von den Ferritkörnern ab.

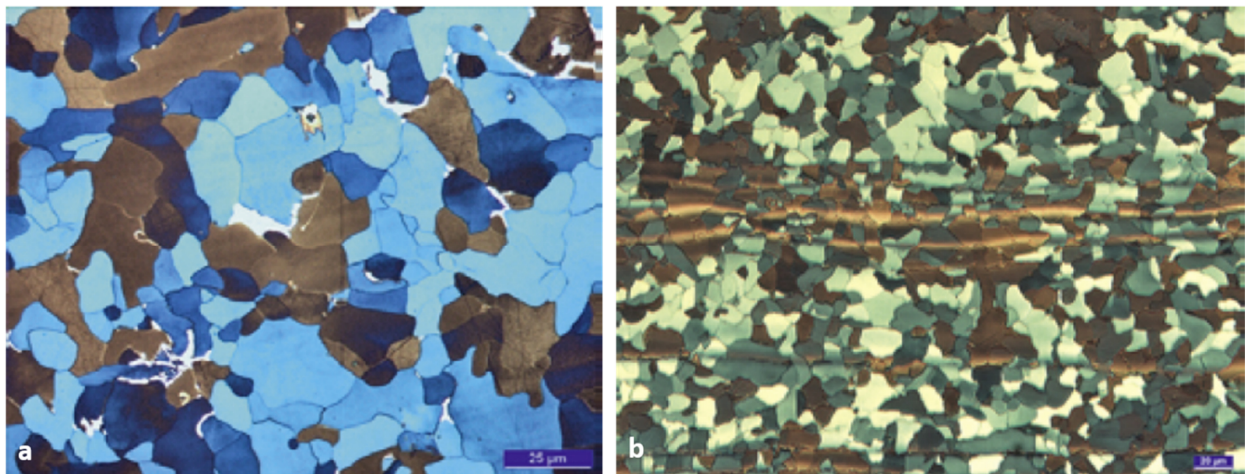


Abbildung 3-7: Schliffe mit Klemm I geätzt, a) Tiefziehblech mit Ferrit (blau-braun) und Zementit (weiß); b) Baustahl mit Phosphorseigerungen (gelb-braun)¹²³

Zum Verfahrensablauf: Das Ansetzen der Ätzlösung passiert hier in zwei Schritten. Zunächst muss eine Stammlösung angesetzt werden. Diese besteht aus 300 ml lauwarmen demineralisiertem Wasser in das löffelweise Natriumthiosulfat-Pentahydrat ($\text{Na}_2\text{S}_3\text{O}_2 \times 5\text{H}_2\text{O}$) gegeben wird. Dies geschieht so lange, bis die Lösung gesättigt ist (rund 1 kg $\text{Na}_2\text{S}_3\text{O}_2 \times 5\text{H}_2\text{O}$). Diese Lösung wird nun über Nacht stehen gelassen, dabei bildet sich ein Bodensatz des Salzes. Die somit erhaltene kaltgesättigte Natriumthiosulfatlösung bezeichnet man als Stammlösung. Nun wird für die eigentliche Ätzlösung 2 g Kaliumsulfid

¹²³ (Weilhammer, 2017)

in 100 ml Stammlösung aufgelöst. Die Haltbarkeit dieser Lösung ist auf eine Woche begrenzt, wohingegen die Stammlösung sehr lange haltbar ist. Die Proben werden nun in die Ätzlösung getaucht. Die Ätzdauer ist nur sehr schwer in Zahlen zu fassen, sie kann sich zwischen 30 Sekunden bis hin zu mehreren Minuten bewegen. Aus diesem Grund erfolgt die Ätzung auf Sicht. Die Schlifffläche verfärbt sich zuerst hellbraun, wird immer dunkler, bis sich eine Blaufärbung einstellt. Zu diesem Zeitpunkt ist die Ätzung zu beenden. Wird zu lange geätzt, verfärbt sich die Fläche grünlich. Nach dem Ätzvorgang wird die Probe mit Wasser und Alkohol gespült und getrocknet. Bei der Probenvorbereitung ist, wie bei allen Farbätzungen zu beachten, dass eine Samtpolitur mittels Samttuch und Poliersuspension erforderlich ist um brauchbare Ergebnisse zu erhalten.^{124,125}

3.2.2 Einfluss von Legierungselementen auf die Eigenschaften des Stahls

In diesem Kapitel wird ein Auszug von Legierungselementen besprochen, die sich im Altstahl befinden können. Hierbei handelt es sich vorwiegend um solche, die bei der Stahlerzeugung in den Stahl gelangen oder nicht aus dem Stahl reduziert werden können. Es wird gezeigt, welche Wirkung die einzelnen Elemente auf die Materialeigenschaften haben und durch welche Zusammenhänge diese in den Stahl gelangen. Dieses Kapitel soll lediglich einen Überblick geben und erhebt auf keinen Fall den Anspruch auf Vollständigkeit

3.2.2.1 Mangan

Bei modernen Stählen stellt Mangan meist kein Problem dar, da das α -Eisen (Ferrit) ungefähr 10 % Mangan lösen kann. Daraus ergibt sich, dass in solchen Mangan legierten Stählen keine besonderen Phasen auftreten. Aus diesem Grund ist der Mangangehalt durch metallographische Methoden nicht bestimmbar. Bei schwefelhaltigem Altstahl verhält sich der Sachverhalt etwas anders. Hier wird, aufgrund der hohen Affinität von Mangan zu Schwefel, das Mangan an Schwefel gebunden und führt zu Mangansulfid (MnS). Diese Sulfide schmelzen erst bei 1600°C, daher werden sie primär in der Schmelze ausgeschieden und lagern sich nicht an den Korngrenzen an. Aus diesem Grund wirkt, wie in Abbildung 3-8 gezeigt, das Mangansulfid positiv gegen die Rotbrüchigkeit.¹²⁶

¹²⁴ (Petzow, 1978 S. 63)

¹²⁵ (Weilhammer, 2017)

¹²⁶ (Bargel, et al., 2008 S. 156)

Ein Nachteil ist, dass sich das gebildete Mangansulfid nach dem Walzprozess zeilenförmig erstreckt. Dies kann zur Verringerung der Zähigkeitseigenschaften in Dickenrichtung führen (Anisotropie). Daraus folgt eine gewisse Neigung zu Terrassenbrüchen.¹²⁷

Abbildung 3-8 zeigt den Zusammenhang des Mangan- und Schwefelgehaltes mit der Rotbrüchigkeit des Stahles. Es zeigt sich, dass mit steigendem Schwefelgehalt die Rotbruchgefahr zunimmt. Wird nun Mangan zulegiert, so sinkt die Gefahr des Rotbruches. Weiters zeigt sich, dass bei unruhigen erstarrten Stählen bereits geringe Mengen an Schwefelsulfid zum Rotbruch führen können.¹²⁸

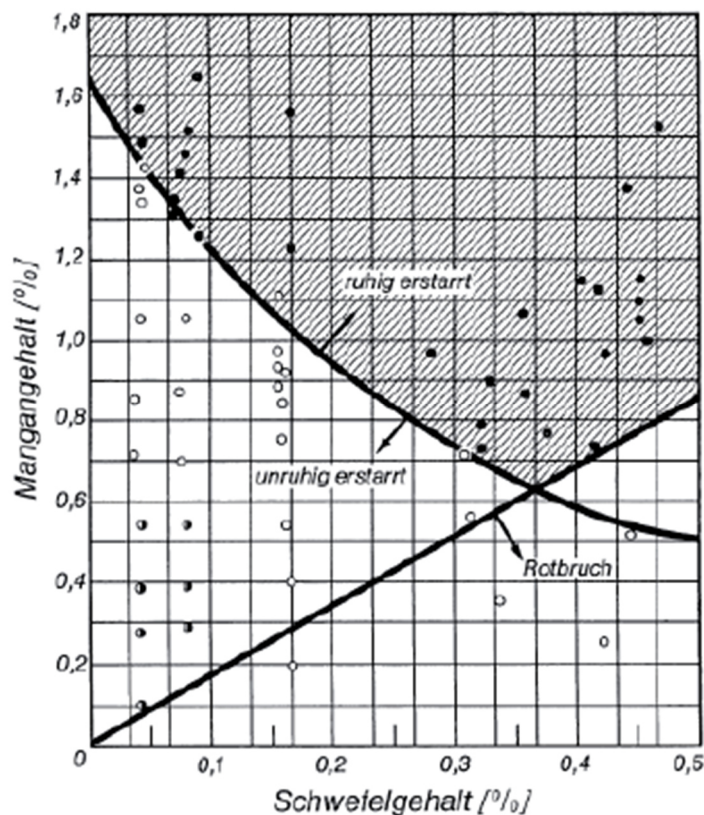


Abbildung 3-8: Zusammenhang zwischen Schwefel- und Mangangehalt mit der Rotbrüchigkeit von Stahl¹²⁹

Abbildung 3-9 zeigt eine EDX Aufnahme der Kernzone des untersuchten Flussstahls aus dem 19. Jahrhundert. Es ist zu erkennen, dass sich die Mangansulfidlamelle in der Mitte des Walzerzeugnisses erstreckt.

¹²⁷ (Bargel, et al., 2008 S. 154)

¹²⁸ (Leuschke, 2013 S. 14)

¹²⁹ (Leuschke, 2013 S. 14)

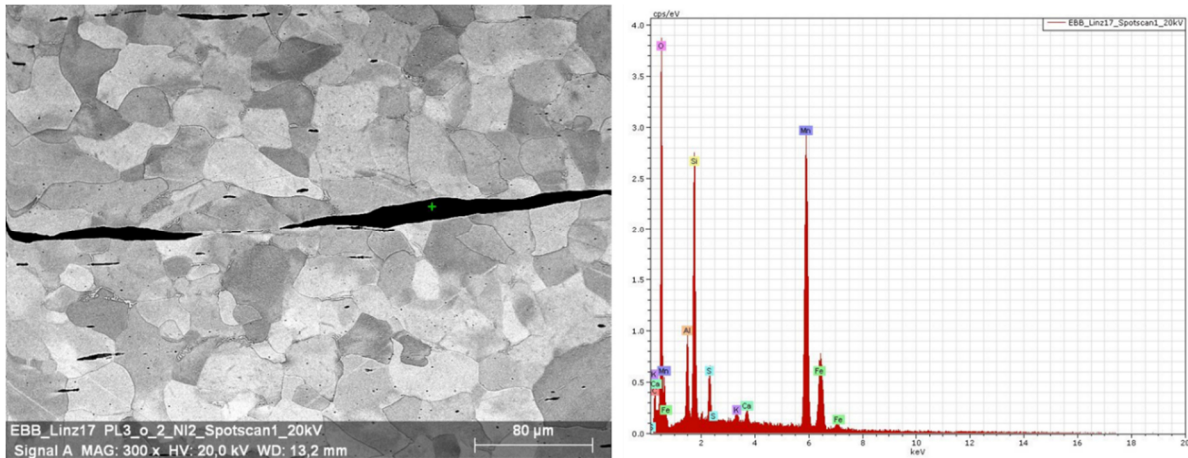


Abbildung 3-9: Plattenmaterial (PL3_o_2_NI2) - Mangansulfid Ausscheidungen in der Seigerungszone des untersuchten Altstahls

3.2.2.2 Schwefel

Die Löslichkeit des Schwefels im α -Eisen ist bei Raumtemperatur sehr gering. Es bildet sich eine charakteristische Phase, das Eisensulfid (FeS). Bei 985°C bildet das Eisen mit dem Schwefelsulfid ein Eutektikum, das an den primär ausgeschiedenen γ -Mischkristalle an kristallisiert, das übrig bleibende Eisensulfid lagert sich an den Korngrenzen an. Dies kann in weiterer Folge zur Rotbrüchigkeit und zum Heißbruch führen. Vergleiche Abbildung 3-8.¹³⁰

Aus diesem Grund ist bei modernen Baustählen der Schwefelgehalt mit 0,045 % begrenzt.¹³¹

Wie bereits oben erörtert, führt das Zulegieren von Mangan zu einer Verbesserung der Beständigkeit gegen Rotbruch und Heißbruch.

3.2.2.3 Phosphor

Phosphor ist für die Zähigkeitseigenschaften des Stahl sehr schädlich. Er bildet mit dem Eisen Substitutionsmischkristalle, durch welche die Zähigkeit sehr stark vermindert wird.

¹³⁰ (Bargel, et al., 2008 S. 156)

¹³¹ (ÖNORM EN 10025-2: 2011 06 01, 2011)

Wie auch bei Schwefel gibt die Norm, in modernen Stählen, Maximalgehalte an Phosphor an. Diese betragen bei Baustählen 0,045 %.¹³²

Bei Altstählen wurde der Sachverhalt der Entphosphorung bereits in Kapitel 2 erörtert. Es sei jedoch auch hier gesagt, dass es bei Altstählen keine Angaben von Maximalwerten von Phosphor und Schwefel gibt. Aus diesem Grund ist es essentiell dass bei jeder Revitalisierung der Stahl charakterisiert wird.

Phosphor seigert wie Schwefel sehr stark, wodurch diese beiden Elemente in den gleichen Zeilen zu finden sind. Die Seigerungserscheinungen werden durch eine geringe Diffusionsgeschwindigkeit im Eisen begünstigt.¹³³

3.2.2.4 Stickstoff

Schon durch geringe Anteile an Stickstoff werden die mechanischen Eigenschaften des Stahles sehr stark beeinflusst. Die Streckgrenze und die Festigkeit werden durch das Vorhandensein des Stickstoffs gesteigert und die Verformungsfähigkeit und die Kerbschlagarbeit fallen drastisch ab. Der Grund hierfür ist, dass das α -Eisen nur geringe Mengen an Stickstoff ($\sim 0,1\%$) bei $590\text{ }^{\circ}\text{C}$ lösen kann. Bei Raumtemperatur ist er jedoch quasi unlöslich. Wird der Stahl nun schnell abgekühlt, so liegt der Stickstoff in zwangsgelöster Form vor. Durch eine nachträgliche Wärmebehandlung (Rekristallisationsglühen oder Normalisieren) bei höheren Temperaturen, scheiden sich nadelförmige Eisennitride (Fe_4N) aus. Dieser Sachverhalt wird Abschreckalterung genannt. Diese kann auch durch Schwefel, Phosphor und Kohlenstoff hervorgerufen werden und verringert die Zähigkeit des Stahls erheblich. Eine weitere, durch Stickstoff hervorgerufene Alterung, ist die Reckalterung oder Verformungsalterung. Sie entsteht nur bei kaltverformten Stählen. Durch die Kaltverformung steigt die Anzahl der Versetzungen um ein Vielfaches. Der Stickstoff diffundiert in die entstehenden Versetzungsbereiche und blockiert damit die Versetzungsbewegung. Daraus ergibt sich eine Versprödung. Finden diese Vorgänge bei Raumtemperatur statt, wird er „natürliche Alterung“ genannt. Hier tritt der Zähigkeitsverlust erst nach einiger Zeit auf. Die Einflüsse auf die Verformungsalterung können durch Rekristallisationsglühen und die damit verbundene Kornneubildung rückgängig gemacht werden.¹³⁴

Durch die Zugabe von Aluminium, Titan und Niob, wie es bei besonders beruhigten Stählen der Fall ist (siehe Kapitel 2), wird der Stickstoff zu Nitriden gebunden, dadurch kann

¹³² (ÖNORM EN 10025-2: 2011 06 01, 2011)

¹³³ (Bargel, et al., 2008 S. 155)

¹³⁴ (Roik, 1983 S. 39)

die Alterungsneigung verringert werden, da der Stickstoff zu diesen Elementen eine höhere Affinität als zu Eisen hat und er dem Mischkristall entzogen wird. Vorsicht ist geboten, bei langsam erstarrendem Stahlguss, bei dem sich die AlN plättchenförmig an die primären Gamma-Korngrenzen anlagern, hier kann es zu sog. "Muschelbruch" kommen.^{135;136}

Bei modernen Stählen ist der Anteil an Stickstoff mit 0,012 % begrenzt.¹³⁷

Bei Altstählen ist dies nicht der Fall, hier verhält es sich gleich wie mit dem Phosphor und dem Schwefel. Erschwerend kommt hier noch hinzu, dass vor allem bei Thomas und Bessemer Stählen (vergleiche Kapitel 2) der Stickstoffgehalt oft sehr hoch ist, da diese mit Luft gefrischt wurden. Die Luft besteht idealisiert aus 79 % Stickstoff und 21 % Sauerstoff. Wird nun windgefrischt, kann sich der Stickstoff aus der Luft in der Stahlschmelze einlagern.¹³⁸

¹³⁵ (Bargel, et al., 2008 S. 157)

¹³⁶ (Naumann, et al., 1962)

¹³⁷ (ÖNORM EN 10025-2: 2011 06 01, 2011)

¹³⁸ (Bargel, et al., 2008 S. 157)

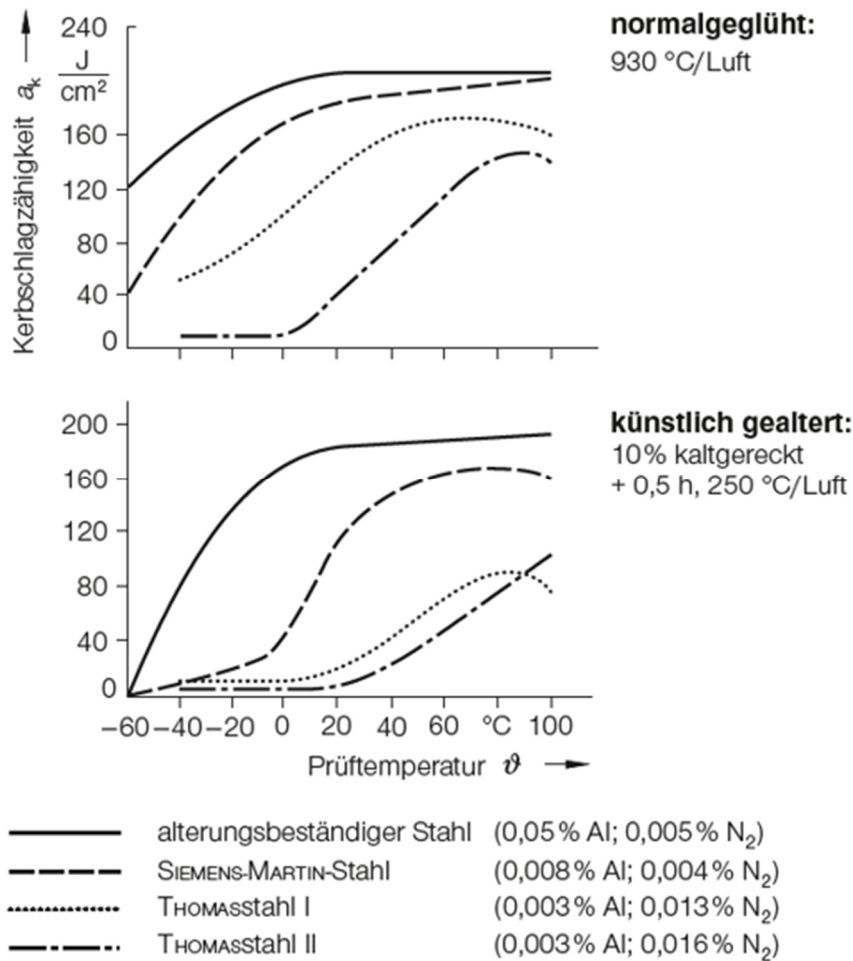


Abbildung 3-10: Einfluss der Alterungserscheinungen und der Erschmelzungsmethode auf die Kerbschlagzähigkeit¹³⁹

Abbildung 3-10 zeigt den Einfluss der Alterungserscheinungen und des Erschmelzungsverfahrens auf die Kerbschlagzähigkeit. Es zeigt sich u.a., dass der Thomas Stahl schon bei Raumtemperatur nur mehr eine geringe Kerbschlagzähigkeit besitzt.

3.2.3 Ergebnisse und Diskussion

Chemische Zusammensetzung

Zunächst wird die chemische Zusammensetzung des Altstahls ermittelt. Da diese Analyse bereits in der Literatur aufscheint, wird in der vorliegenden Arbeit auf diese Werte zurückgegriffen. Wie der Tabelle 3-2 zu entnehmen ist, werden 3 Proben untersucht. Der

¹³⁹ (Bargel, et al., 2008 S. 158)

Kohlenstoffgehalt liegt bei 0,025 % bis 0,041 %. Somit ist eine Schweißung ohne Vorwärmen und Nachbehandeln möglich. Es ist zu erkennen, dass der Phosphor und der Schwefel Gehalt des Altstahls erhöht ist. Dies ist wie bereits oben erwähnt, auf den Herstellungsprozess zurückzuführen. Aus schweißtechnischer Sicht ist auf diese Werte ein besonderes Augenmerk zu legen. Da die restlichen Werte der chemischen Zusammensetzung, im Bereich des S235 JR liegen, wird dieser Werkstoff als Vergleichswerkstoff definiert. Weiters ist zu erkennen, dass nahezu kein Silizium vorhanden ist. Diese Tatsache war zu erwarten, da Silizium, wie bereits oben erwähnt, zum Beruhigen der Schmelze eingesetzt wird. Daraus folgt der erste Indikator, dass es sich beim Altstahl um einen unberuhigt vergossenen Stahl handelt.

Tabelle 3-2: Vergleich der chemischen Zusammensetzung des Altstahls mit dem Vergleichswerkstoff S235 JR^{140;141}

	Kohlenstoff [%]	Silizium [%]	Mangan [%]	Phosphor [%]	Schwefel [%]
Probe 1	0,025	<0,001	0,312	0,042	0,047
Probe 2	0,032	<0,001	0,325	0,05	0,062
Probe 3	0,041	<0,001	0,361	0,043	0,045
Mittelwert	0,033	<0,001	0,333	0,045	0,051
S235 JR	<0,17	k. A.	<1,4	<0,035	<0,035

Aus den erhaltenen Werten aus Tabelle 3-2 kann nun das Kohlenstoffäquivalent (CEV) nach EN 1011 ermittelt werden. Es gibt Aufschluss über die Schweißbarkeit eines Stahles. Formel (8) zeigt die Berechnung des CEV. Wie zu erkennen ist hat der Kohlenstoff (C) den größten Einfluss auf die Schweißbarkeit. Liegt der erhaltene Wert des CEV unter 0,5 so gilt der Stahl als gut schweißgeeignet.¹⁴²

¹⁴⁰ (Streitt, et al., 2016 S. 59)

¹⁴¹ (ÖNORM EN 10025-2: 2011 06 01, 2011)

¹⁴² (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 246)

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (8)$$

Somit ergibt sich für den Altstahl folgendes Kohlenstoffäquivalent:

$$CEV = 0,033 + \frac{0,333}{5} = 0,1$$

Somit gilt der Stahl mit einem CEV Wert von 0,1 als gut schweißgeeignet.

Baumannabdruck

Aufgrund der Literaturrecherche und der chemischen Analyse lässt sich vermuten, dass es sich beim hier untersuchten Brückenstahl um einen unberuhigt vergossenen Stahl handelt. Dies kann mit dem Baumannabdruck validiert werden. Abbildung 3-11 zeigt Baumannabdrücke des Plattenmaterials und des Winkelmaterials der Brücke (wie bereits auch in Abbildung 3-3 gezeigt).

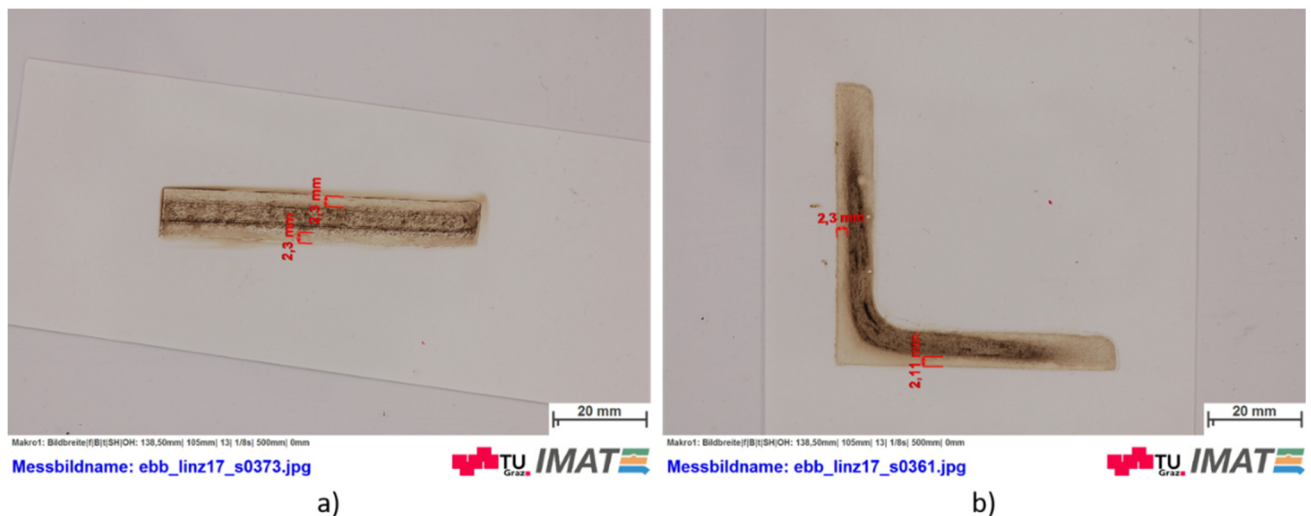


Abbildung 3-11: a) Baumannabdruck Plattenmaterial mit Speckschichtbemaßung; b) Baumannabdruck Winkelmaterial mit Speckschichtbemaßung

Die in Abbildung 3-11 a) und b) dargestellten Baumannabdrücke zeigen den schichtweisen Aufbau von unberuhigt vergossenen Stählen. Die dunklen Bereiche stellen die seigerungsreiche Kernzone, die Blockseigerung, dar. Da es sich beim Baumannabdruck um einen Schwefelabdruck handelt, zeigen die Bilder die Verteilung der Schwefelseigerung.

gen. Weiters wird in den Bildern jeweils die Dicke der Speckschicht ermittelt. Diese beträgt im Mittel 2,3mm. Dieser Wert liegt unter den Werten der Referenzliteratur. In dieser wurde, im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit, Doppel T Träger untersucht.¹⁴³

In der vorliegenden Arbeit wird für die weiteren Schweißversuche eine Speckschichtdicke von 2,3 mm angenommen. Alle Bilder zur Speckschichtdickenstudie sind dem Anhang B zu entnehmen.

Des Weiteren ist in Abbildung 3-11 a) ein deutlich dunkler Streifen im Übergangsbereich von der Speckschicht zur seigerungsreichen Kernzone zu erkennen. Die starke dunkle Färbung deutet auf eine hohe Schwefelkonzentration hin. Zu dieser Erscheinung kommt es, da in diesem Bereich ein Porenband vorliegt, in das sich der Schwefel leichter anreichern kann, als in anderen Bereichen des Querschnitts.

Aufgrund der negativen Auswirkungen des Schwefels auf die Schweißbarkeit wird ein Parametersetup gewählt, bei dem der Einbrand nicht über die Speckschicht hinausgeht, respektive wird ein Schweißzusatz gewählt, der die Seigerungen in einem gewissen Maß binden kann. Diese Eigenschaft trifft im Allgemeinen auf basische Zusätze zu.

Heyn Ätzung

Weiters wird zur Darstellung der Phosphor- und Schwefelverteilung eine Ätzung nach Heyn durchgeführt. In Abbildung 3-12 ist, wie auch schon bei den Baumannabdrücken, der schichtweise Aufbau des Querschnitts zu erkennen. In den Randzonen (den Speckschichten) zeigt sich eine deutlich hellere Färbung als im Porenband und im Bereich der Blockseigerung. Dies liefert eine Bestätigung der Ergebnisse der Baumannabdrücke.

¹⁴³ (Lüddecke, 2006 S. 40)

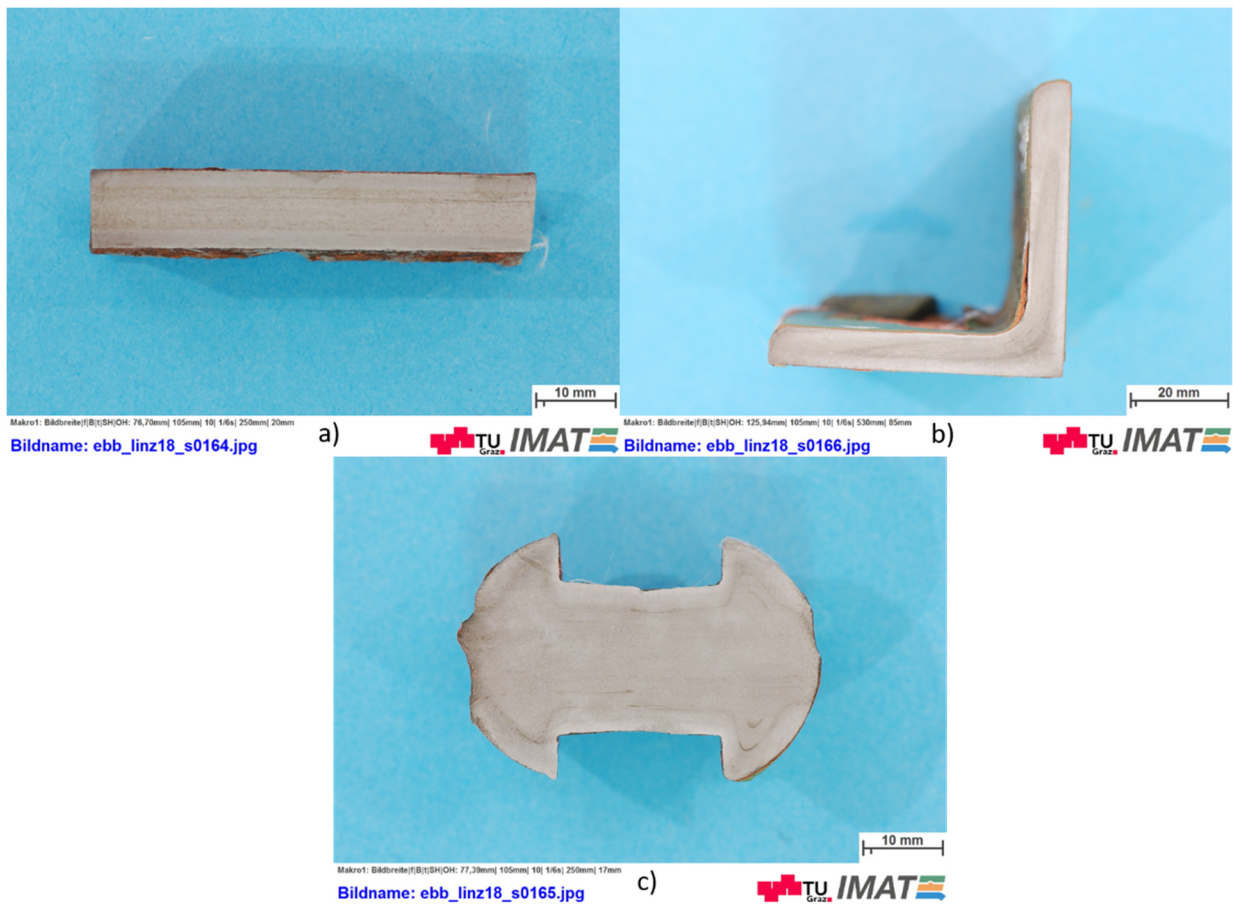


Abbildung 3-12: Heyn Ätzung; a) Plattenmaterial (PI3_o_2_BM1); b) Winkelmaterial (WI1_1); c) Niet (PL3_3_2)

Nital Ätzung

Als nächster Schritt wird eine Mikroanalyse mittels Nital- und Klemm Ätzung durchgeführt.

Abbildung 3-13 zeigt den Vergleich der drei charakteristischen Lagen eines unberuhigt vergossenen Stahles mittels Nital Ätzung. Die hierfür verwendeten Proben werden aus dem Plattenmaterial entnommen.

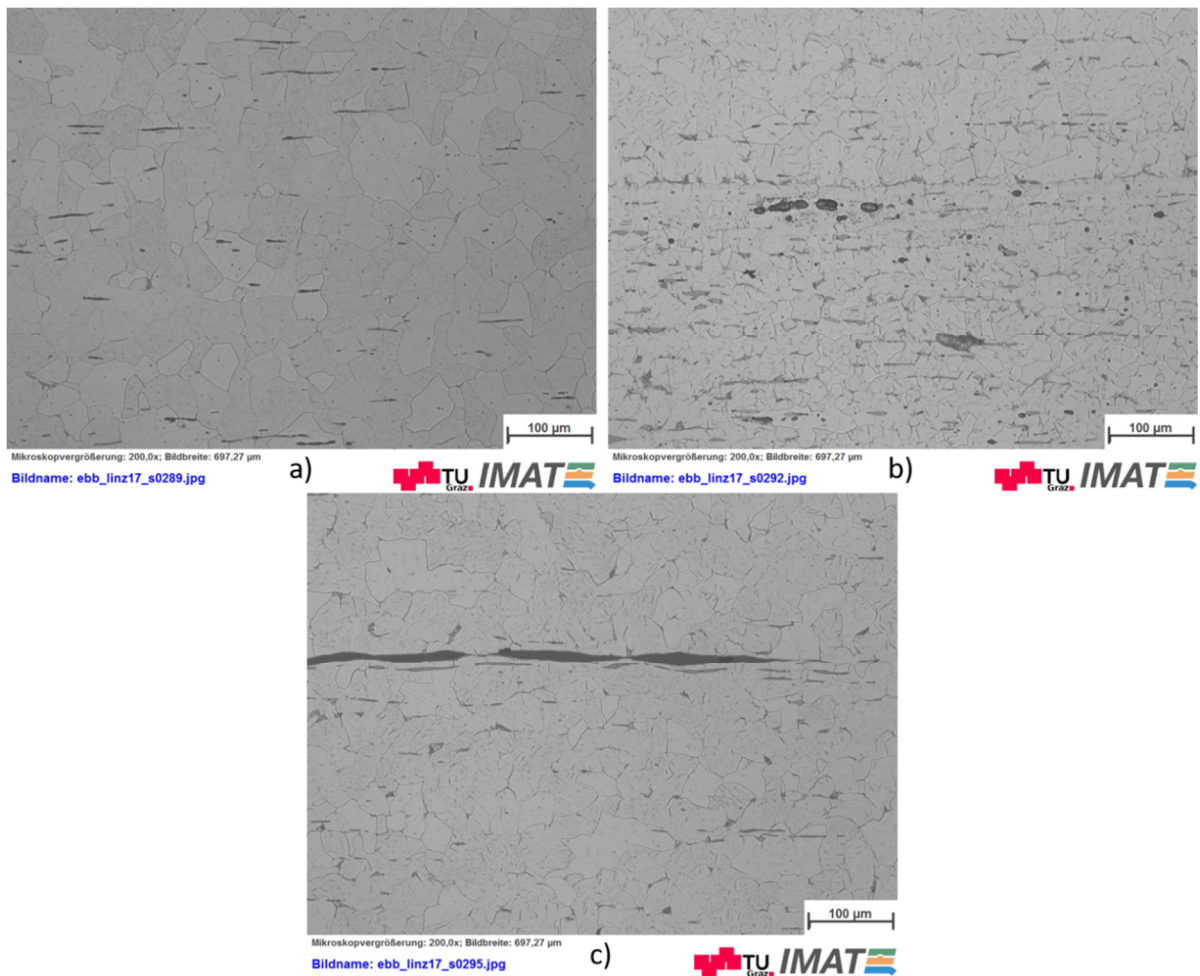


Abbildung 3-13: Plattenmaterial (PL3_o_2_Ni1) - 3 % Nital Ätzung a) Speckschicht; b) Porenband; c) Seigerungszone

In Abbildung 3-13 a) ist die Mikrostruktur der Speckschicht mittels Nital Ätzung zu sehen. Man sieht, dass die Speckschicht ein gleichmäßiges ferritisches Gefüge aufweist. An manchen Stellen sind jedoch auch hier, in der seigerungsarmen Speckschicht, die zeilenförmigen Mangansulfid Einschlüsse zu sehen. Abbildung 3-13 b) zeigt das Porenband. Hier sieht man, dass die Korngröße im Vergleich zur Speckschicht, geringer ist. Weiters sind die rundlich ausgeformten Poren zu sehen, welche sich beim Vergussprozess bilden. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der Seigerungsanteil in dieser Zone deutlich größer ist als jener in der Speckschicht und auch als in der Seigerungszone selbst. Abbildung 3-13 c) zeigt die Seigerungszone. Das Gefüge besteht hier wieder aus einer ferritischen Struktur. Die Verschmutzung ist in diesem Bereich jedoch höher als die in der Speckschicht. Weiters ist in der Mitte des Querschnitts eine ausgeprägte Ansammlung aus einem ausgewalzten Mangansulfid zu erkennen.

In Abbildung 3-14 ist eine Gegenüberstellung der Speckschicht des Winkelmaterials und des Plattenmaterials dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die beiden Mikrostrukturen voneinander unterscheiden. Die Korngröße ist zwar in beiden Proben in etwa ähnlich (ca. 50 – 100 μm), der Verschmutzungsgrad ist im Winkelmaterial jedoch größer als im Plattenmaterial. Weiters ist zu sehen, dass im Winkelmaterial keine zeilenförmigen Mangansulfide vorhanden sind. Dies kann walztechnische Gründe haben. Diese Gegenüberstellung untermauert die Theorie, dass es sich beim Plattenmaterial und beim Winkelmaterial um verschiedene Werkstoffe handeln kann.

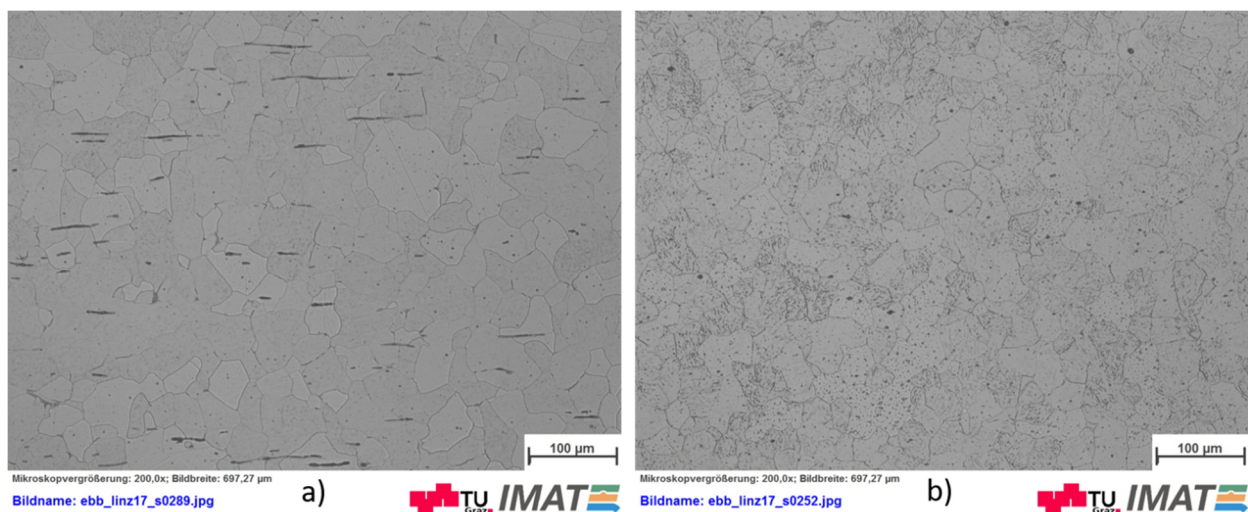


Abbildung 3-14: Vergleich der Speckschichten - 3% Nital Ätzung: a) Plattenmaterial (PL3_o_2_NI1), b) Winkelmaterial (WL1_2_NI1)

Klemm Ätzung

Da mittels der Nital Ätzung und des Baumannabdruckes nur die Schwefelverteilung und die Mikrostruktur dargestellt werden kann, wird mittels Klemm Ätzung die Phosphorverteilung dargestellt. Weiters gibt diese Art der Ätzung die Mikrostruktur als Farbbild wieder.

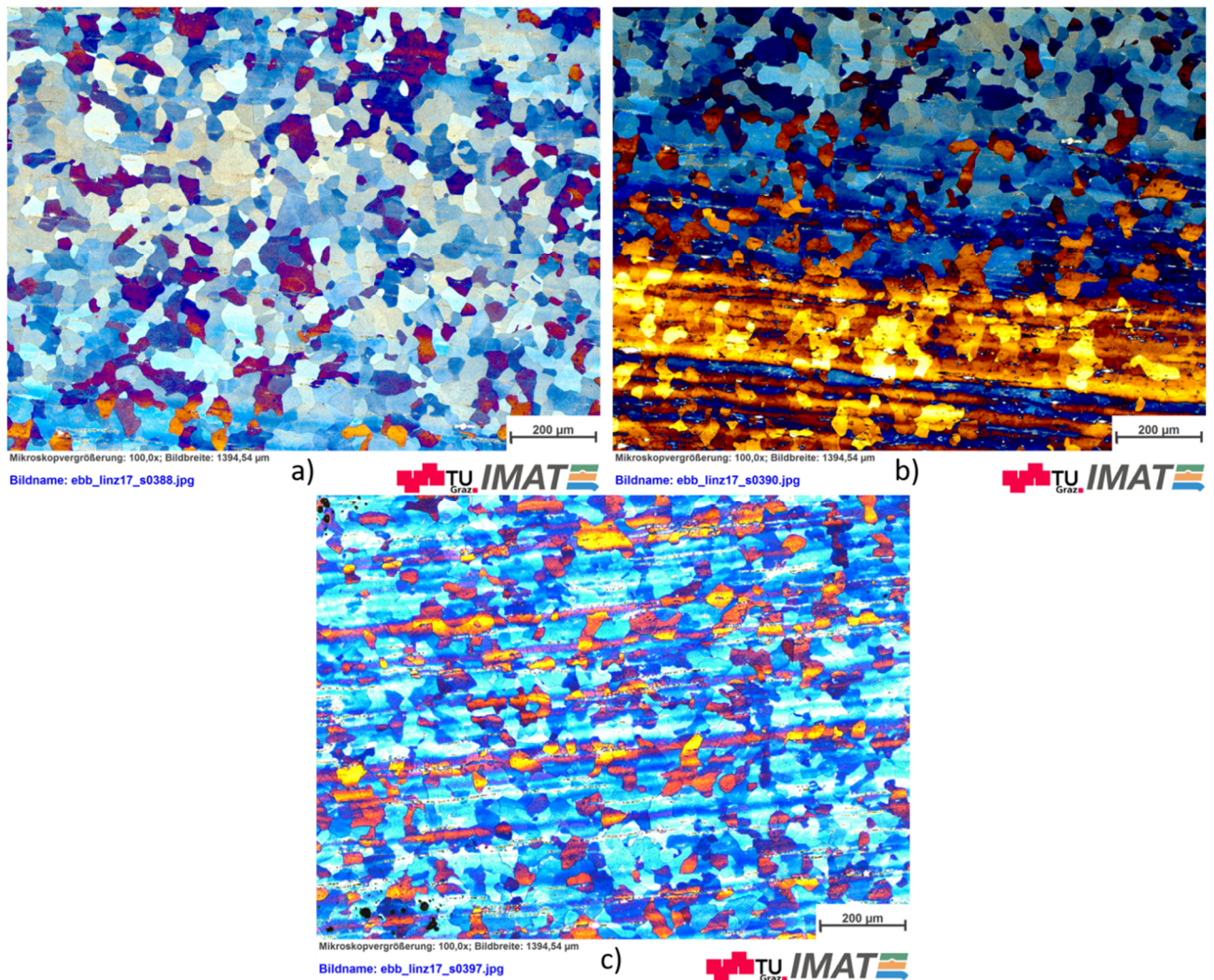


Abbildung 3-15: Plattenmaterial (PI3_o_2_KI) - Klemm Ätzung a) Speckschicht; b) Porenband; c) Seigerungszone

Abbildung 3-15 zeigt die Gegenüberstellung der drei Querschnittsbereiche des Plattenmaterials. Wie bereits oben erwähnt stellen die orangen Schleier Bereiche mit höherer Phosphor Konzentration dar. Diese sind im Porenband stark ausgeprägt. Auch die Seigerungszone weist einen gewissen Anteil an Phosphor auf. In der Speckschicht ist dieser jedoch nur vereinzelt zu erkennen.

EDX Analyse und Mikrohärt

Zur Abklärung um welche Art von Seigerungen es sich in den verschiedenen Zonen handelt, wird eine EDX Analyse durchgeführt.

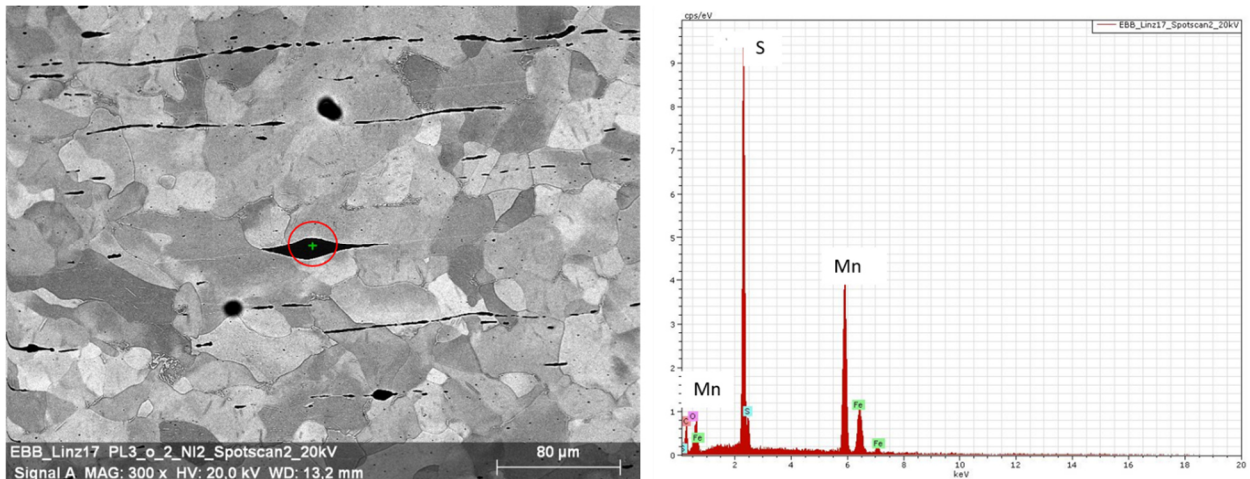


Abbildung 3-16: Plattenmaterial (PL3_o_2_Ni2) - EDX Analyse „Speckschicht“

Abbildung 3-16 zeigt die EDX Analyse einer Seigerung im Plattenmaterial. Diese Art der Seigerung kommt sehr häufig in allen Querschnittszonen vor, vor allem aber im Porenband und in der Seigerungszone. Wie zu erkennen ist, handelt es sich hier um einen ausgewalzten Einschluss aus Mangansulfid. Dies ist im Altstahl zu erwarten und stellt hier keine Überraschung dar.

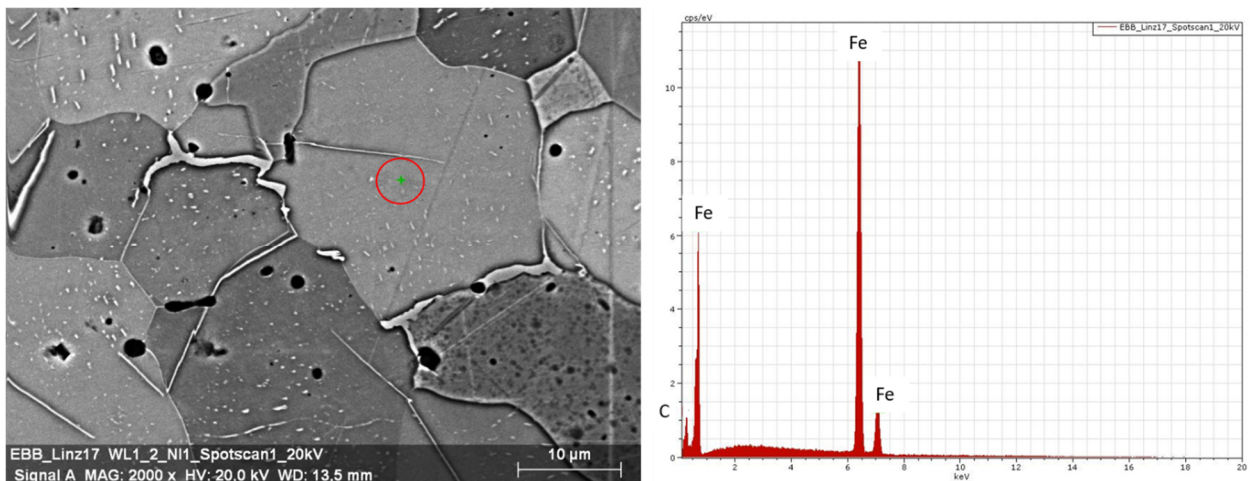


Abbildung 3-17: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - EDX Analyse Referenzmessung am Ferritkorn „Speckschicht“

Abbildung 3-17 zeigt die EDX Analyse des Winkelmaterials. Zur Referenzmessung wird hier zunächst ein ferritisches Korn analysiert.

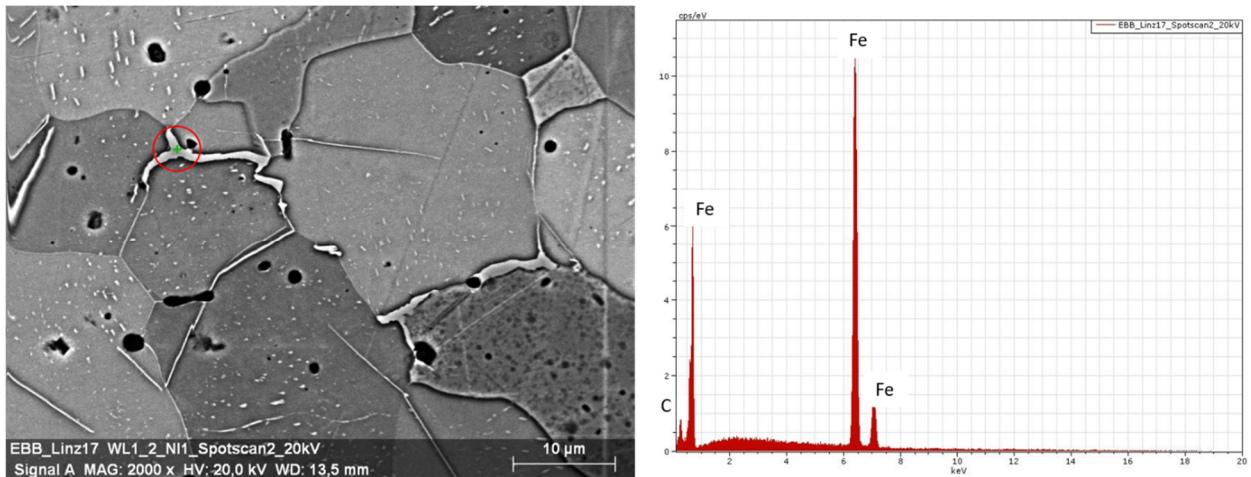


Abbildung 3-18: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - EDX Analyse Messung der Korngrenzenanreicherung „Speckschicht“

In einem weiteren Schritt wird in Abbildung 3-18, im selben Querschnittsbereich eine Seigerung identifiziert die hier so nicht zu erwarten ist. Laut EDX Analyse handelt es sich hierbei um Zementit der sich im Korngrenzenbereich angelagert hat. Da der Kohlenstoff jedoch mittels EDX nur sehr mangelhaft nachgewiesen werden kann, wird an einer vergleichbaren Stelle eine Mikrohärteprüfung durchgeführt.

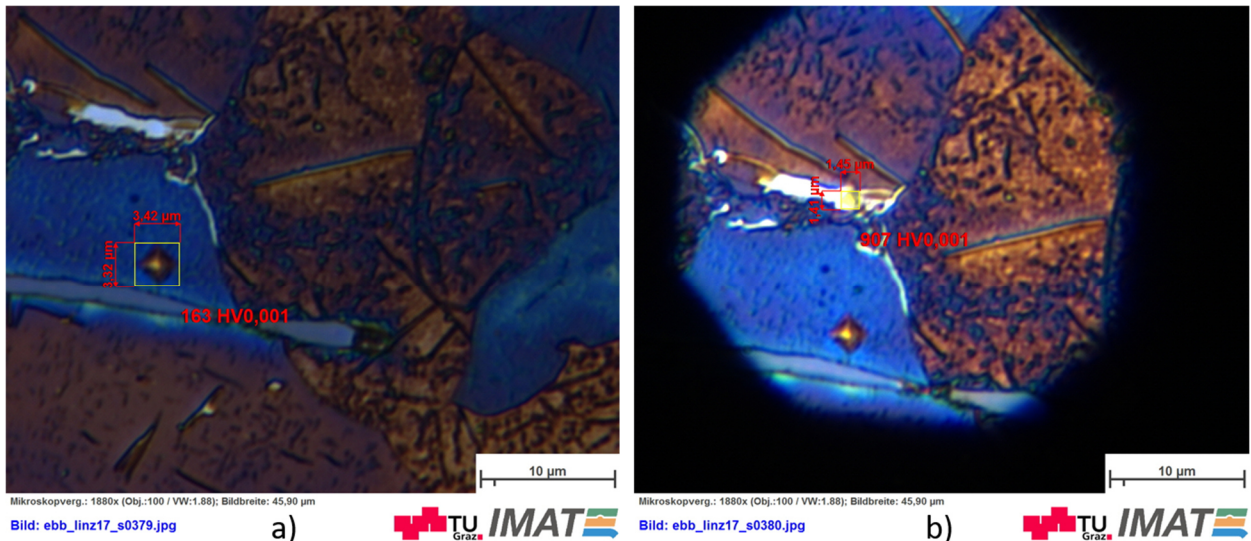


Abbildung 3-19: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - Mikrohärtemessung a) Referenzmessung am Ferritkorn; b) Messung der Korngrenzenanreicherung „Speckschicht“

Zur Messung der Mikrohärte wird wie in Abbildung 3-19 dargestellt, zunächst eine Referenzmessung im Ferritkorn durchgeführt. Der erhaltene Wert liegt mit 163 HV0,001 im

typischen Bereich der Ferrithärte. In einem weiteren Schritt wird nun die Härte des potentiellen Zementits ermittelt. Diese beträgt 907 HV0,001 und ist somit deutlich härter als das Ferritkorn. Die hohe Härte und die EDX Analyse zusammen lassen darauf schließen, dass es sich bei den Anreicherungen an den Korngrenzen wirklich um Zementit handeln kann. Dieser Umstand wird in der Arbeit jedoch nicht weiter verfolgt.

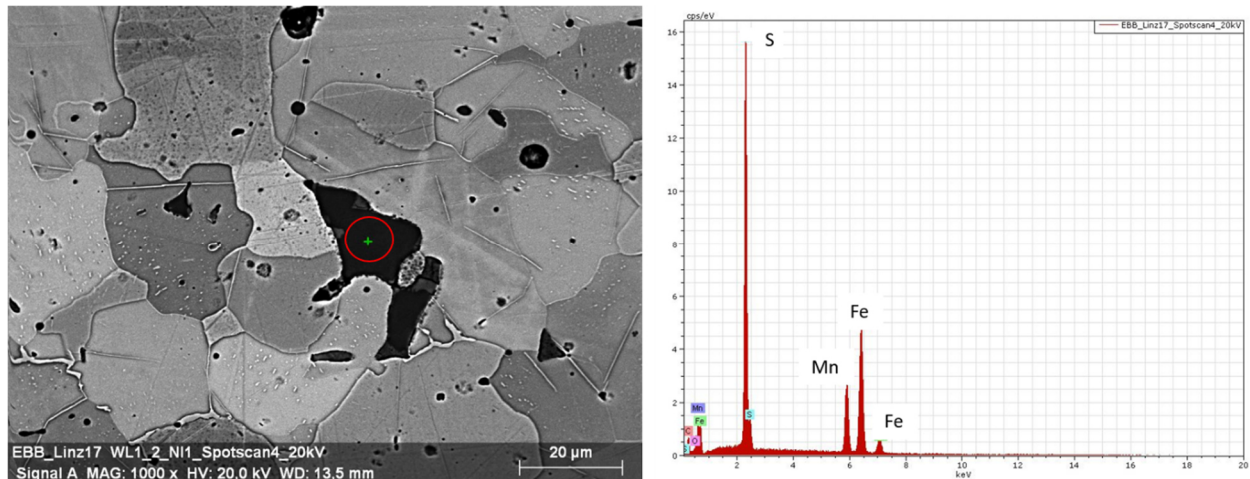


Abbildung 3-20: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - EDX Analyse Messung einer charakteristischen Seigerung „Speckschicht“

Weiters wird wie in Abbildung 3-20 dargestellt, die EDX Analyse an einer charakteristischen Seigerung durchgeführt. Wie sich zeigt besteht diese zu einem großen Teil aus Schwefel, hinzu kommen noch Eisen und Mangan. Diese Art der Seigerung war, wie auch die Mangansulfide in Abbildung 3-16, zu erwarten.

Dem Anhang C sind alle weiteren EDX Analysen zu entnehmen.

3.2.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es sich beim vorliegenden Material, wie vermutet um unberuhigt vergossenen Stahl handelt. Weiters ist zu sehen, dass sich der Querschnitt aus drei charakteristischen Bereichen aufbaut und die voneinander zu unterscheiden sind. Der Bereich mit dem größten Anteil an Seigerungen ist jedoch nicht der Seigerungsbereich, sondern bereits das Porenband. Dieses trennt die Speckschicht von der Seigerungszone und darf mit normalem Schweißzusatz nicht angeschmolzen werden. Es besteht hier jedoch die Möglichkeit einen basischen Schweißzusatz zu verwenden. Eine weitere Erkenntnis in Bezug auf den Stahl ist, dass die Möglichkeit besteht, dass es sich beim Plattenmaterial und beim Winkelmaterial um verschiedene Stahlsorten

handeln kann. Dies zu verifizieren würde jedoch eine tiefere Betrachtung des Materials zur Folge haben. Aufgrund des begrenzten Probenmaterials wird dies in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht. Eine weitere wichtige Erkenntnis in Bezug auf die Schweißversuche ist, dass die Zusammensetzung des Stahles sehr ähnlich eines S235JR ist. Somit ist dieser Werkstoff, in Bezug auf die chemische Analyse, als Vergleichswerkstoff für die schweißtechnischen Vorversuche geeignet. Ein Vergleichswerkstoff ist aus dem Grund nötig, da nur eine sehr begrenzte Menge an Altstahl zur Verfügung gestanden hat.

3.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Im Folgenden werden die mechanischen Eigenschaften des Altstahls bestimmt und mit einem modernen Baustahl (S235JR) in Relation gesetzt. Wegen der nachfolgenden Schweißversuche, sollen hier vor allem die Härte, die Streckgrenze und die Kerbschlagarbeit untersucht werden. Der Vergleich mit dem modernen Baustahl, findet aus dem Grund statt, um zu zeigen, dass die Schweißvorversuche mit diesem durchgeführt werden können.

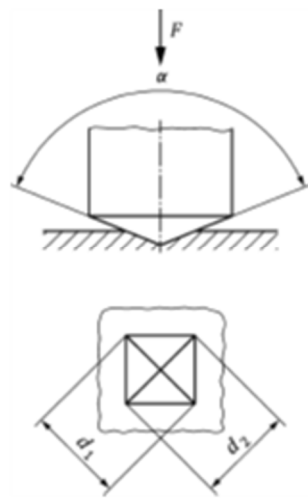
3.3.1 Methoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Im folgenden Kapitel wird kurz auf die verwendeten Methoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften eingegangen. Des Weiteren werden die hierzu verwendeten Maschinen und die werkstoffkundlichen Mechanismen erklärt.

3.3.1.1 Härtemessung

In der vorliegenden Arbeit wird das Härteprüfverfahren nach Vickers angewendet. Bei diesem Verfahren dient eine Diamantpyramide als Eindringkörper. Diese Pyramide besitzt eine quadratische Grundfläche. Der Eindringkörper wird mit einer definierten Prüfkraft und unter 90° in das Werkstück gedrückt und diese Kraft 10 bis 15 s lang aufrechterhalten. Die Auswertung erfolgt über die Messung der Diagonalen des Eindrucks. Abbildung 3-21 zeigt das Prüfprinzip der Vickers Härtemessung.¹⁴⁴

¹⁴⁴ (ÖNORM EN ISO 6507-1: 2016 08 15, 2016)



- α Winkel der Pyramidenspitze (136°)
- F Prüfkraft [N]
- d_1, d_2 Eindruckdiagonalenlängen [m]
- d Arithmetischer Mittelwert der beiden Eindruckdiagonalenlängen (d_1, d_2) [m]
- g Erdbeschleunigung $g=9,80665$ [m/s²]

Abbildung 3-21: Prüfprinzip Vickers Härtemessung¹⁴⁵

Die Ermittlung der Härtewerte erfolgt über die gemessene Eindruckdiagonalen mit der Formel (9).¹⁴⁶

$$\begin{aligned}
 HV &= \frac{F \text{ [kgf]}}{\text{Oberfläche des Eindrucks [mm}^2\text{]}} = \\
 &= \frac{1}{g} * \frac{F \text{ [N]}}{\text{Oberfläche des Eindrucks [mm}^2\text{]}} = \frac{1}{g} * \frac{F}{d^2 / 2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \quad (9) \\
 &= \frac{1}{g} * \frac{2F \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2}
 \end{aligned}$$

Da die Härteprüfung nach Vickers mit unterschiedlichen Prüfkraften und Einwirkzeiten durchgeführt werden kann, ist die Bezeichnung von Härtewerten nach Vickers wie in Abbildung 3-22 dargestellt geregelt.

¹⁴⁵ (ÖNORM EN ISO 6507-1: 2016 08 15, 2016)

¹⁴⁶ (ÖNORM EN ISO 6507-1: 2016 08 15, 2016)

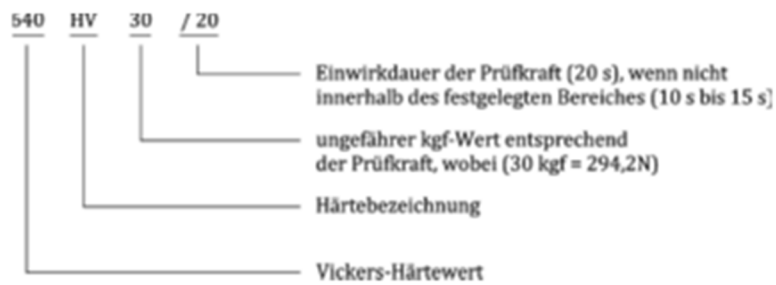


Abbildung 3-22: Bezeichnungsbeispiel Härte nach Vickers¹⁴⁷

In der vorliegenden Arbeit werden sowohl Makro- als auch Mikrohärtmessungen als auch Mikrohärtmessungen durchgeführt. Die hierfür verwendeten Maschinen werden in Tabelle 3-3 aufgelistet.

Tabelle 3-3: Härtemesseinrichtungen

Art der Härtemessung	Messeinrichtung
Mikrohärte	Anton Paar / MHT-4 Microhardenes Tester
Makrohärte	Emco Test / M4C 025 63M

3.3.1.2 Kerbschlagbiegeversuch

Beim Kerbschlagbiegeversuch wird eine gekerbte Probe unter definierten Bedingungen, bei schlagender Beanspruchung, zerstört. Die Probe wird in die Prüfmaschine eingelegt und von einem Pendelhammer, mit konstantem Gewicht und von definierter Höhe, mit einem Hieb zerstört. Die Form der Probe wird in der Norm exakt definiert, damit die Messergebnisse verglichen werden können. Zur Prüfung der Kerbschlagarbeit wird in der vorliegenden Arbeit als Kerbgeometrie die V-Kerbe nach Charpy mit einem 2 mm Finnenradius verwendet. Abbildung 3-23 zeigt die verwendete Form der Kerbschlagprobe. Die Kerbprobe muss so in die Prüfmaschine eingelegt werden, dass der Pendelhammer die Probe genau mittig auf der Rückseite des Kerbes durchschlägt. Durch diese Prüfung wird der Widerstand ermittelt, den die Probe dem Pendelhammer entgegensetzt. Somit ergibt sich als Maß für die absorbierte Arbeit der Wert für die Kerbschlagarbeit. Weiters lässt die erfolgte plastische Verformung eine Aussage über die Kerbzähigkeit zu. Eine

¹⁴⁷ (ÖNORM EN ISO 6507-1: 2016 08 15, 2016)

weitere Aussage kann über das Aussehen der Bruchflächen getätigt werden. Hier wird der kristalline Anteil der Bruchfläche abgeschätzt.¹⁴⁸

Abbildung 3-23 zeigt den schematischen Aufbau des Kerbschlagbiegeversuches.

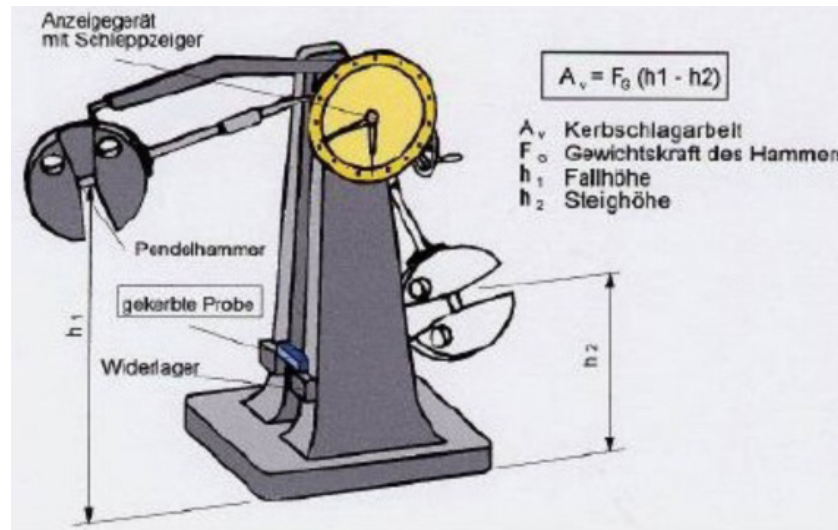


Abbildung 3-23: Schematischer Aufbau einer Kerbschlagbiegeprüfung¹⁴⁹

Wird die Messung der Kerbschlagarbeit des selben Stahles bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, so erhält man ein Diagramm, welches Aufschluss über die Zähigkeit des Stahles bei gewissen Temperaturen gibt. Der Stahlhersteller muss die Kerbschlagarbeitswerte bei definierten Temperaturen nachweisen, daher wird der Stahlbezeichnung auch ein Kürzel angehängt welches zeigt, welche Kerbschlagarbeit bei welcher Temperatur erreicht wird, siehe hierfür Tabelle 3-4. Wobei das Kürzel JR für eine garantierte Mindestkerbschlagarbeit von 27 J bei einer Prüftemperatur von 20 °C steht.^{150;151}

¹⁴⁸ (ÖNORM EN ISO 148-1: 2010 12 01, 2010)

¹⁴⁹ (<https://www.swissbeam.ch/dienstleistungen/pruefungen/kerbschlagbiegeversuch/>)

¹⁵⁰ (ÖNORM EN ISO 148-1: 2010 12 01, 2010)

¹⁵¹ (ÖNORM EN 10027-1: 2016 12 01, 2016)

Tabelle 3-4: Kurzzeichen für Prüftemperatur und Kerbschlagarbeit¹⁵²

Kerbschlagarbeit [J]			Prüftemperatur
27 J	40 J	60 J	°C
JR	KR	LR	+20
J0	K0	L0	0
J2	K2	L2	-20
J3	K3	L3	-30

Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Prüfeinrichtung wird in Tabelle 3-5 angeführt.

Tabelle 3-5: Verwendete Kerbschlagbiege-Prüfeinrichtung

Messverfahren	Messeinrichtung
Kerbschlagbiegeversuch	W Testor PW 30 / 15

3.3.1.3 Zugversuch

Beim Zugversuch wird eine Probe mit einer Zugbeanspruchung beaufschlagt, bis ein Bruch eintritt. Die Prüftemperatur ist im Allgemeinen die Raumtemperatur, sofern nicht etwas Anders festgelegt wurde. Eine definierte genormte Probe wird in die Prüfeinrichtung eingespannt und mit konstanter Geschwindigkeit gedehnt. Im Zuge dieser Dehnung wird die Kraft und die Dehnung aufgezeichnet und in einem Diagramm dargestellt. Da sowohl die Ausgangslänge des Prüfbereiches als auch der Ausgangsquerschnitt gegeben sind, kann mittels dieses Diagramms auf verschiedene Werte geschlossen werden.

Abbildung 3-24 zeigt ein schematisches Spannungs-Dehnungs Diagramm, welches als Ergebnis eines Zugversuches geplottet wird. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem die Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung von Bedeutung.

¹⁵² (ÖNORM EN 10027-1: 2016 12 01, 2016)

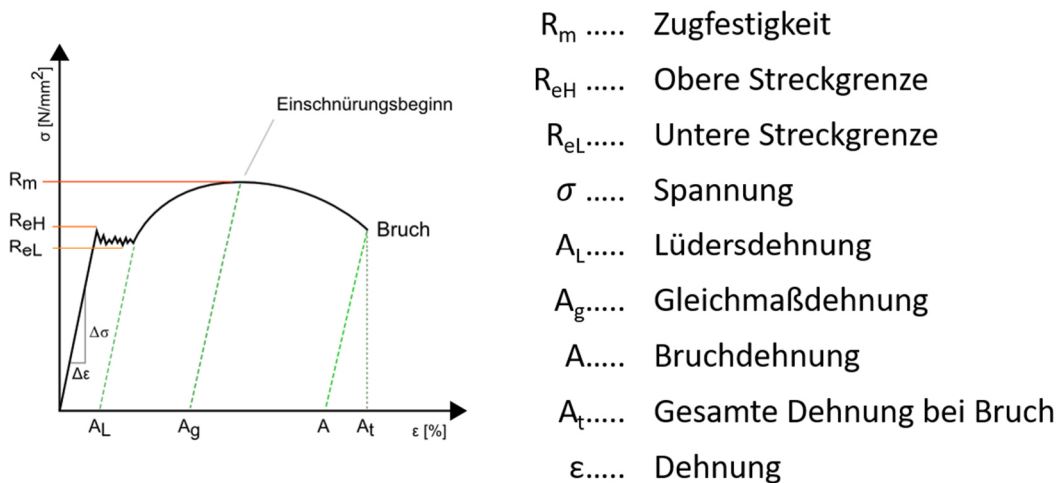


Abbildung 3-24: Technisches Spannungs- Dehnungs Diagramm¹⁵³

Die Streckgrenze ist jene Spannung, bis zu der ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung besteht. Die Dehnung ist bis zur Streckgrenze elastisch. Im Bereich zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit bzw. zwischen Lüdersdehnung und Gleichmaßdehnung findet plastische Verformung statt. Die Zugfestigkeit ist jene Spannung, ab welcher eine Einschnürung stattfindet. Da im Bereich nach der Zugfestigkeit die Einschnürung eine Querschnittsabnahme zur Folge hat, sinkt nun die Spannung bis zum Eintreten des Bruches. Die Dehnung, die das Probestück nach dem Bruch aufweist, wird Bruchdehnung genannt.¹⁵⁴

3.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Härtemessung

Zunächst wird eine Härtemessung an dem Plattenmaterial (PL3_o_2_NI1) und am Winkelmaterial (WL1_2_NI2) durchgeführt. Mit den hier erhaltenen Werten wird sowohl die Härte als auch die Zugfestigkeit des Stahls abgeschätzt um einen ungefähren Anhaltspunkt zu erhalten mit welchem modernen Stahl verglichen werden kann. Die Härtemessung wird repräsentativ an zwei Proben durchgeführt. Hierbei handelt es sich um die Proben aus einer Platte (PL3_o_2_NI1) und dem Winkelmaterial (WL1_2_NI2). Es werden jeweils 3 Härteeindrücke gemacht.

¹⁵³ (<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/25-spannungs-dehnungs-diagramm>)

¹⁵⁴ (ÖNORM EN ISO 6892-1: 2017 02 01)

Tabelle 3-6: Plattenmaterial (PL3_o_2_NI1) - Härtewerte

PL3_o_2_NI1		
Nummer	Position im Querschnitt	Härte HV10
1	Speckschicht (oben)	138
2	Seigerungszone	132
3	Speckschicht (unten)	135
Mittelwert:		135

Tabelle 3-7: Winkelmaterial (WL1_2_NI2) Härtewerte

WL1_2_NI2		
Nummer	Position im Querschnitt	Härte HV10
1	Speckschicht (oben)	98
2	Seigerungszone	112
3	Speckschicht (unten)	92
Mittelwert:		101

Aus Tabelle 3-6 und Tabelle 3-7 ist zu erkennen, dass die Härte des Winkelmaterials, vor allem in der Speckschicht, deutlich geringer ist als die des Plattenmaterials. Die Härtewerte entsprechen jedoch den Werkstoffdaten des Vergleichswerkstoffes S235JR.¹⁵⁵

Hinsichtlich Kaltrissanfälligkeit gelten Werkstoffe mit Härtewerten unter 350 HV als gut schweißgeeignet. Somit ist aus den Tabellen 3-6 und 3-7 zu erkennen, dass aufgrund der Härtewerte eine gute Schweißseignung vorliegt.

¹⁵⁵ (Werkstoffdatenblatt S 235 JR)

Tabelle 3-8: Härte- und Zugfestigkeitsvergleich, S235 JR und Altstahl^{156,157}

S235 JR			Altstahl	
Brinellhärte [HB]	Vickershärte [HV10]	Zugfestigkeit [MPa]	Vickershärte [HV10]	Zugfestigkeit [MPa]
80 - 150	84 - 158	360 - 510	101 bzw. 135	322 bzw. 430

In Tabelle 3-8 sind die Werkstoffkennwerte aus dem Werkstoffdatenblatt eines S235JR gezeigt. Diese werden anhand der Norm ISO 18265 in Vickers Werte umgerechnet um einen Vergleich zu ermöglichen. Anhand der selben Norm werden auch die erhaltenen Härtewerte in Werte für die Zugfestigkeit umgerechnet. Diese Werte dienen zur Abschätzung der Größenordnung und stellen somit nur einen Anhaltswert dar. Wie zu erkennen ist, liegt der abgeschätzte Zugfestigkeitswert der Platte im vorgegebenen Bereich, der Zugfestigkeitswert des Winkels fällt hingegen aus dem Bereich heraus. Die, in Tabelle 3-8 hervorgehobenen Werte, dienen als Ausgangswerte für die Umrechnung.¹⁵⁸

Kerbschlagbiegeversuch

Als nächster Schritt wird ein Kerbschlagbiegeversuch durchgeführt. Hierfür werden fünf Versuchsserien gemacht. Der Versuch wird mit Untermaßproben nach Abbildung 3-25 und Tabelle 3-9 durchgeführt. Somit müssen die erhaltenen Werte, nach Gleichung (10), linear errechnet werden um repräsentative Werte zu erhalten. Die Probenentnahme ist dem Anhang A zu entnehmen.

¹⁵⁶ (Werkstoffdatenblatt S 235 JR)

¹⁵⁷ (ÖNORM EN ISO 18265: 2013 12 01, 2013)

¹⁵⁸ (ÖNORM EN ISO 18265: 2013 12 01, 2013)

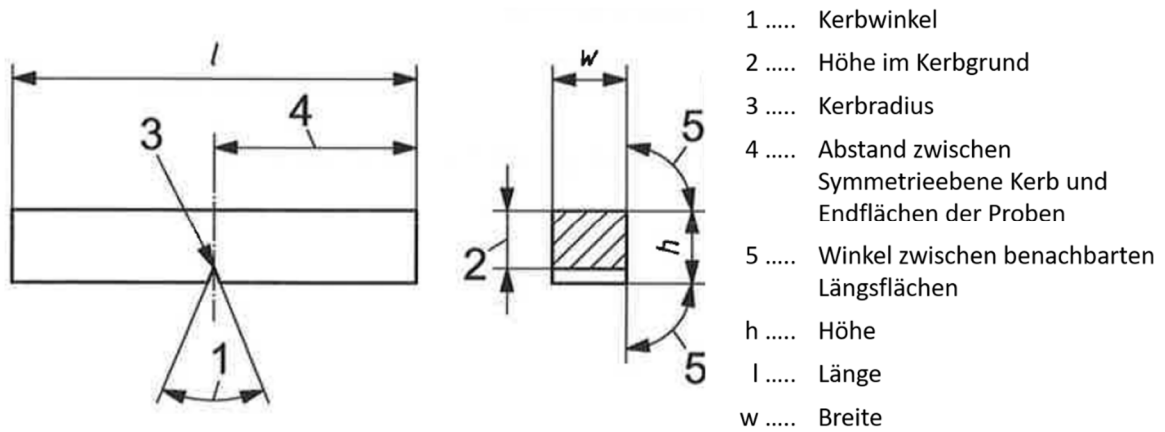


Abbildung 3-25: Kerbschlagprobe¹⁵⁹

Tabelle 3-9: Maße für Kerbschlagbiegeprobe¹⁶⁰

Symbol	Wert
1	45°
2	8 mm
3	0,25 mm
4	27,5 mm
5	90 °
h	10 mm
l	55 mm
w	7,5 mm

¹⁵⁹ (ÖNORM EN ISO 148-1: 2010 12 01, 2010)

¹⁶⁰ (ÖNORM EN ISO 148-1: 2010 12 01, 2010)

$$AV_v = \frac{AV_g}{A_{0,75}} * A_{10} \quad (10)$$

AV_v ... Kerbschlagarbeit Vergleichswert

AV_g ... Kerbschlagarbeit gemessen

A_{10} ... Querschnitt Normalprobe = 100 mm²

$A_{0,75}$... Querschnitt Untermaßprobe = 75 mm²

Die Mittelwerte aus dem Kerbschlagbiegeversuch (drei Proben je Material) sind Tabelle 3-10 zu entnehmen. Die genauen Versuchsdaten sind im Anhang D ersichtlich.

Tabelle 3-10: Mittelwerte aus Kerbschlagbiegeversuch

Probenbezeichnung	Mittelwert AV_g [J]	Mittelwert AV_v [J]
WL1_2_KB_1-3	32,5	43,3
PL3_o_2_KB_1-3	4	5,3
PL3_o_2_KB_4-6	7	9,3
PL3_u_2_KB_1-3	9	12
PL3_u_2_KB_4-6	6	8

Wie in Tabelle 3-10 zu erkennen ist, ist der Wert der mittleren Kerbschlagarbeit des Winkelmaterials (WL1_2_KB_1-3) im zulässigen Bereich für die Bezeichnung JR. Die Werte des Plattenmaterial sind jedoch sehr niedrig. Ein Grund für diese niedrigen Werte können die durch die Abrissarbeiten der Brücke entstanden Kaltverfestigungen sein. Diese führen zu einer höheren Versetzungsdichte und in weiterer Folge treten Alterungserscheinungen auf. Dieser Umstand führt zu der Schlussfolgerung, dass es sich beim Brückenstahl um einen Thomasstahl handelt, da dieser einen höheren Stickstoffgehalt hat.

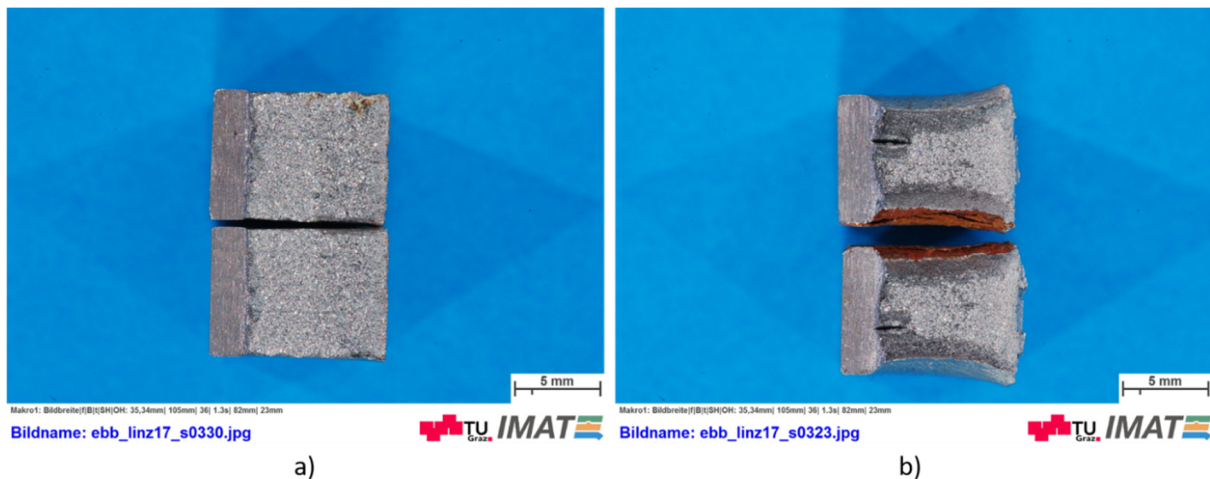
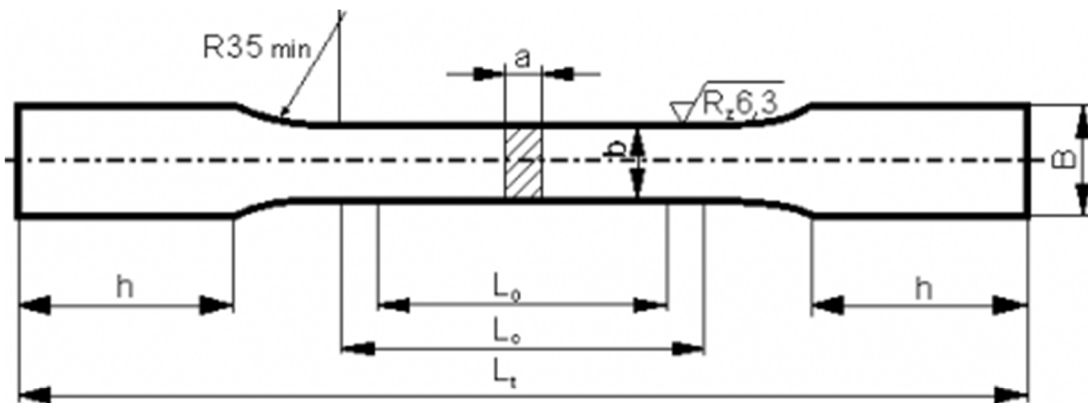


Abbildung 3-26: a) Bruchfläche Kerbschlagbiegeprobe Plattenmaterial (PL3_u_2); b) Bruchfläche Kerbschlagbiegeprobe Winkelmaterial

Abbildung 3-26 zeigt die Bruchfläche einer Kerbschlagbiegeprobe aus dem Plattenmaterial und eine aus dem Winkelmaterial. Bei der Bruchfläche aus dem Plattenmaterial (a) ist zu erkennen, dass der kristalline Anteil der Bruchflächen nahezu 100% ist und dass keine laterale Breiterung vorliegt. Es handelt sich hier also um reinen Sprödbbruch. Bei der Bruchfläche der Probe des Winkelmaterials (b) ist eine laterale Breiterung zu erkennen. Der kristalline Anteil ist hier ungefähr 70%. Dies weist auf eine höhere Zähigkeit hin. Weiters ist bei diesen Proben auch eine Materialtrennung zu erkennen. Dies kann auf den mehrachsigen Spannungszustand, der durch den Versuch in die Probe eingebracht wird und durch das Vorhandensein eines Einschlusses aus Mangansulfid zurück zu führen sein.

Zugversuch

Als nächster und letzter Schritt folgt der Zugversuch. Dieser wird an drei Proben durchgeführt. Die Probenentnahme ist dem Anhang A zu entnehmen. Wobei zwei der Proben aus dem Plattenmaterial und eine aus dem Winkelmaterial entnommen werden. Als Probenform wird eine Flachzugprobe gewählt. Abbildung 3-27 zeigt eine Darstellung der Flachprobe, Tabelle 3-11 gibt die dazugehörigen Werte wieder.



- a: Probendicke
- b: Probenbreite
- B: Kopfbreite ($\approx 1,2b+3 \text{ mm}$)
- h: Kopfhöhe ($\approx 2b+10 \text{ mm}$)
- L_0 : Anfangsmesslänge
- L_c : Versuchslänge ($L_c \geq L_0 + 1,5 \sqrt{S_0}$)
- L_t : Gesamtlänge

Bezeichnung einer Zugprobe Form E mit Probenbreite $b = 16 \text{ mm}$ und Anfangsmesslänge $L_0 = 50 \text{ mm}$:

Zugprobe DIN 50125 - E5×16×50

Abbildung 3-27: Maßzeichnung einer Flachzugprobe Form E¹⁶¹

Tabelle 3-11: Abmaße für Flachzugprobe Form E¹⁶²

Symbol	Wert
a	5
b	16
L_0	50
B (min)	22
h (min)	40
L_c (min)	65
L_t (min)	175

¹⁶¹ (DIN 50125 : 2016 - 12, 2016)

¹⁶² (DIN 50125 : 2016 - 12, 2016)

In Abbildung 3-28 sind die Spannungs-Dehnungskurven der drei Probenstücke ersichtlich.

Legende	Nr	Art und Bezeichnung	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A _{manuell} %	Z %	m _E GPa	F _m kN	L ₀ mm	L _u mm
	1	PL3_O_2_ZV	420	458	5.25	5.4	34	220	35.58	50.3	53
	2	PL3_U_2_ZV	346	400	13.14	18.3	42	202	31.22	50.3	59.5
	3	WL1_2_ZV	246	367	31.52	37.2	67	204	28.92	50.3	69

Seriengrafik:

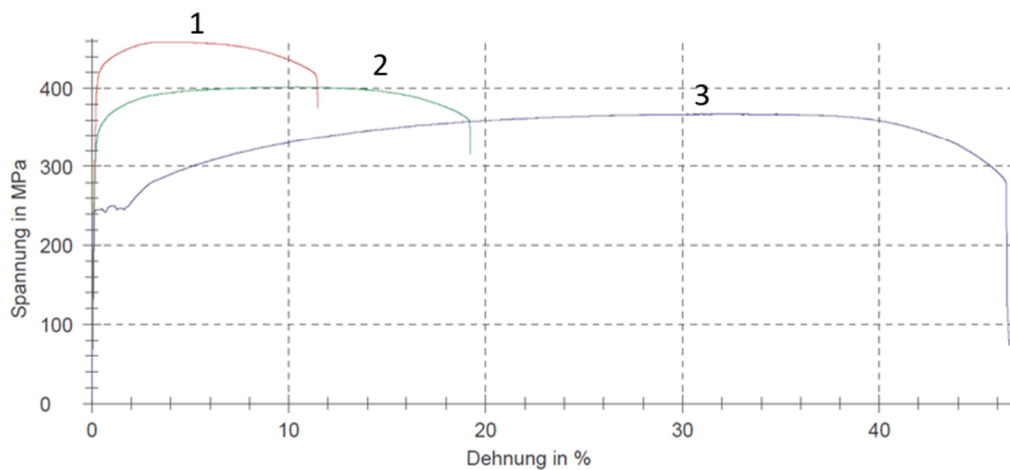


Abbildung 3-28: Spannungs-Dehnungskurven Zugversuche

Es ist zu erkennen, dass sich die drei untersuchten Flachzugproben völlig unterschiedlich verhalten, der Wert der Fließgrenze für alle drei Proben jedoch nie unter jenem des Vergleichswerkstoffs (S235JR; Re > 235 MPa) fällt. Die Probe aus dem Winkelmaterial (blau) hat im Gegenteil zu den beiden Proben aus dem Plattenmaterial eine ausgeprägte Streckgrenze. Weiters hat die Probe aus dem Winkel eine deutlich größere Bruchdehnung als die beiden anderen Proben. Dieser Versuch lässt die Vermutung zu, dass es sich bei den Materialien des Winkels und der Platte um unterschiedliche Werkstoffe handeln kann.

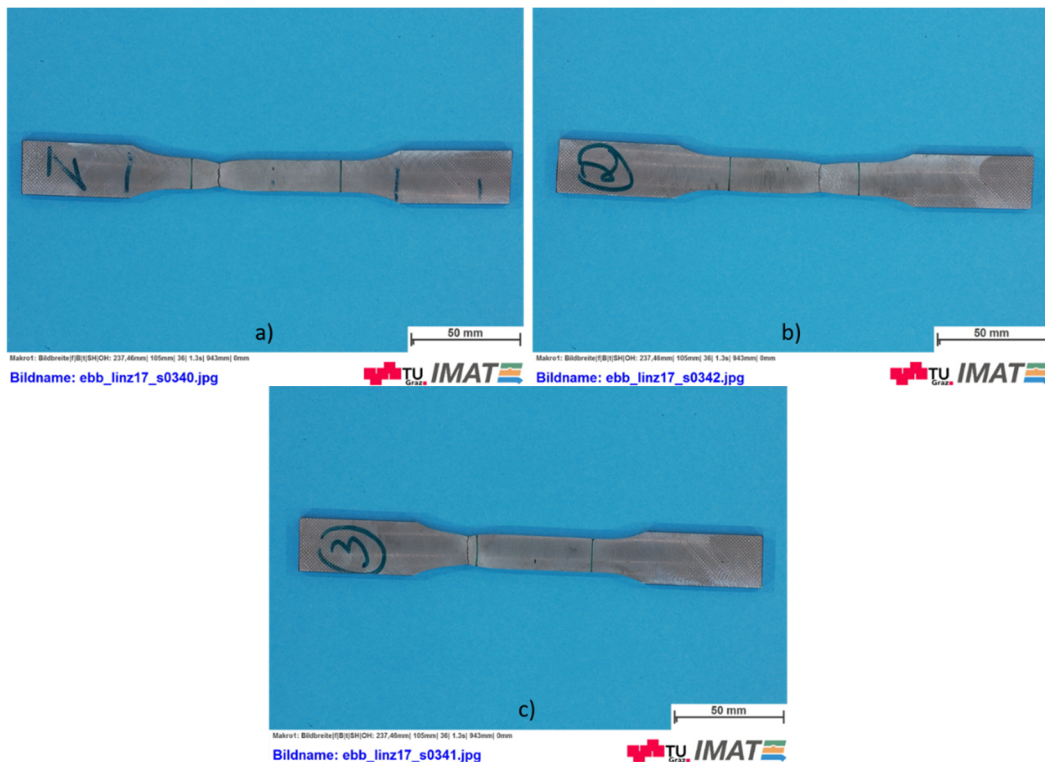


Abbildung 3-29: Geprüfte Flachzugproben; a) Plattenmaterial (PL3_o_2_ZV); b) Plattenmaterial (PL3_u_2_ZV); c) Winkelmaterial (WL1_2_ZV)

Wie in Abbildung 3-29 c) zu erkennen ist, ist das Probenstück aus dem Winkelmaterial außerhalb der Versuchslänge L_c gebrochen, somit sind die erhaltenen Werte nur teilweise aussagekräftig. Es ergibt sich bei diesem Probenstück auch eine geringere Bruch-einschnürung als bei den beiden Probenstücken aus dem Plattenmaterial.

3.3.3 Zusammenfassung

Als Fazit lässt sich anmerken, dass die erhaltenen Ergebnisse oftmals im Widerspruch zur Literatur stehen. Hier wird zur Zeit der Brückenerrichtung ein Siemens Martin Stahl gefordert. Nach den sehr geringen Werten der Kerbschlagarbeit zu urteilen, handelt es sich bei dem Plattenmaterial um einen Thomas Stahl. Weiters zeigt sich, dass es sich bei den beiden zu untersuchenden Ausgangsmaterialien (Plattenmaterial und Winkelmaterial) wahrscheinlich um verschiedene Materialien handelt. Dies ist dadurch zu erklären, dass zu jener Zeit hochwertiger Stahl teuer war. Aus diesem Grund wurden oftmals niedriger beanspruchte Brückenteile aus minderwertigerem Stahl hergestellt. Diese Theorie lässt sich hier jedoch nicht untermauern, da der Entnahmeort des Probenmaterials nicht bekannt ist. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die mechanischen Eigenschaften, wie auch

schon die chemische Analyse des Altstahls, zu einem großen Teil sehr ähnlich dem modernen Vergleichsstahl (S235JR) sind. Einzige Ausnahme bildet die Kerbschlagarbeit, die beim Plattenmaterial sehr gering ist, dies könnte auf Alterungseffekte zurückzuführen sein, erschwerend kommen hier unter Umständen auch die Abbrucharbeiten hinzu, durch die sehr viele Versetzungen eingebracht wurden. Aufgrund der Übereinstimmung der mechanischen Eigenschaften werden die im nachfolgendem Kapitel durchgeführten Schweißvorversuche zunächst mit dem Vergleichsstahl durchgeführt. Da eine gewisse Unklarheit darin besteht, ob es sich beim Plattenmaterial und beim Winkelmaterial um denselben Werkstoff handelt, werden die nachfolgenden Schweißversuche nur auf dem Plattenmaterial durchgeführt.

4 Schweißtechnische Versuche

Im folgenden Kapitel wird schrittweise ein Schweißplan zur Reparaturschweißung von Altstählen entwickelt. Zu Beginn befasst sich dieses Kapitel mit dem verwendeten Schweißgerät und mit den Grundlagen der Schweißtechnologie. Aufbauend auf diese Grundlagen werden Vorversuche mit den Schweißverfahren Metallaktivgas (MAG, 135) und Elektrodenhand-Schweißen (E-Hand, 111) an einem modernen Baustahl durchgeführt. Mit dem Ziel ein Parametersetup zu definieren, bei dem der Einbrand kleiner als die Speckschichtdicke ist. Mit diesem Setup werden in weiterer Folge die Hauptversuche am Altstahl durchgeführt. Ziel ist es hier Standardsetups zu definierten Speckschichtdicken zu entwickeln. Abbildung 4-1 zeigt die Vorgehensweise in Prozessdarstellung.

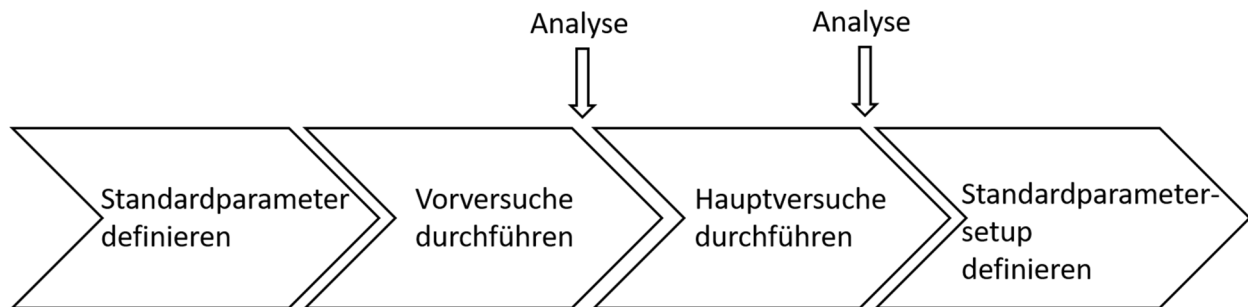


Abbildung 4-1: Schweißversuche in Prozessdarstellung

4.1 Verwendetes Schweißgerät

Alle Schweißversuche werden mit der Schweißstromquelle „Welbee P500L“ von der Firma DAIHEN VARSTROJ in Lendava (SLO) durchgeführt. Abbildung 4-2 zeigt eine Darstellung des verwendeten Schweißgerätes.



Abbildung 4-2: Welbee P500L¹⁶³

Welbee P500L ist eine Inverter Schweißstromquelle deren maximaler Schweißstrom bei 500 A liegt. Dieser kann im Gleichstrombetrieb für eine Einschaltdauer von 60 % aufrecht erhalten werden. Im Gleichstrom Pulsbetrieb beträgt die Einschaltdauer, bei einem Schweißstrom von 400 A, 80 %. Des Weiteren kann die Schweißstromquelle für Metallaktivgas-, Metallinertgas-, Wolframinertgas- und Elektrodenhandschweißen eingesetzt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl an Werkstoffen verschweißen zu können. Die statische Charakteristik der Schweißstromquelle ist eine Konstantspannungscharakteristik. Abbildung 4-3 zeigt die Kurve einer Konstantspannungscharakteristik.¹⁶⁴

¹⁶³ (DAIHEN VARSTROJ)

¹⁶⁴ (OTC DAIHEN EUROPE)

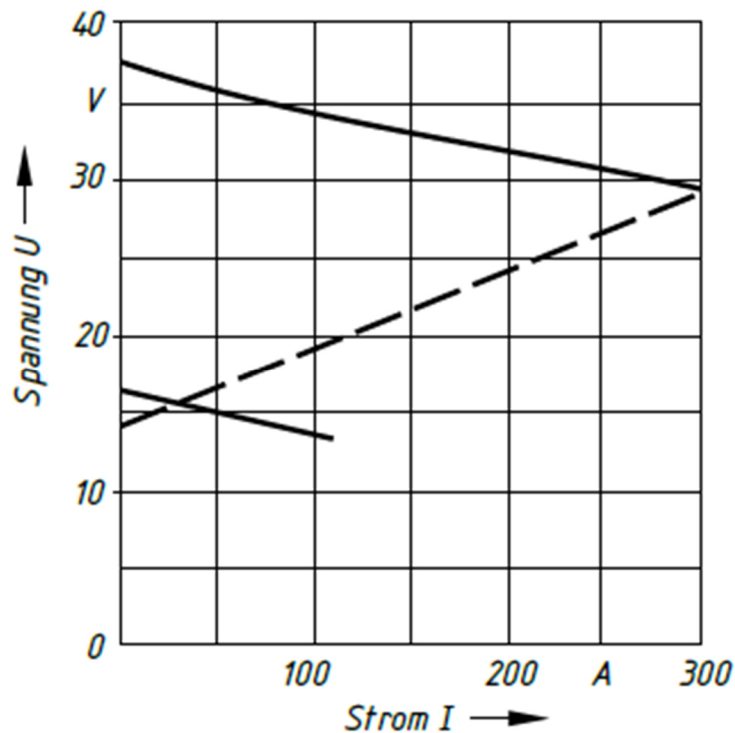


Abbildung 4-3: Konstantspannungscharakteristik einer Schweißstromquelle¹⁶⁵

Wie der Abbildung 4-3 zu entnehmen ist, führen bei dieser Kennlinie bereits geringe Änderungen der Lichtbogenspannung respektive der Lichtbogenlänge zu großen Stromstärkenänderungen. Dies bedeutet, dass bei einer Verkürzung des Lichtbogens, bei der sich auch die Spannung verringert, die Stromstärke stark ansteigt. Dieser Umstand bewirkt wiederum ein verstärktes Abschmelzen der Elektrode, wodurch die Länge des Lichtbogens vergrößert wird. Wie zu erkennen ist stellt sich bei dieser Art der Regelung ein so genannter „Selbstregelleffekt“ ein. Weitere Bezeichnungen für diese Charakteristik sind „Innere Regelung“ oder „ ΔI -Regelung“. Die durchgehend gezeichneten Linien sind zwei verschiedene Gerätekenlinien, wo hingegen die strichliert gezeichnete Linie die Lichtbogenkennlinie ist¹⁶⁶

Weiters bietet die Welbee P500L ein Möglichkeitsspektrum von manuellem Schweißen bis hin zu vollautomatischem Schweißen.¹⁶⁷

¹⁶⁵ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 23)

¹⁶⁶ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 22)

¹⁶⁷ (OTC DAIHEN EUROPE)

4.2 Schweißtechnische Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird kurz auf die, für die vorliegende Arbeit, wichtigsten schweißtechnischen Grundlagen eingegangen. Ausgehend von dem Begriff der Schweißbarkeit, soll hier gezeigt werden, welche Eigenschaften von Stählen diese schweißbar machen. Weiters werden die beiden verwendeten Schweißverfahren und die verwendeten Schweißzusätze vorgestellt.

4.2.1 Schweißbarkeit

Der Begriff der Schweißbarkeit wird durch die DIN 8528-1 bestimmt. Die Beschreibung des Begriffes ist jedoch nicht einfach, da den Begriff eine Vielzahl von Einflussfaktoren prägen.^{168;169}

Abbildung 4-4 zeigt eine Darstellung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Schweißbarkeit. Es ist zu erkennen, dass nicht nur die Wahl des richtigen Werkstoffes respektive des richtigen Zusatzwerkstoffes von Bedeutung ist, sondern auch die Wahl des richtigen Fertigungsverfahrens und eines geeigneten Ablaufes. Auch die richtige Konstruktion ist von entscheidender Bedeutung. Somit unterteilt sich der Begriff der Schweißbarkeit in folgende drei Teileigenschaften:^{170,171}

- Schweißbeignung
- Schweißsicherheit
- Schweißmöglichkeit

¹⁶⁸ (Schulze, 2010 S. 237)

¹⁶⁹ (DIN 8528-1: 1973-06, 1973)

¹⁷⁰ (Schulze, 2010 S. 237)

¹⁷¹ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 1)

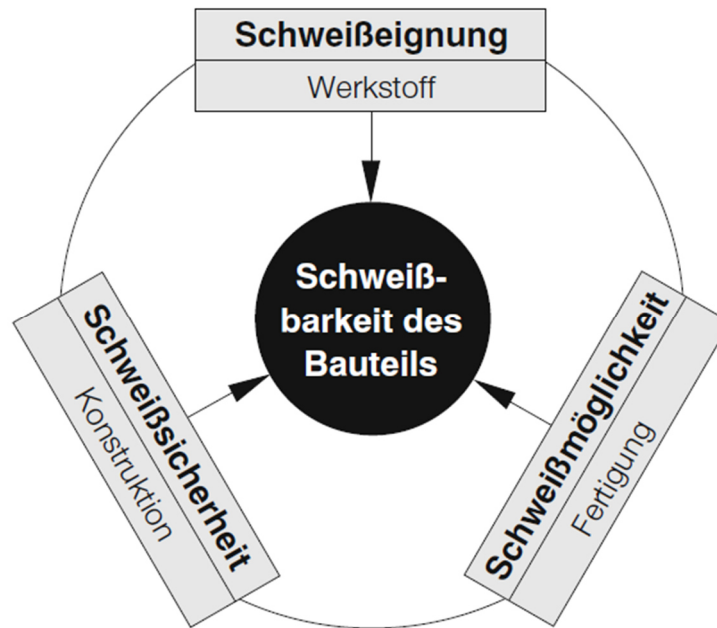


Abbildung 4-4: Einflussfaktoren auf die Schweißbarkeit¹⁷²

Im Folgenden werden diese drei Begriffe erörtert und die Einflussmöglichkeiten auf das in der vorliegenden Arbeit vorhandene Problem dargestellt.

4.2.1.1 Schweißbeignung

Der Begriff der Schweißbeignung bezieht sich auf die Werkstoffeigenschaften der vorhandenen Grundwerkstoffe, sowie auf die in das Schweißgut eingebrachten Zusatzwerkstoffe. Somit ist die Schweißbeignung dann vorhanden, wenn es aufgrund der physikalischen, chemischen und metallurgischen Eigenschaften der Werkstoffe möglich ist eine Verbindung herzustellen, die den Anforderungen gerecht wird. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffpaarungen hat vielfältigen Einfluss, unter anderem die Tendenz zur Rissbildung, das Schmelzbadverhalten und die Spröbruchneigung. Die physikalischen Eigenschaften bestimmen hingegen das Wärmedehnungsverhalten, die Wärmeleitfähigkeit und das Erstarrungsintervall. Die metallurgischen Eigenschaften werden vor allem durch die Herstellungsprozesse des Stahls bestimmt und haben einen Einfluss auf das Gefüge und auf die erreichbare Korngröße.^{173,174}

¹⁷² (Schulze, 2010 S. 237)

¹⁷³ (Schulze, 2010 S. 138)

¹⁷⁴ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 3)

Beim Durchführen von Revitalisierungen sind die Möglichkeiten der Beeinflussung auf diese Eigenschaft nur begrenzt möglich, da der vorhandene Altstahl nicht verändert werden kann und somit die chemischen, die metallurgischen und die physikalischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes bestimmt sind. Um Schweißungen an Altstählen durchführen zu können, müssen die Eigenschaften des Stahles für jeden Fall neu geprüft werden. Hierfür wird in der Regel eine Kernlochprobe aus der neutralen Faser der vorliegenden Konstruktion genommen, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Einfluss kann durch die Auswahl des verwendeten Verstärkungswerkstoff genommen werden. Hier ist darauf zu achten, dass der Altstahl und der Verstärkungsstahl im schweißtechnischen Sinne harmonisieren.¹⁷⁵

4.2.1.2 Schweißsicherheit

Der Begriff der Schweißsicherheit wird vor allem von der konstruktiven Gestaltung der Schweißverbindungen, dem Beanspruchungszustand und der Betriebstemperatur bestimmt. Die Wahl des richtigen Werkstoffes spielt hier nur eine untergeordnete Rolle. Die Schweißsicherheit ist dann gegeben, wenn die Funktion der Konstruktion unter den vorhandenen Betriebsbedingungen und mit dem gegebenen Werkstoff nicht beeinflusst wird. Die konstruktive Gestaltung berücksichtigt die Krafteinleitung und den Kraftfluss, sowie die Beachtung von Kerben. Der Beanspruchungszustand wird durch die Art und Größe der vorhandenen Spannungen und von der Art der Belastung (statisch, dynamisch) bestimmt. Die Betriebstemperatur ist im Zusammenhang mit dem Beanspruchungszustand zu sehen. Die ertragbaren Beanspruchungen können bei sehr hohen oder sehr tiefen Temperaturen klein werden.^{176,177}

Im Fall der Instandhaltung, wird die Schweißsicherheit in Zusammenarbeit mit den Berechnungsingenieuren bestimmt. Nach erfolgreicher Identifizierung von Schwachstellen in der vorhandenen Konstruktion können Maßnahmen getroffen werden, um diese Schwachstellen zu beseitigen.

¹⁷⁵ (Roller, et al., 2015)

¹⁷⁶ (Schulze, 2010 S. 138)

¹⁷⁷ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 3)

4.2.1.3 Schweißmöglichkeit

Unter dem Begriff Schweißmöglichkeit versteht man fertigungstechnische Einflussfaktoren auf den Schweißprozess. Hierzu zählen die fachgerechte Vorbereitung des Schweißvorgangs, der Schweißvorgang an sich und die Nachbehandlung. Bei der Vorbereitung zum Schweißen handelt es sich um die Wahl des entsprechenden Zusatzwerkstoffes und der richtigen Hilfsstoffe, sowie um die Wahl der richtigen Fugenform, einer geeigneten Vorwärmtemperatur und der Wahl des richtigen Schweißverfahrens. Beim Schweißvorgang an sich, haben unter anderem der Lagenaufbau, die Wärmeführung und die Schweißfolge einen Einfluss. Die Nachbehandlung beschäftigt sich mit dem Beizen, der Wärmenachbehandlung und mit Richtarbeiten.^{178,179}

Im Fall von Revitalisierungsmaßnahmen von Altstahlkonstruktionen ist dieser Punkt jener, der am meisten beeinflusst werden kann. Aufgrund der Baustellensituation ist man zwar in der Wahl des Schweißverfahrens und der Fugenformen eingeschränkt, der Schweißzusatz und die Vorwärmtemperaturen können jedoch, je nach Zugänglichkeit, beinahe frei gewählt werden.

Als erster wichtiger Punkt sei hier die Reinigung der Schweißstelle angeführt. Da die Altstahlkonstruktionen meist in Zeiten errichtet wurden in denen es noch keine Standards für gesundheitsschädliche Stoffe in Lacken gab (Anstriche aus Bleimennige), ist es sehr wichtig, dass die Schweißstelle von jeglichen Lacken befreit wird, somit wird eine metallisch blanke Oberfläche gefordert. Nicht nur für die Gesundheit ist eine blanke Oberfläche essentiell, für das Gelingen einer Schweißung ist es äußerst wichtig, dass die Schweißstelle von Rost und Lacken befreit ist. Dies hat den Grund, da das Blei mit anderen Elementen in Verbindung gehen kann und sich somit niedrigschmelzende Verbindungen bilden können, welche zu Heißrissen führen können.

Da Revitalisierungsarbeiten meist im Feld stattfinden, sind Schweißverfahren, die schwer und groß sind, nicht optimal. In der vorliegenden Arbeit werden aus diesem Grund das Metallaktivgasschweißverfahren und das Elektrodenhandschweißverfahren verwendet, da diese als Standardschweißverfahren auf Baustellen oft Verwendung finden.

Die richtige Wahl des Zusatzwerkstoffes ist hier von entscheidender Bedeutung. Für den vorliegenden Fall wird in der Literatur immer auf basische Zusatzwerkstoffe verwiesen,

¹⁷⁸ (Schulze, 2010 S. 239)

¹⁷⁹ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 3)

da diese in der Schlacke eine gewisse Menge an Seigerungselementen aufnehmen können und somit die Heißrissgefahr minimiert wird. Eine Darstellung und Beschreibung der gewählten Zusatzwerkstoffe erfolgt in Kapitel 4.3.¹⁸⁰

Durchführungen von Vorwärmvorgängen stellen auf der Baustelle kein Problem dar. Ob eine Vorwärmung nötig ist, muss jedoch von Fall zu Fall geprüft werden. Die Wahl der richtigen Schweißfolge hat in erster Linie einen Einfluss auf den Verzug. Hier muss darauf geachtet werden, dass das gesamte System gleichmäßig erwärmt wird, damit die Dehnungen und Schrumpfungen nicht zu übermäßigem Verzug und in weiterer Folge zu vermehrten Spannungen in der Schweißzone führen. Es besteht ein direkter Zusammenhang mit dem Begriff der Schweißsicherheit.

Ein besonderes Augenmerk sollte auch auf die Zugänglichkeit zur Schweißverbindung geworfen werden. Unter Zugänglichkeit ist hier nicht nur die Zugänglichkeit mit dem Schweißbrenner zu verstehen, sondern auch die Zugänglichkeit mit etwaigen Prüfmitteln muss gewährleistet sein. Abbildung 4-5 zeigt mögliche konstruktive Gestaltungsmaßnahmen zur Ertüchtigung von bestehenden Konstruktionen aus I Profilen.

¹⁸⁰ (Schulze, 2010 S. 242, 243, 268)

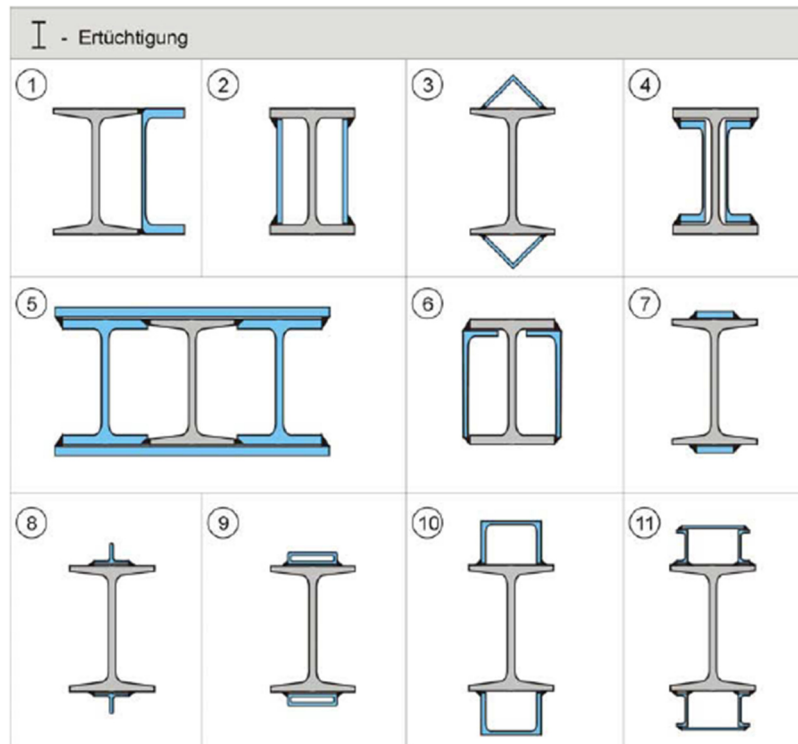


Abbildung 4-5: Gestaltungsmöglichkeiten zur Ertüchtigung von Altstahlkonstruktionen Teil 1
(grau - Altstahl; blau - moderner Baustahl)¹⁸¹

Abbildung 4-6 zeigt Möglichkeiten zur Ertüchtigung von Konstruktionen mittels weiteren Profiltypen.

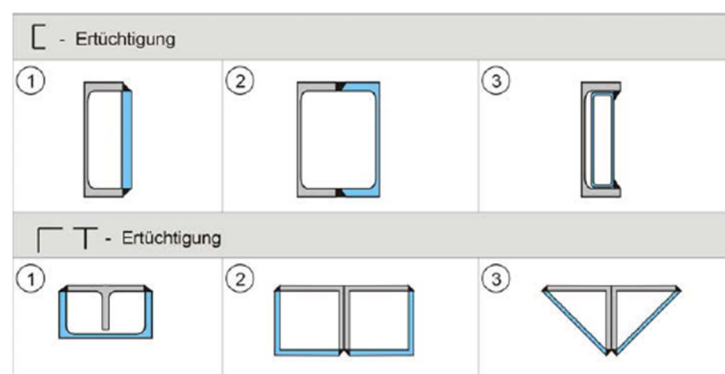


Abbildung 4-6: Gestaltungsmöglichkeiten zur Ertüchtigung von Altstahlkonstruktionen Teil 2
(grau - Altstahl; blau - moderner Baustahl)¹⁸²

¹⁸¹ (Lüddecke, 2006 S. 70)

¹⁸² (Lüddecke, 2006 S. 71)

Die Varianten aus Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 sind speziell für die Ertüchtigung von Altstahlkonstruktionen entworfen worden. Somit liegen die Schweißbereiche an Positionen, an denen eine genügend dicke Speckschichtdicke vorhanden ist. Bei den Darstellungen handelt es sich um prinzipielle Darstellungsvarianten, die jeweilige Verwendbarkeit muss von Fall zu Fall geprüft werden.¹⁸³

4.2.2 Verwendete Schweißverfahren und Zusätze

Im folgenden Kapitel werden die beiden verwendeten Schweißverfahren kurz erklärt und deren Unterschiede dargestellt. Weiters werden die benutzten Schweißzusätze aufgezeigt und kurz deren Einsatzgebiet und Eigenschaften erläutert.

4.2.2.1 Lichtbogenhandschweißen (111)

Beim Lichtbogenhandschweißen oder E-Hand-Schweißen handelt es sich um eines der ältesten Elektroschweißverfahren. Es zählt zur Gruppe der Schmelzschweißverfahren, näher zur Gruppe der Metall-Lichtbogenschweißverfahren. Das Charakteristikum dieses Verfahrens ist das Schweißen mit einer abschmelzenden Elektrode ohne externes Schutzgas. Die Elektroden liegen meist in Stabform – als umhüllte Elektrode – vor. Die Stabelektrode wird beim Lichtbogenhandschweißen mit der Hand geführt. Der Lichtbogen brennt zwischen der abschmelzenden Elektrode und dem Schweißbad. Abbildung 4-7 zeigt das Verfahrensprinzip des E-Hand-Schweißens.¹⁸⁴

¹⁸³ (Lüddecke, 2006 S. 70)

¹⁸⁴ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 32)

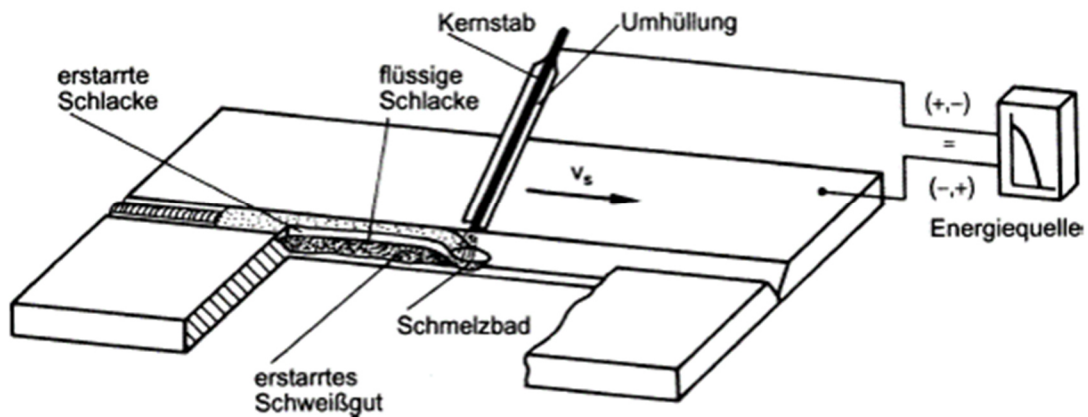


Abbildung 4-7: Verfahrensprinzip E-Hand-Schweißen¹⁸⁵

Wie in Abbildung 4-7 zu erkennen ist, kann beim Elektrodenschweißen die Elektrode sowohl am positiven als auch am negativen Pol verschweißt werden. Wobei meist nur der basische Umhüllungstyp am positiven Pol verschweißt wird.

Das Charakteristikum der Schweißstromquelle beim E-Hand-Schweißen ist die fallende Kennlinie. Diese ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Bei dieser Art der Regelung wird die Lichtbogenlänge von außen durch den Schweißer geregelt, womit diese Kennlinie auch als äußere Regelung oder ΔU -Regelung bezeichnet wird. Durch die Änderung der Länge des Lichtbogens ergibt sich auch eine deutliche Änderung der Spannung, woraus sich, bedingt durch die Kurvenform, nur eine geringe Änderung der Stromstärke ergibt. Daraus folgt, dass die Abschmelzleistung durch eine Änderung der Lichtbogenlänge nahezu konstant bleibt. Die beiden fallenden Linien in Abbildung 4-8 sind zwei verschiedene Gerätekennlinien, wo hingegen die steigende Linie die Lichtbogenkennlinie ist.¹⁸⁶

¹⁸⁵ (Dilthey, 2005 S. 11)

¹⁸⁶ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 21)

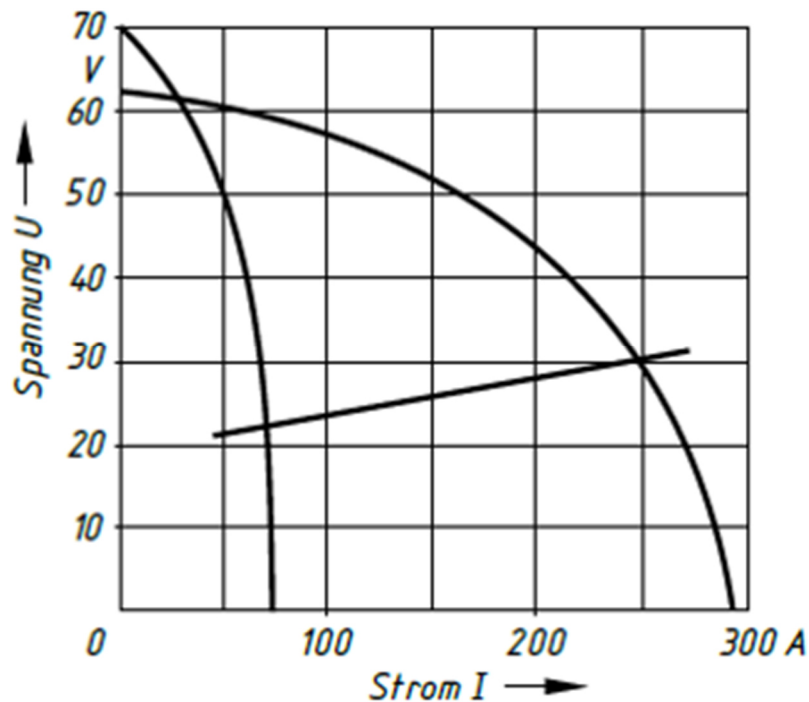


Abbildung 4-8: Fallende Kennlinie einer Schweißstromquelle¹⁸⁷

Zur Erzeugung einer geeigneten Schutzatmosphäre im Schweißbereich, kann der Kernstab mit unterschiedlichen Stoffen umhüllt werden. Je nach Anwendung unterscheidet man vier Typen von Umhüllungen:¹⁸⁸

- Saurer Typ (A)
- Rutil Typ (R)
- Zellulose Typ (C)
- Basischer Typ (B)

In der vorliegenden Arbeit kommt eine basisch umhüllte Elektrode zum Einsatz. Die Umhüllung dieses Elektrodentyps besteht hauptsächlich aus Flussspat (CaF_2) und Kalkspat (CaCO_3). Daraus ergibt sich eine besondere Eignung zum Schweißen von Phosphor und schwefelhaltigen Stählen. Diese Elemente werden, wie auch bei den basischen Er-schmelzungsverfahren (Thomas Verfahren und basisches Siemens Martin Verfahren), in der Schlacke gebunden.¹⁸⁹

¹⁸⁷ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 23)

¹⁸⁸ (Dilthey, 2005 S. 13)

¹⁸⁹ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 36)

Im Speziellen kommt in dieser Arbeit die Böhler FOX EV 50 (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5) zur Anwendung.¹⁹⁰

4.2.2.2 Metall Aktivgas Schweißen (135)

Das Metall Aktivgas Schweißverfahren (MAG) zählt wie das E-Hand-Verfahren zu den Schmelzschweißverfahren. Bei diesem Verfahren wird eine zugeführte Drahtelektrode unter einer Schutzgashülle abgeschmolzen. Das Schutzgas stammt nicht, wie beim Elektrodenhandschweißen vom Schweißzusatz, sondern wird von einer externen Quelle zugeführt. Abbildung 4-9 zeigt die Darstellung des Verfahrensprinzips des Metall Aktivgasschweißens. Das zugeführte Gas ist ein aktives Gas, dies bedeutet, dass das Gas eine Reaktion mit der Schmelze eingeht, wie z.B. CO_2 oder O_2 . In der gegenständlichen Arbeit wird als Schutzgas das Linde CORGON 18 (EN ISO 14175 - M21-ArC-18) verwendet. Dieses Mischgas besteht aus 18 % Kohlendioxid (CO_2) (Aktivgas Komponente) und zu 82 % aus Argon (Ar) (Inertgas Komponente).¹⁹¹

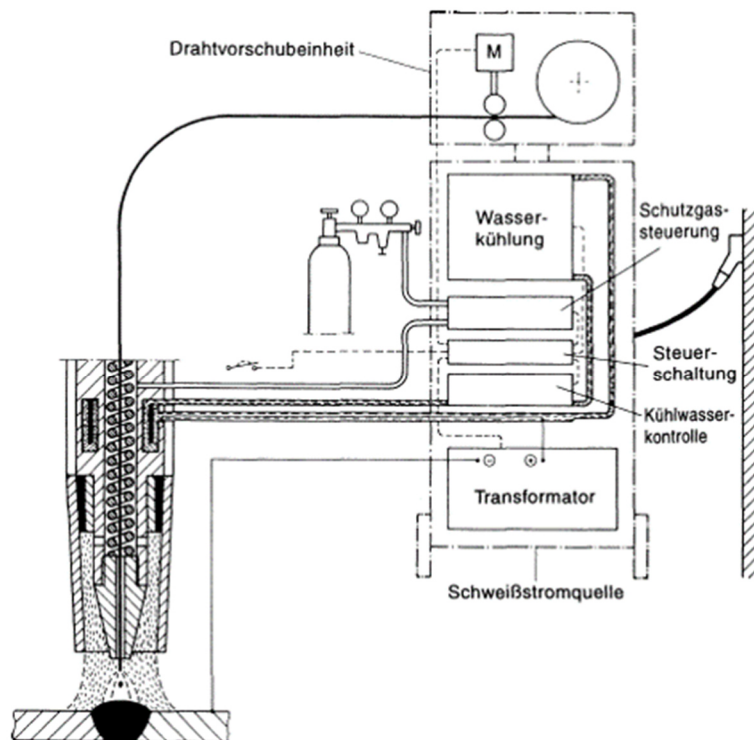


Abbildung 4-9: Verfahrensprinzip Metallaktivgas Schweißen¹⁹²

¹⁹⁰ (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013 S. 2-19)

¹⁹¹ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 53)

¹⁹² (Dilthey, 2005 S. 63)

Die statischen Kennlinien der Metallaktivgas Stromquellen sind Konstantspannungskennlinien. Bei dieser Kennlinienart führt bereits eine kleine Änderung der Lichtbogenlänge, also der Lichtbogenspannung, zu einer großen Stromstärkenänderung. Wird der Lichtbogen länger, so steigt auch die Lichtbogenspannung, wodurch sich ein Abfallen der Stromstärke zeigt. Daraus folgt ein verringertes Abschmelzen der Drahtelektrode, wodurch der Lichtbogen kürzer wird. Wie zu erkennen ist, regelt sich die Lichtbogenlänge von selbst. Aus diesem Grund wird die Regelung auch Innere Regelung oder ΔI Regelung genannt. Abbildung 4-3 zeigt ein Beispiel einer ΔI Regelung.¹⁹³

Als Schweißzusätze können beim MAG Verfahren Massivdrahtelektroden oder Fülldrahtelektroden zur Anwendung kommen. In der vorliegenden Arbeit kommt eine Standard Massivdraht Elektrode zum Einsatz, die sich in der Industrie zum Schweißen von unlegierten Stählen bewährt hat. Bei der Elektrode handelt es sich um die BÖHLER EMK 6 (EN ISO 14341: G3Si1).^{194,195}

4.2.2.3 Schweißzusätze

Beim Lichtbogenhandschweißen kommt als Zusatzwerkstoff der Böhler FOX EV 50 (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5) zur Anwendung. Bei diesem Zusatzwerkstoff handelt es sich um eine Stabelektrode mit basischer Ummantelung. Bei diesem Elektrodentyp setzt sich die Umhüllung in erster Linie aus Kalkspat (CaCO_3) und Flussspat (CaF_2) in gleichen Anteilen zusammen. Da der Werkstoffübergang grobtropfig ist, ist das Verschweißen der Elektrode in beinahe allen Lagen möglich, eine Ausnahme bietet hier die PG (Fallposition) Position. Das durch die Verbrennung der Umhüllung gebildete Gas, schirmt das Schweißgut sehr gut von der Umgebung ab, daraus folgt ein zähes Schweißgut. Wie auch beim Thomas Stahl, bindet auch die hier entstehende Schlacke, den Phosphor und den Schwefel aus dem Stahl. Aus diesem Grund ist dieser Umhüllungstyp besonders gut für das Verschweißen von Altstählen geeignet.¹⁹⁶

Tabelle 4-1 zeigt die Richtwertanalyse des reinen Schweißgutes. Aus Tabelle 4-2 sind die mechanischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes zu entnehmen, wobei hier u für den unbehandelten Schweißzustand steht und s für das spannungsarmgeglühte Schweißgut, welches bei 600°C für 2 Stunden im Ofen geglüht wurde.

¹⁹³ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 22)

¹⁹⁴ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 67)

¹⁹⁵ (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013 S. 2-26)

¹⁹⁶ (Fahrenwaldt, et al., 2014 S. 36)

Tabelle 4-1: Richtanalyse reines Schweißgut Böhler FOX EV 50 (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5)¹⁹⁷

	C	Si	Mn
Gew-%	0,08	0,4	1,2

Tabelle 4-2: Mechanische Eigenschaften reines Schweißgut Böhler FOX EV 50 (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5)¹⁹⁸

		u	s
Streckgrenze R _e [MPa]		460	430
Zugfestigkeit R _m [MPa]		560	520
Dehnung A (L ₀ = 5d ₀) [%]		27	28
Kerbschlagarbeit ISO-V KV [J]	+20 °C	190	200
	-20 °C	160	
	-50 °C	70	90

Für das Metallaktivgasschweißen wird die BÖHLER EMK 6 (EN ISO 14341: G3Si1) angewendet. Hier handelt es sich um eine unlegierte Massivdrahtelektrode. Diese ist universell anwendbar und eignet sich sowohl zum Schweißen mit Mischgasen, wie auch zum Schweißen mit Kohlendioxid (CO₂).¹⁹⁹

Tabelle 4-3 zeigt die Richtwertanalyse des reinen Schweißgutes. Aus Tabelle 4-4 sind die mechanischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes zu entnehmen, wobei hier u für den unbehandelten Schweißzustand steht, der mit einem Schutzgas verschweißt wurde. Dieser setzt sich aus 15 bis 25% Kohlendioxid (CO₂) und Argon (Ar) zusammen. Die Ziffer u2 steht für den unbehandelten Schweißzustand, wobei hier als Schutzgas 100% Kohlendioxid (CO₂) zur Anwendung kommt. S steht für das spannungsarmgeglühte Schweißgut, welches bei 600°C für 2 Stunden im Ofen geglüht wurde. Als Schutzgas kommt hier 15 bis 25% Kohlendioxid (CO₂) und Argon (Ar) zur Anwendung.

¹⁹⁷ (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013 S. 2-19)

¹⁹⁸ (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013 S. 2-19)

¹⁹⁹ (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013 S. 2-26)

Tabelle 4-3: Richtanalyse reines Schweißgut BÖHLER EMK 6 (EN ISO 14341: G3Si1)²⁰⁰

	C	Si	Mn
Gew-%	0,08	0,9	1,45

Tabelle 4-4: Mechanische Eigenschaften reines Schweißgut BÖHLER EMK 6 (EN ISO 14341: G3Si1)²⁰¹

	U	u2	s
Streckgrenze R _e [MPa]	440	440	380
Zugfestigkeit R _m [MPa]	560	540	490
Dehnung A (L ₀ = 5d ₀) [%]	30	29	30
Kerbschlagarbeit ISO-V KV [J]	+20 °C	160	120
	-40 °C	80	50

Beim Schutzgas, welches für den Metallaktivgas-Schweißprozess verwendet wird, handelt es sich um das Linde CORGON 18 (EN ISO 14175 - M21-ArC-18). Dieses besteht aus 18 % Kohlendioxid (CO₂) und zu 82 % aus Argon (Ar). Diese Gas ist ein universell einsetzbares Schutzgas, welches vor allem bei unlegierten und niedriglegierten Stählen zur Anwendung kommt. Weiters ist das Schutzgas zum Schweißen in allen Schweißpositionen geeignet.²⁰²

²⁰⁰ (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013 S. 2-26)

²⁰¹ (voestalpine Böhler Welding Austria GmbH, 2013 S. 2-26)

²⁰² (LINDE, 2017)

4.3 Vorversuche

Auf Basis der in den vorhergehenden Kapiteln erörterten Grundlagen, werden in diesem Kapitel die schweißtechnischen Vorversuche durchgeführt. Diese Versuche dienen dem Finden von Parametersetups mit denen die Hauptversuche durchgeführt werden können. Im Speziellen geht es hier darum, geeignete Schweißgeschwindigkeiten, Schweißströme und Schweißspannungen zu finden, bei denen der Einbrand klein gehalten wird. Ziel ist es den Einbrand kleiner als die mittlere Speckschichtdicke von 2,3 mm zu halten.

Die Versuchsserien werden sowohl mit dem Elektrodenhandschweißverfahren als auch mit dem Metall Aktivgasverfahren durchgeführt. Als Werkstoff kommt hier, der in Kapitel 3 definierte Vergleichswerkstoff, S235 JR zum Einsatz.

4.3.1 Aufbau der Versuche

Zur Ermittlung der Parametersetups werden zunächst die Parameterbereiche der Schweißzusatzwerkstoffe in vier Bereiche geteilt. Auf Grundlage der Stromstärken und Spannungswerte, werden die Schweißpläne erstellt. Die Schweißpläne sind im Anhang E dokumentiert. Die Benennung der Schweißpläne orientiert sich am Schweißverfahren. Der Tabelle 4-5 ist zu entnehmen, welcher Schweißplan zu welchem Verfahren gehört und ob es sich beim jeweiligen Schweißplan um einen für eine Auftragsschweißung oder zur Durchführung einer Kehlnahtschweißung handelt. Es ist weiterführend zu sagen, dass es sich bei Nummer 111 im Allgemeinen um das Elektrodenhandschweißen handelt und bei Nummer 135 um das Metall Aktivgaschweißen. Die genauen Werte für Strom und Spannung seien dem jeweiligem Schweißplan im Anhang E zu entnehmen. Es ist zu erwähnen, dass alle Schweißpläne, die für diese Arbeit erstellt werden, mit der Software „STEELSOFT“ angefertigt werden, die von der Firma SteelCert GmbH zur Verfügung gestellt wurde.²⁰³

²⁰³ (Steelsoft)

Tabelle 4-5: Übersicht zu den Schweißplänen in Anhang E zu den Vorversuchen mit S235 JR

pWPS Nr.:	Schweißart	Schweißverfahren
111-003	Auftragsschweißung	Elektrodenhandschweißen
111-004	Auftragsschweißung	“
111-005	Auftragsschweißung	“
111-006	Auftragsschweißung	“
111-007	Kehlnahtschweißung	“
111-008	Kehlnahtschweißung	“
111-009	Kehlnahtschweißung	“
111-010	Kehlnahtschweißung	“
135-001	Auftragsschweißung	Metallaktivgasschweißung
135-002	Auftragsschweißung	“
135-003	Auftragsschweißung	“
135-004	Auftragsschweißung	“
135-005	Kehlnahtschweißung	“
135-006	Kehlnahtschweißung	“
135-007	Kehlnahtschweißung	“
135-008	Kehlnahtschweißung	“

Auftragsschweißung

Der Versuchsaufbau besteht im Falle der Auftragsschweißungen aus jeweils einer Platte für die Elektrodenhandschweißungen und einer Platte für die Metall Aktivgasschweißungen. Die Abmaße der Platte sind der Abbildung 4-10 zu entnehmen.

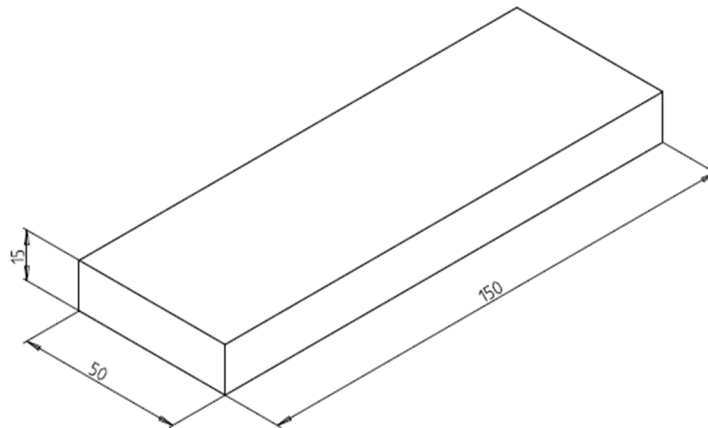


Abbildung 4-10: Maßzeichnung für die Auftragsschweißungen auf S235 JR

Der reale Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-11 ersichtlich. Die einzelnen Schweißbereiche werden optisch getrennt und mit der jeweiligen Schweißplannummer beschriftet.

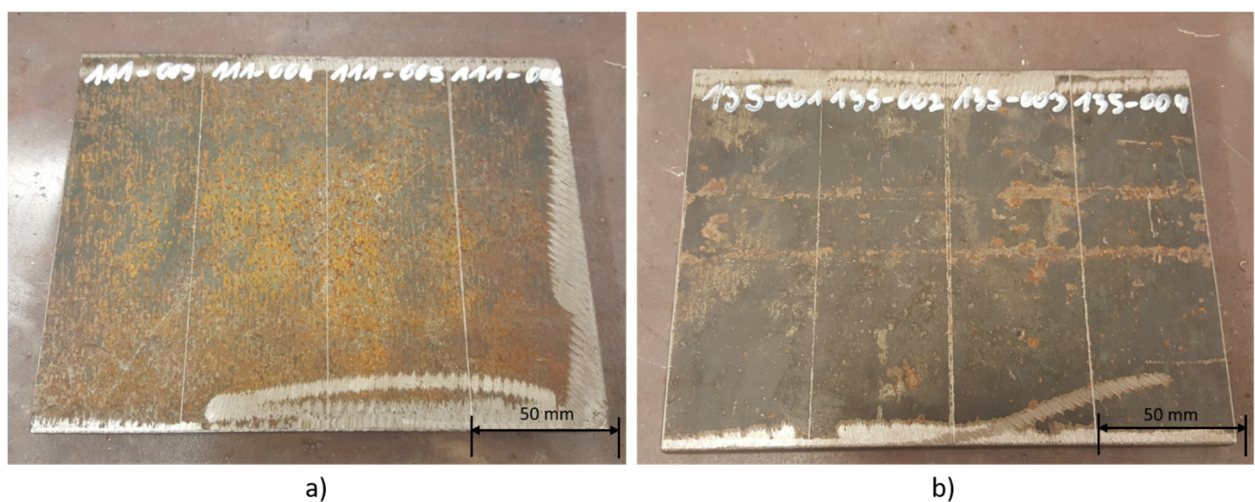


Abbildung 4-11: Probenplatten S235 JR mit markierten und nummerierten Linien für die Auftragschweißungen

Kehlnahtschweißung

Nach derselben Vorgehensweise werden auch die Vorversuche für die Verbindungsschweißungen vorbereitet. Da es sich hier um Kehlnahtschweißungen handelt, werden zur Vorbereitung zwei Platten im rechten Winkel zueinander, mittels Heftpunkten, fixiert. Dies ist nötig um die Position der Platten während des Schweißens aufrecht zu erhalten. Dieser Aufbau wird für jede Schweißung einzeln vorbereitet. Abbildung 4-12 zeigt die Maßzeichnung der Bleche für die Kehlnahtschweißungen.

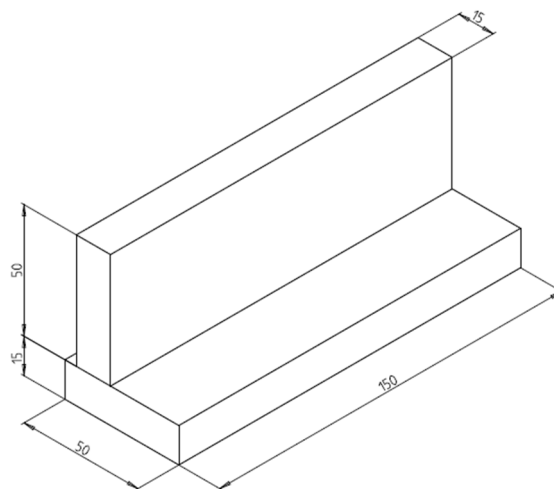


Abbildung 4-12: Maßzeichnung für die Kehlnahtschweißungen

Der reale Versuchsaufbau wird in Abbildung 4-13 gezeigt. Wie bereits bei der Auftragschweißung, werden auch hier die einzelnen Nähte mit der Schweißplannummer gekennzeichnet.



Abbildung 4-13: Schweißaufbau für Kehlnahtschweißungen a) Elektrodenhandschweißen; b) Metall Aktivgasschweißen

4.3.2 Auswertung und Diskussion

Ziel der Vorversuche ist es je Schweißverfahren und je Schweißverfahren ein Parameter-setup respektive einen Schweißplan zu finden, bei dem die Einbrandtiefe nicht tiefer ist, als die mittlere Speckschichtdicke. Die mittlere Speckschichtdicke wird oben (Kapitel 3.2.3) metallographisch ermittelt und beträgt 2,3 mm. Ein weiterer Faktor ist die Breite bzw. Tiefe der Wärmeeinflusszone (WEZ). In dieser Arbeit wird vorwiegend auf die Einbrandtiefe Rücksicht genommen. Die Tiefe der WEZ sei vorerst als rein informativ zu betrachten. Dies hat den Grund, da aufgrund des geringen Kohlenstoffgehaltes das Auftreten von Kaltrissen und Aushärtungen in der WEZ unwahrscheinlich sind. Ein wichtiges Thema könnten jedoch das Aufschmelzen von niedrigschmelzenden Phasen in der Seigerungszone sein. Diese Thematik wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter behandelt.

Schweißungen

Die durchgeführten Schweißungen werden zunächst visuell überprüft (VT). Abbildung 4-14 und Abbildung 4-15 zeigen die jeweiligen Ergebnisse der Auftragsschweißungen.

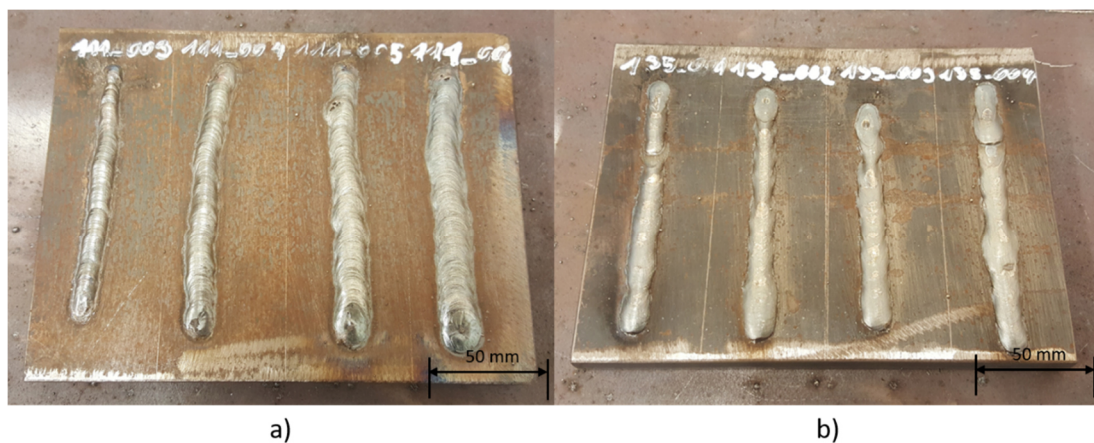


Abbildung 4-14: Durchgeführte Auftragsschweißungen a) Elektrodenhandschweißen; b) Metall Aktivgasschweißen

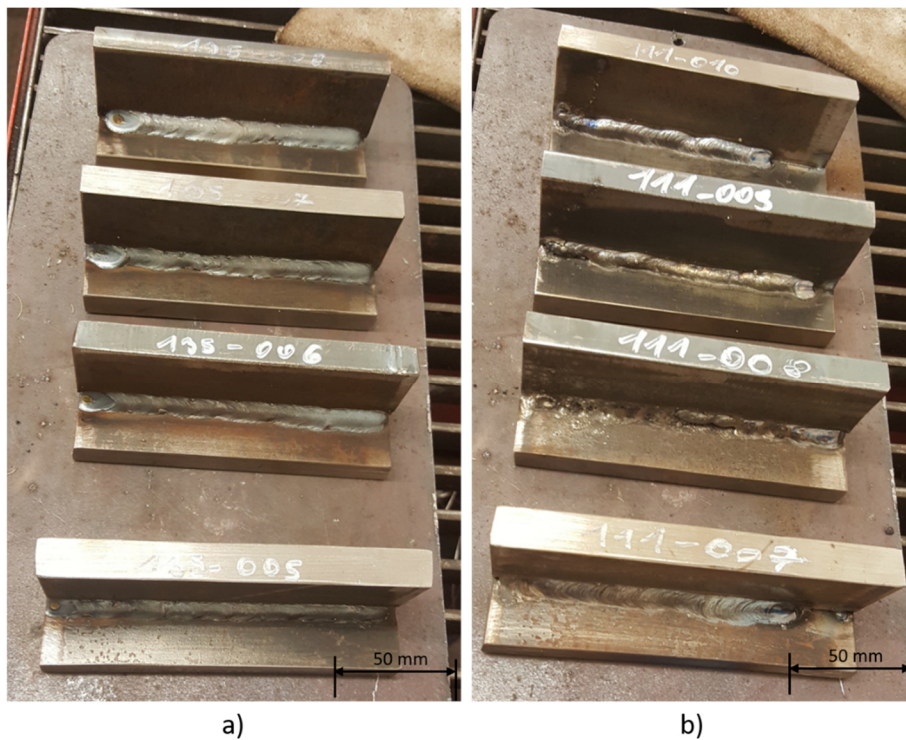


Abbildung 4-15: Durchgeführte Kehlnahtschweißungen a) Elektrodenhandschweißen; b) Metall Aktivgasschweißen

Es zeigt sich, dass bei manchen Parametersetups die Spritzerbildung sehr groß ist, z.B.: 111-006 und 135-004. Bei anderen Schweißplänen wie bei 111-008, ist die Schweißung vor allem im Bereich der zweiten Nahthälfte ungenügend. Die Metallaktivgasschweißungen zeichnen ein optisch schönes Bild. Wo hingegen die Elektrodenhandschweißungen, geschuldet der schwerer zu verschweißenden basischen Elektrode, ein optisch schlechteres, oft poriges Bild zeichnen. Dieser Umstand ist oft auch der Handfertigkeit des Schweißers geschuldet.

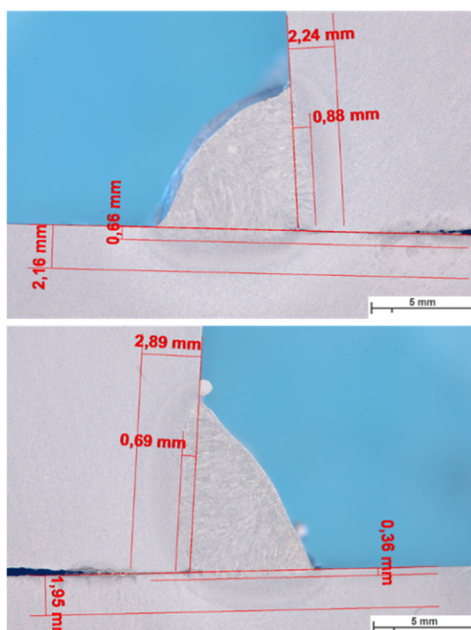
Makroskopische Untersuchung

Im nächsten Schritt werden die jeweiligen Schweißungen in je drei Stücke zerschnitten um eine Auswertung der jeweiligen Einbrandtiefe und der jeweiligen WEZ- Tiefe machen zu können. Abbildung 4-16 zeigt exemplarisch die Vorgehensweise des Zerschneidens von je einer Auftragsschweißung (a) und einer Kehlnahtschweißung (b).



Abbildung 4-16: Schnittpreparierung a) Auftragsschweißung; b) Kehlnahtschweißung

In weiterer Folge werden die zerschnittenen Proben an den Schnittflächen geschliffen und mittels Adler Ätzung präpariert. Somit kann, wie in Abbildung 4-17 gezeigt, direkt die Einbrandtiefe und die Tiefe der WEZ gemessen werden. Abbildung 4-17 soll nur exemplarisch darstellen wie diese Werte ermittelt werden. Die gesamte Einbrandtiefenstudie ist dem Anhang F zu entnehmen.



pWPS Nr.		135-005
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
200	22 - 25	40 - 50
	Einbrand [mm]	WEZ [mm]
Steg		
a) 135-005-1	0.88	2.24
b) 135-005-3	0.69	2.89
Mittelwert	0.79	2.57
Grundplatte		
a) 135-005-1	0.66	2.16
b) 135-005-3	0.36	1.95
Mittelwert	0.51	2.06

Abbildung 4-17: Auswertung einer MAG Schweißung

Es wurden also der „Steg“ und die „Grundplatte“ separat ausgewertet. Dies hat den Grund, da in der praktischen Reparaturanwendung vermutlich die Grundplatte immer der

Altstahl und der zur Verstärkung verwendete Stahl ein moderner Baustahl sein wird. Das obere und das untere Bild in Abbildung 4-17 bezeichnen jeweils die beiden Schnittpositionen. Die Lage der Schnittpositionen ist der Abbildung 4-16 zu entnehmen. Somit ergeben sich je Schweißung zwei Schnittpositionen und im Falle der Kehlnaht je zwei Werte für die Einbrandtiefe im Steg und in der Grundplatte. Gleiches gilt auch für die Tiefe der WEZ. Die hier erhaltenen Werte werden gemittelt und gegenübergestellt.

Tabelle 4-6 zeigt die Gegenüberstellung der einzelnen Schweißungen, daraus folgt Abbildung 4-18, hier sind die unterschiedlichen Einbrandtiefen und die WEZ Tiefen grafisch dargestellt.

Tabelle 4-6: Auswertetabelle Vorversuche

Vorversuche										
Auftragsschweißen										
pWPS Nr.:	111-003	111-004	111-005	111-006	135-001	135-002	135-003	135-004		
Stromstärke [A]	85,00	100,00	115,00	130,00	200,00	220,00	240,00	260,00		
Spannung [V]	20,00	20,00	20,00	20,00	22,00	22,00	22,00	22,00		
min	23,00	23,00	23,00	23,00	25,00	25,00	25,00	25,00		
max	35,00	35,00	35,00	35,00	40,00	40,00	40,00	40,00		
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	40,00	40,00	40,00	40,00	50,00	50,00	50,00	50,00		
min	0,26	0,30	0,35	0,39	0,53	0,58	0,63	0,69		
max	0,34	0,39	0,45	0,51	0,75	0,83	0,90	0,98		
Wärmeeinbringung [kJ/mm]	0,30	0,35	0,40	0,45	0,64	0,70	0,77	0,83		
mittel	0,61	1,17	1,90	1,90	1,65	2,02	2,25	3,04		
Einbrandtiefe [mm]	2,67	3,75	4,46	4,90	2,91	3,59	3,72	4,28		
WEZ-tiefe [mm]										
Kehlnaht										
pWPS Nr.:	111-008	111-009	111-010	111-007	135-005	135-006	135-007	135-008		
Stromstärke [A]	100,00	115,00	130,00	140,00	200,00	220,00	240,00	260,00		
Spannung [V]	20,00	20,00	20,00	20,00	22,00	22,00	22,00	22,00		
min	23,00	23,00	23,00	23,00	25,00	25,00	25,00	25,00		
max	35,00	35,00	35,00	35,00	40,00	40,00	40,00	40,00		
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	40,00	40,00	40,00	40,00	50,00	50,00	50,00	50,00		
min	0,30	0,35	0,39	0,42	0,53	0,58	0,63	0,69		
max	0,39	0,45	0,51	0,55	0,75	0,83	0,90	0,98		
Wärmeeinbringung [kJ/mm]	0,35	0,40	0,45	0,49	0,64	0,70	0,77	0,83		
mittel										
Steg										
Einbrandtiefe [mm]	0,69	0,74	0,95	0,99	0,79	1,16	1,19	1,26		
WEZ-tiefe [mm]	2,43	2,87	2,90	2,90	2,57	2,98	3,03	3,15		
Grundplatte										
Einbrandtiefe [mm]	0,71	0,79	0,86	1,05	0,51	0,58	1,13	1,95		
WEZ-tiefe [mm]	1,79	2,47	2,50	2,59	2,06	2,23	2,78	3,46		

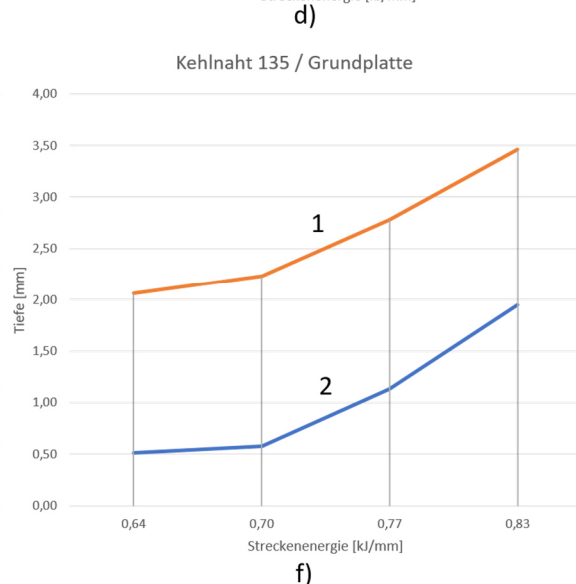
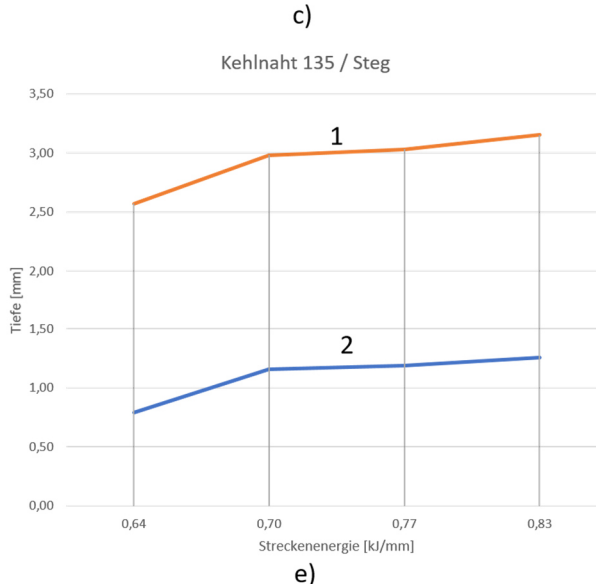
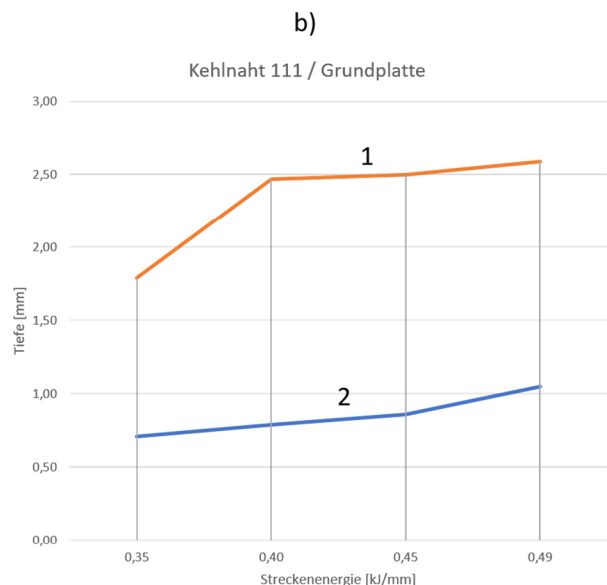
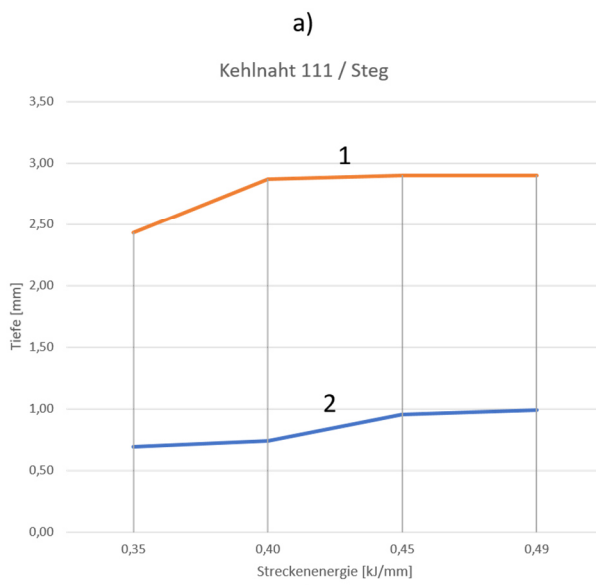
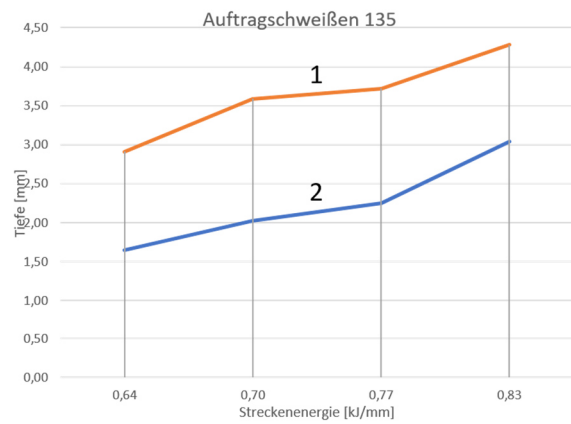
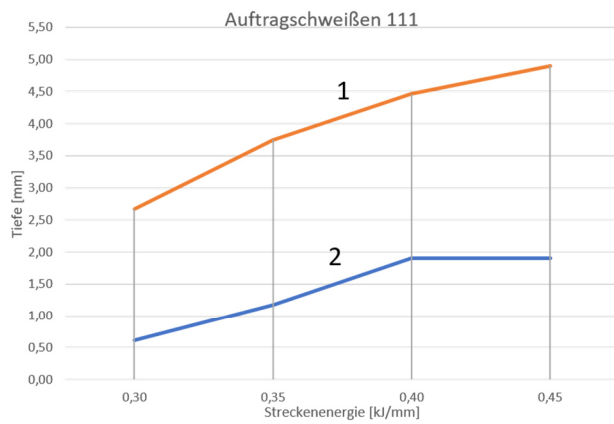


Abbildung 4-18: Einbrandtiefe (2)/ Tiefe der WEZ (1) in Abhängigkeit der Streckenenergie; a) Auftragsschweißung E-Hand; b) Auftragsschweißung MAG; c) Kehlnahtschweißung Steg E-Hand; d) Kehlnahtschweißung Grundplatte E-Hand; e) Kehlnahtschweißung Steg MAG; f) Kehlnahtschweißung Grundplatte MAG

Tabelle 4-2 zeigt, wie bereits oben erwähnt, die Gegenüberstellung der einzelnen Schweißungen. Diese Gegenüberstellung beinhaltet die verwendeten Schweißparameter sowie die erzielte Einbrandtiefe und die Tiefe der WEZ. Es ist zu erkennen, dass wie zu erwarten ist, mit steigender Wärmeinbringung auch die Einbrandtiefe steigt. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 4-19 grafisch dargestellt. Die grün markierten Bereiche in Tabelle 4-2 zeigen die ausgewählten Parametersetups mit denen im nächsten Schritt die Hauptversuche durchgeführt werden.

4.4 Hauptversuche

Im folgenden Kapitel werden die Parametersetups, die in den Vorversuchen ermittelt werden, auf den Altstahl angewendet. Ziel ist es, geeignete Setups zu finden bei denen der Einbrand nicht in die Seigerungszone ($<2,3$ mm) hineinragt bzw. bei denen eine stabile Schweißung zustande kommt.

4.4.1 Aufbau der Versuche

Bei den Hauptversuchen werden, wie bereits bei den Vorversuchen, Auftragsschweißungen und Kehlnahtschweißungen durchgeführt. Bei den Auftragsschweißungen dient in diesem Fall der Altstahl als Grundwerkstoff. Bei den Kehlnahtschweißungen wird die reale Baustellensituation mit einer Verbindungsschweißung vom Altstahl und einem modernen Baustahl nachgestellt. Abbildung 4-19 zeigt exemplarisch die vorbereiteten Grundwerkstoffe für das Auftragsschweißen (a) und das Kehlnahtschweißen (b).

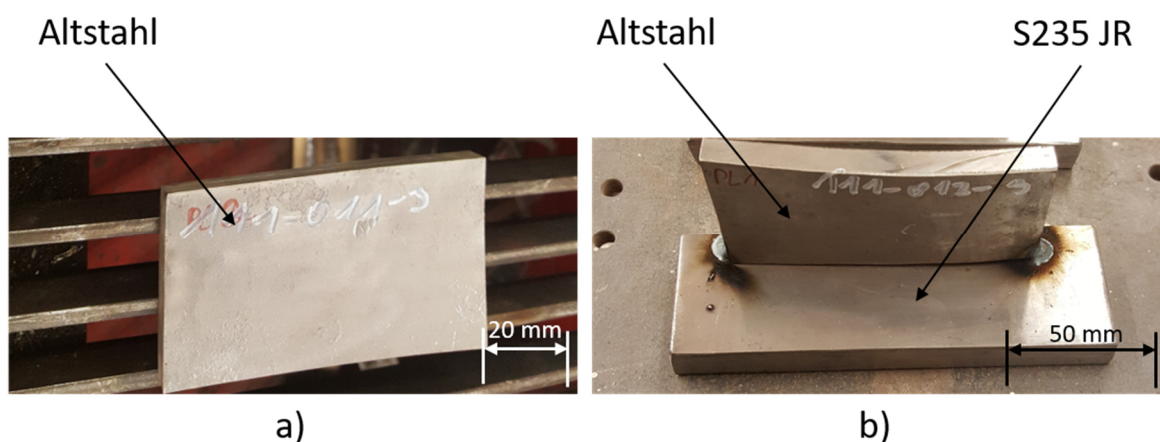


Abbildung 4-19: Vorbereitete Schweißversuchsproben a) Auftragsschweißprobe (111-011-3); b) Kehlnahtschweißprobe (111-012-3)

Wie aus Abbildung 4-19 zu erkennen ist, werden die Altstahl-Proben von jeglichem Schmutz und Lacken befreit, um eine metallisch blanke Oberfläche zu erreichen. Die Schweißproben für die Kehlnahtschweißung werden zur Positionierung geheftet.

Weiters werden neue Schweißpläne erstellt, die mit den in den Vorversuchen ausgewählten Parametersetups arbeiten. Die Materialien müssen hierfür angepasst werden und somit ergeben sich die in Tabelle 4-7 dargestellten Schweißpläne für die Hauptversuche. Es ist zu erwähnen, dass bei den Auftragsschweißungen mit jedem Schweißplan je drei

Schweißungen durchgeführt werden. Bei den Kehlnahtschweißungen werden je Schweißplan vier Schweißungen durchgeführt. Dies hat den Grund, dass durch mehrere Schweißungen, eine bessere Auswertestatistik dargestellt werden kann.

Die Schweißpläne werden wie bereits bei den Vorversuchen mit der Software STEEL-SOFT erstellt und sind dem Anhang E zu entnehmen.²⁰⁴

Tabelle 4-7: Übersicht zu den Schweißplänen in Anhang E zu den Hauptversuchen mit Altstahl

pWPS Nr.	Schweißart	Schweißverfahren
111-011	Auftragsschweißung	Elektrodenhandschweißen
111-012	Kehlnahtschweißung	Elektrodenhandschweißen
135-009	Auftragsschweißung	Metallaktivgasschweißung
135-010	Kehlnahtschweißung	Metallaktivgasschweißung

4.4.2 Ergebnisse und Diskussion

Es zeigt sich, dass die Durchführung der Schweißung problemlos möglich ist. Zum Teil ist eine vermehrte Entwicklung von Rauch und Spritzer zu beobachten. Weiters ist eine teils starke Verzugsneigung am Altstahl auffällig. Bei den Elektrodenhandschweißungen ist nach dem Schweißen eine erhöhte Schlackenmenge zu erkennen. Dies ist damit zu erklären, dass die basische Umhüllung der verwendeten Böhler FOX EV 50 (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5) Elektrode den im Stahl enthaltenen Phosphor und Schwefel in der Schlacke bindet.

Da auf Grund von Regelwerken bei Wartungsarbeiten an Altstahlkonstruktion das Schweißverfahren nach ÖNORM EN ISO 15613 qualifiziert werden muss, wird auch in dieser Arbeit das empfohlene Vorgehen der ÖNORM EN ISO 15613 angewendet.^{205,206}

²⁰⁴ (Steelsoft)

²⁰⁵ (Roller, et al., 2015)

²⁰⁶ (ÖNORM EN ISO 15613 2004 09 01, 2004)

Die Norm schreibt für das Schmelzschweißen mindestens folgende Aktivitäten vor:

- 100 % Sichtprüfung (VT)
- Oberflächenrissprüfung mittels Eindringprüfung (PT) oder Magnetpulverprüfung (MT)
- Härteprüfung für Stähle mit einer Streckgrenze (R_e) von mehr als 275 N/mm^2
- makroskopische Untersuchungen

Sichtprüfung (VT)

Vorerst wird eine VT Prüfung durchgeführt, wobei die Bewertung der Ungängen über die Norm EN ISO 5817: B erfolgt. Es zeigen sich durchwegs gute Ergebnisse. Mit der Ausnahme einer Schweißprobe, haben alle Probenstücke die Sichtprüfung bestanden. Es sind zwar vermehrt Spritzer und einzelne Poren zu sehen, diese liegen jedoch alle innerhalb der Norm. Die Schweißprobe mit der Nummer 111-012-1 hat aufgrund der starken Spritzer und die ungleichmäßige Schweißung die Sichtprüfung nicht bestanden. Ein möglicher Grund für die hohe Spritzer Bildung ist eine Verunreinigung der Oberfläche, oder eine Verunreinigung der Speckschicht. Abbildung 4-20 zeigt die durchgefallene Schweißprobe.



Abbildung 4-20: Schweißprobe 111-012-1; Verbund aus Altstahl und S235 JR, Sichtprüfung (VT)

Positiv ist, dass bei keiner der Proben Oberflächenrisse zu erkennen sind und dass das Nahtaussehen durchwegs gleichmäßig ist.²⁰⁷

²⁰⁷ (ÖNORM EN ISO 5817: 2014 10 15, 2014)

Eindringprüfung (PT)

Auch die Eindringprüfung ergibt ein positives Bild. Wie auch bei der Sichtprüfung, ist nur eine der Schweißproben durchgefallen. Die Bewertung erfolgt hier mittels der Norm EN ISO 23277: 2. Die Eindringprüfung bringt, wie auch die Sichtprüfung, keine Risse zum Vorschein. Die angezeigten Ungänzen (vereinzelt Poren) werden bereits bei der Sichtprüfung detektiert und für zulässig befunden. Die Schweißprobe welche durchgefallen ist, ist dieselbe die bereits bei der Sichtprüfung ausgeschieden ist.²⁰⁸

Abbildung 4-21 zeigt die Eindringprüfung an der Schweißprobe 111-012-1, die durchgefallen ist.

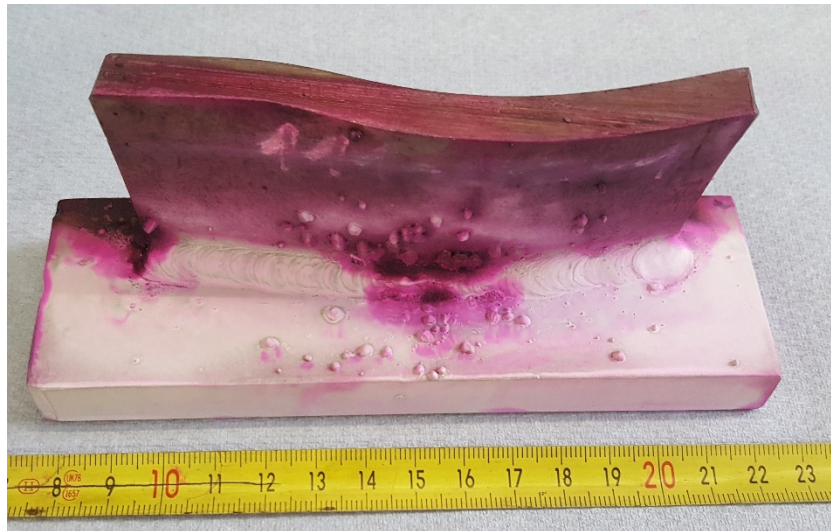


Abbildung 4-21: Schweißprobe 111-012-1; Verbund aus Altstahl und S235 JR, Eindringprüfung (PT)

In Abbildung 4-22 a) ist eine gereinigte Schweißprobe zu sehen bei der die Sichtprüfung durchgeführt wird, Abbildung 4-22 b) zeigt dieselbe Probe bei der Eindringprüfung. Es ist die Detektion von Poren im Schweißgut zu erkennen.

²⁰⁸ (ÖNORM EN ISO 23277: 2015 06 01, 2015)

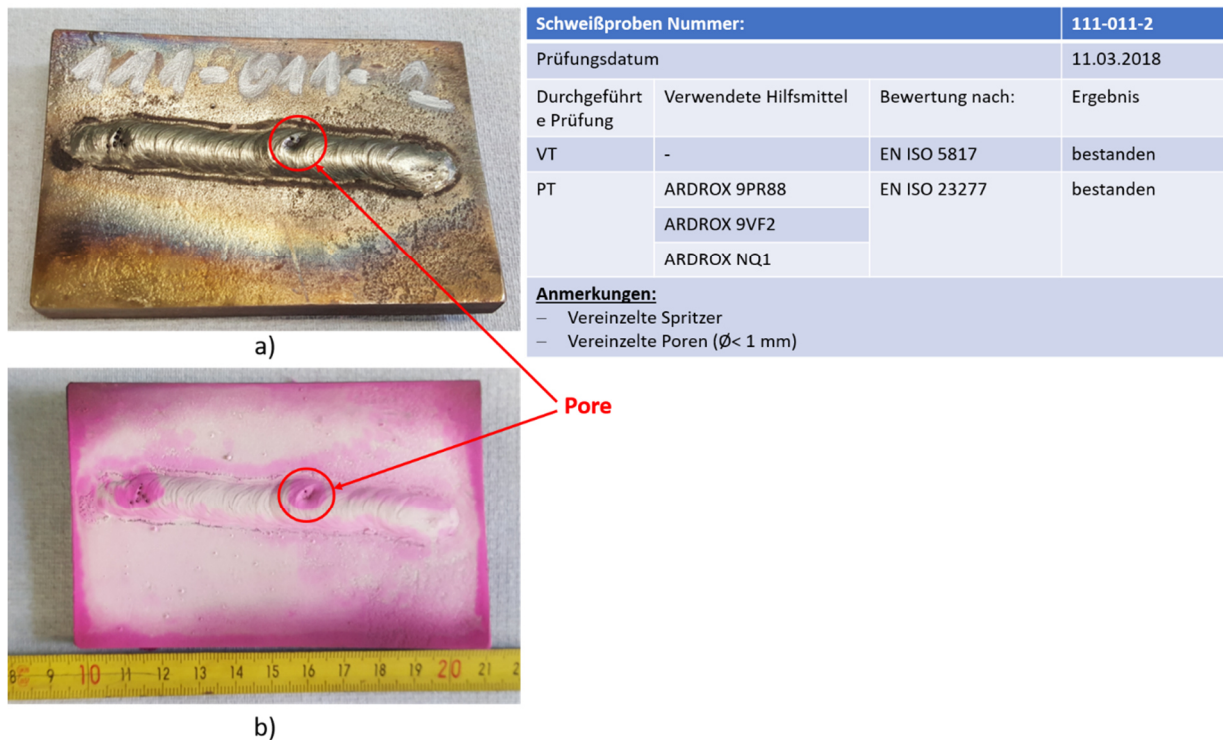


Abbildung 4-22: Auftragsschweißung-Altstahl; Auswertung der PT und der VT Prüfung; Proben Nummer: 111-011-2; a) VT; b) PT

Die Einzelauswertungen der Sichtprüfung und der Eindringprüfung sind dem Anhang G zu entnehmen. Um die Ergebnisse zu relativieren sei jedoch gesagt, dass die Prüfungen von keinem geprüften VT und PT Prüfer durchgeführt und bewertet wurden.

Die Härteprüfung kann aufgrund der vorhandenen Werte der Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit entfallen.²⁰⁹

Makroskopische Untersuchung

Die makroskopischen Untersuchungen werden mittels Adler Ätzung durchgeführt. Hier werden, wie bereits bei den Vorversuchen, die Einbrandtiefen vermessen und ausgewertet. Die detaillierten Einzelauswertungen sind dem Anhang H zu entnehmen. Abbildung 4-23 zeigt exemplarisch die Auswertung der Schweißprobe 135-010-1.

²⁰⁹ (ÖNORM EN ISO 15613 2004 09 01, 2004)

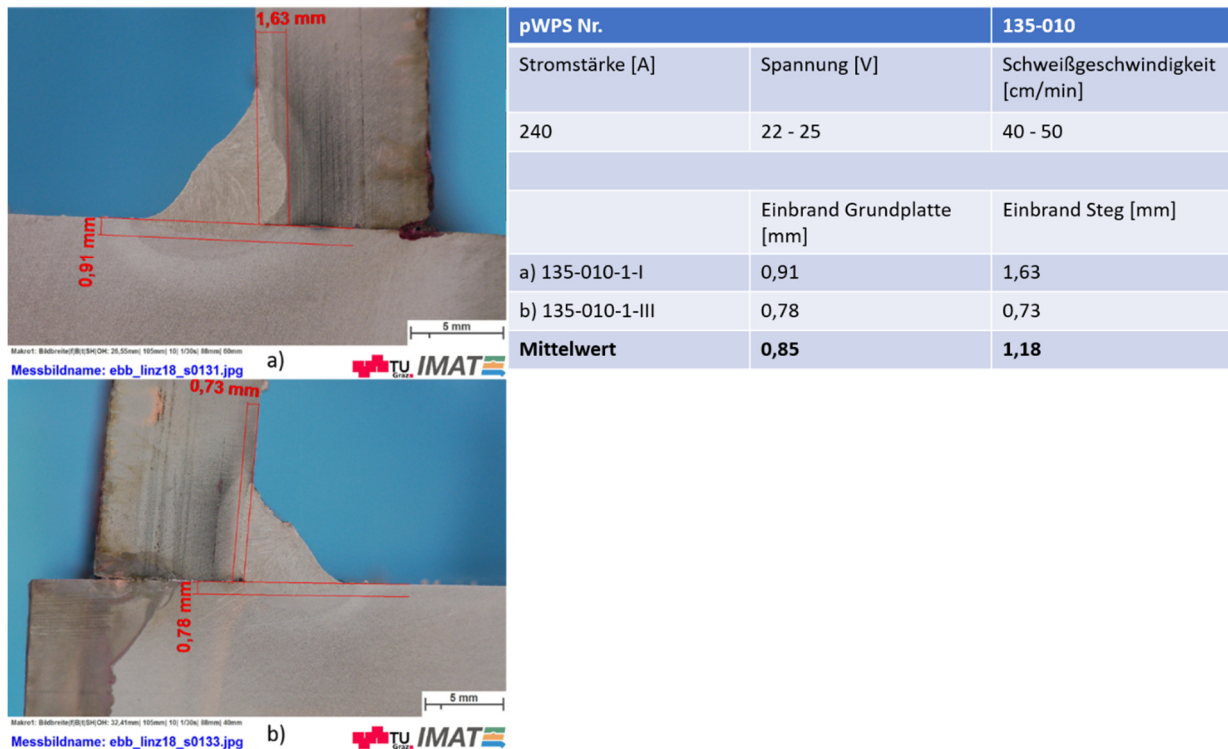


Abbildung 4-23: Kehlnahtschweißung – Grundplatte S235 JR / waagrecht – Altstahl / senkrecht; Auswertung der Schweißprobe 135-010-1; a) 135-010-1-I; b) 135-010-1-III

Der Tabelle 4-8 ist die gesamte Auswertung der einzelnen Versuche zu entnehmen. Es ist zu erkennen, dass die Einbrandtiefe bei den E-Hand Auftragsschweißungen geringer ist als jene der Metallaktivgasauftragsschweißung. Es ergibt sich hier für die Einbrandtiefe bei der E-Hand Auftragsschweißung ein Mittelwert von 1,81 mm bei einer Streckenenergie von 0,43 kJ/mm, für die Metallaktivgasschweißung ergibt sich ein Mittelwert von 2,08 mm bei einer Streckenenergie von 0,77 kJ/mm. Es stellt sich dieselbe Tendenz wie bei den Vorversuchen ein. Der Wert der maximalen Einbrandtiefe, der mit 2,3 mm gegeben ist, wird auch bei den Hauptversuchen nicht erreicht. Bei den Kehlnahtschweißungen ist zu beachten, dass der Altstahl als Steg verschweißt wird. Somit wird hier vor allem auf die Einbrandtiefe am Steg eingegangen. Es ergibt sich eine mittlere Einbrandtiefe am Steg bei der E-Hand-Schweißung von 1,10 mm bei einer Streckenenergie von 0,45 kJ/mm. Bei der Metallaktivgasschweißung ergibt sich eine mittlere Einbrandtiefe am Steg von 1,25 mm bei einer Streckenenergie von 0,77 kJ/mm. Auch hier ist zu erkennen, dass die E-Hand-Schweißung zu einem geringen Einbrand führt, jedoch zeigt sich, dass die maximal zulässige Einbrandtiefe von 2,3 mm auch hier nicht erreicht wird.

Auf Basis der ermittelten mittleren Einbrandtiefen ist zu erkennen, dass der Wert der maximal zulässigen Einbrandtiefe bei keiner der Schweißungen erreicht wird. Daraus

folgt, dass keine der Schweißungen über die seigerungsfreie Speckschicht hinausragt. Woraus abzuleiten ist, dass eine Schweißung problemlos möglich ist.

Tabelle 4-8: Auswertetabelle der Hauptversuche

Vorversuche			
Auftragsschweißen			
pWPS Nr.:		111-011	135-009
Stromstärke [A]		115,00	240,00
Spannung [V]	min	21,00	22,00
	max	25,00	25,00
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	min	35,00	40,00
	max	40,00	50,00
Streckenenergie [kJ/mm]	min	0,36	0,63
	max	0,49	0,90
	mittel	0,43	0,77
Einbrandtiefe [mm]	1	1,96	2,03
	2	1,62	2,08
	3	1,85	2,12
Einbrandtiefe Mittelwert [mm]		1,81	2,08
Kehlnaht			
pWPS Nr.:		111-012	135-010
Stromstärke [A]		130,00	240,00
Spannung [V]	min	20,00	22,00
	max	23,00	25,00
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	min	35,00	40,00
	max	40,00	50,00
Streckenenergie [kJ/mm]	min	0,39	0,63
	max	0,51	0,90
	mittel	0,45	0,77
Steg			
Einbrandtiefe [mm]	1	0,95	1,18
	2	1,14	1,11
	3	1,12	1,39
	4	1,19	1,32
Einbrandtiefe Mittelwert [mm]		1,10	1,25
Grundplatte			
Einbrandtiefe [mm]	1	1,08	0,85
	2	0,64	0,95
	3	0,77	0,73
	4	0,97	0,84
Einbrandtiefe Mittelwert [mm]		0,87	0,84

Bruchprüfung

Zusätzlich zu den Prüfungen welche die ÖNORM EN ISO 15613 verlangt, wird in der vorliegenden Arbeit noch eine Bruchprüfung nach ÖNORM EN ISO 9017 durchgeführt. Mit dieser sollen mögliche Risse und Poren im Inneren der Schweißnaht aufgefunden werden. Das Probestück wird, wie in Abbildung 4-24 gezeigt, in die Prüfvorrichtung eingelegt.^{210;211}

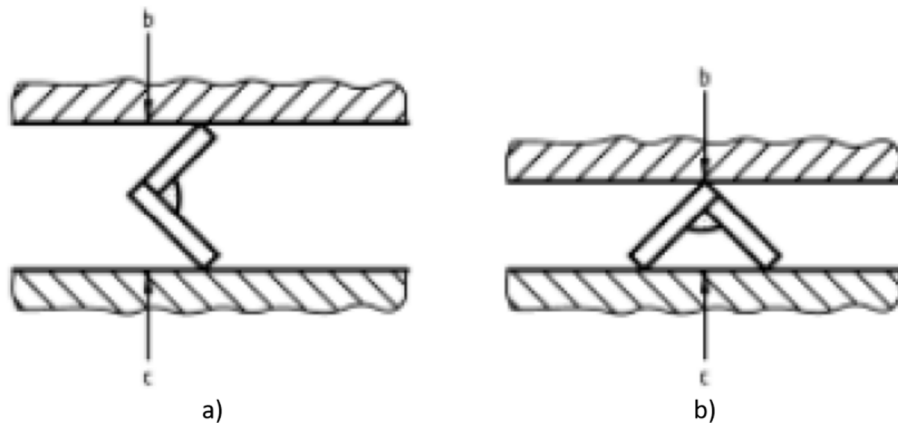


Abbildung 4-24: Bruchprüfungsmöglichkeiten nach ÖNORM EN ISO 9017²¹²

Der verwendete Prüfstandard wird aus der Literatur entnommen und sieht wie folgt aus:²¹³

- Probenlänge: 50 mm
- Einspannsituation: Abbildung 4-22 a)
- Prüftemperatur: 20°C
- Traversengeschwindigkeit: 0,5 mm/min
- Speicherrate 0,3 s (alle 0,3 s wird der Traversenweg und die Prüfkraft gespeichert)

Die Bruchprüfung wird mit derselben Maschine wie bei der Zugprüfung durchgeführt (RMC 100; Zwick).

Abbildung 4-25 zeigt die reale Einspannsituation der Bruchprüfung.

²¹⁰ (ÖNORM EN ISO 9017 2017 09 15, 2017)

²¹¹ (ÖNORM EN ISO 15613 2004 09 01, 2004)

²¹² (ÖNORM EN ISO 9017 2017 09 15, 2017)

²¹³ (Kerschbaumer, 2010 S. 152)

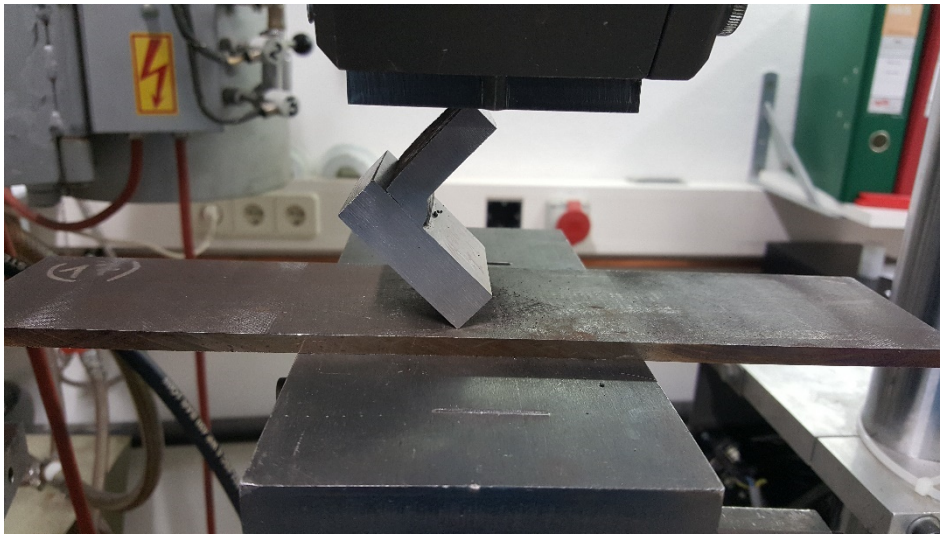


Abbildung 4-25: Prüfaufbau der Bruchprüfung

Es ergeben sich die in Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27 dargestellten Diagramme.

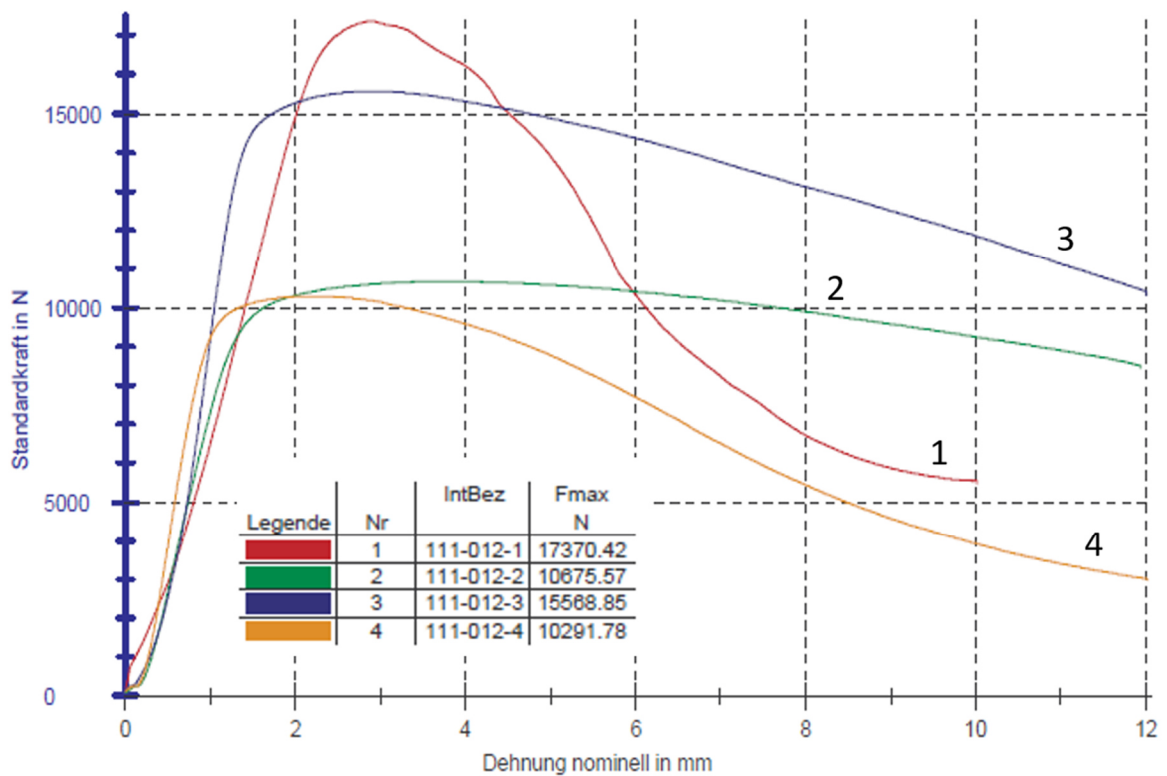


Abbildung 4-26: Bruchprüfung der Kehlnähte mit dem Schweißplan 111-012 geschweißt

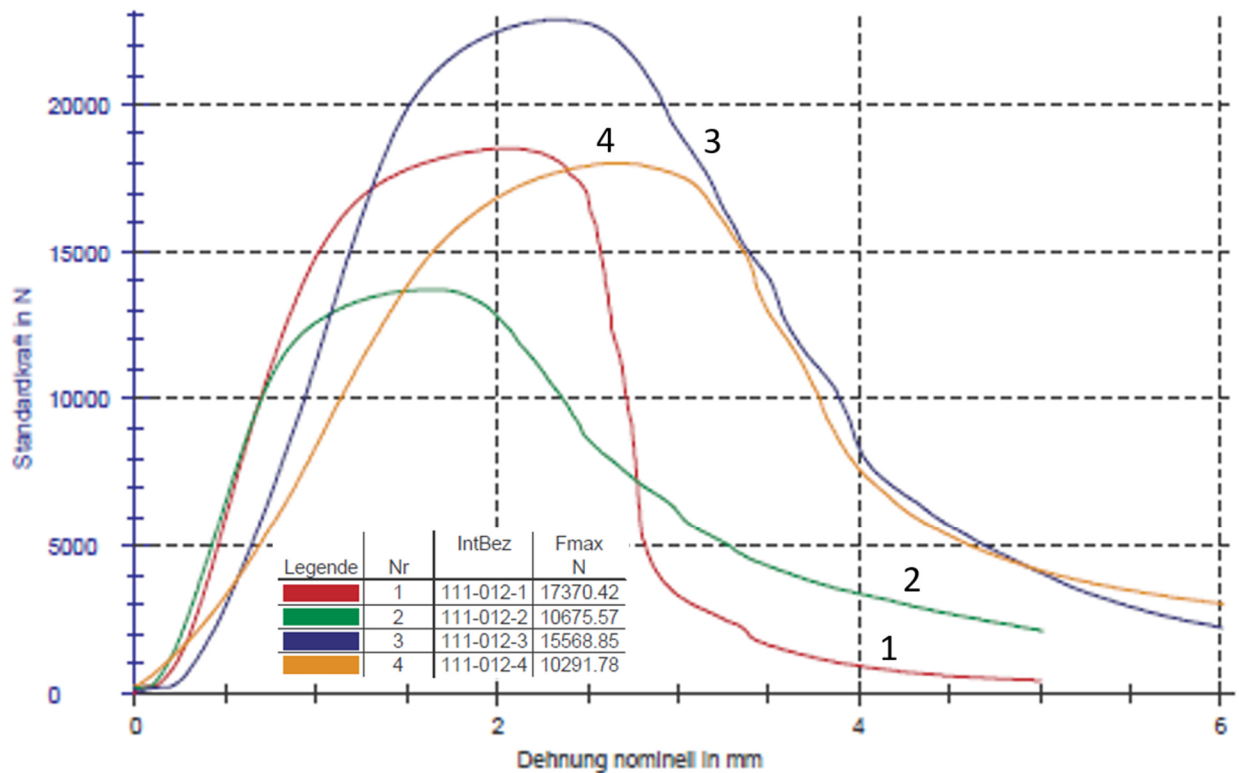


Abbildung 4-27: Bruchprüfung der Kehlnähte mit dem Schweißplan 135-010 geschweißt

Wie aus Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27 zu entnehmen ist, ist die maximal erreichbare Prüfkraft bei der Metall Aktivgasschweißung tendenziell höher. Weiters zeigt sich, dass bei der E-Hand-Schweißung der Abfall der Prüfkraft langsam von statten geht. Bei der Metallaktivgasschweißung ist der Kraftabfall steiler. Dies kann ein Hinweis auf eine höhere Sprödigkeit der MAG Schweißung sein.

In Tabelle 4-9 sind die Ergebnisse der Prüfkräfte zusammengefasst und gemittelt, wodurch sich für jede Schweißung eine gemittelte Prüfkraft ergibt.

Tabelle 4-9: Auswertung der Prüfkraft der Bruchprüfung

pWPS E-Hand	Maximale Prüfkraft [N]	pWPS MAG	Maximale Prüfkraft [N]
111-012-1	17370	135-010-1	18509
111-012-2	10676	135-010-2	13721
111-012-3	15569	135-010-3	22865
111-012-4	10292	135-010-4	18008
Mittelwert 111-012	13477	Mittelwert 135-010	18276

Es zeigt sich, dass keine der Proben, die mit dem E-Hand-Schweißverfahren geschweißt wurde, gebrochen ist. Dies spricht für ein sehr zähes Schweißgut, was wiederum typisch für die basischen Elektroden ist. Abbildung 4-28 zeigt exemplarisch eine Probe, die mittels E-Hand-Schweißverfahren geschweißt ist, nach der Bruchprüfung. Am linken Bild ist zu erkennen, dass diese Probe nicht durchgebrochen ist. Am rechten Bild ist die Bruchfläche zu erkennen.



Abbildung 4-28: Bruchprüfung 111-012-1

Die Bruchprüfung der Schweißproben, die mit dem Metallaktivgasverfahren geschweißt wurde, sind alle gebrochen. Bis auf eine Probe sind die Probenstücke am Steg gebrochen. Das Bruchbild zeigt deutlich die zu erwartenden Terrassenbrüche. Diese werden

durch die vorhandenen Mangansulfid Einschlüsse im Stahl hervorgerufen. Keine der Proben zeigt Anzeichen auf Heißrisse. Es sind vereinzelt Poren zu entdecken, diese liegen jedoch alle im zulässigen Bereich. In Abbildung 4-29 ist ein Probenstück der MAG Schweißung nach der Bruchprüfung dargestellt. Die terrassenförmige Anordnung der Bruchfläche ist deutlich zu erkennen.

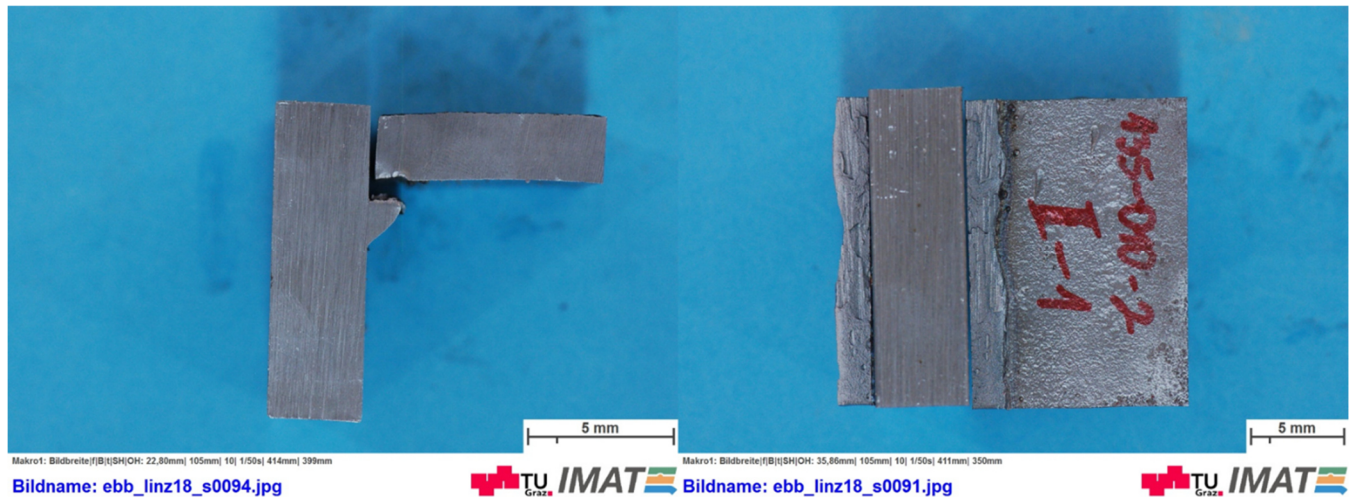


Abbildung 4-29: Bruchprüfung 135-010-2

Die getätigten Untersuchungen ergeben eine unproblematische Schweißbarkeit des Altstahles mit dem E-Hand-Verfahren mit basischer Elektrode und mit dem MAG-Schweißverfahren mit dem BÖHLER EMK 6 (EN ISO 14341: G3Si1) Schweißzusatz.

5 Zusammenfassung

Inhalt dieser Arbeit ist die Charakterisierung des Stahles der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897 und die Durchführung von Schweißversuchen mit diesem Stahl. Hierfür wurde zunächst die Literatur zu dem Thema der Stahlherstellung im 19. und 20. Jahrhundert und die Vergussmethoden zu jener Zeit erarbeitet. In einem weiteren Schritt wurde der Stahl metallographisch und über zerstörende Versuche mechanisch charakterisiert. Anschließend wurde die Makro- und Mikrostruktur des Stahles mittels geeigneter Ätzverfahren ermittelt. Die Ergebnisse dieser Versuche führten dazu, dass ein moderner Vergleichsstahl (S235 JR) ermittelt werden konnte, der für einige der weiteren Versuche zum Einsatz kam. Mit den Ergebnissen der Charakterisierung konnte die Schweißbarkeit ermittelt werden.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden in einem weiteren Schritt die Schweißversuche durchgeführt. Diese gliederten sich in die Vorversuche und die Hauptversuche. Die Vorversuche wurden aus Materialmangel mit dem modernen Vergleichswerkstoff durchgeführt. Bei den Hauptversuchen wurden die Auftragsschweißungen auf dem Altstahl durchgeführt. Bei den Kehlnahtschweißungen wurde als Grundplatte der moderne Vergleichswerkstoff verwendet und als Steg der Altstahl.

In Folge der Vorversuche wurden jeweils vier Auftragsschweißungen mit dem Elektrodenhandverfahren (E-Hand, 111) und mit dem Metallaktivgasverfahren (MAG, 135) durchgeführt. Weiters wurden noch jeweils vier Kehlnahtschweißungen mit dem Elektrodenhandverfahren und mit dem Metallaktivgasverfahren geschweißt. Somit ergaben sich 16 Parametersetups die verschweißt wurden. Die Schweißproben konnten aufgrund ihrer Einbrandtiefe bewertet werden. Die Bewertung erfolgte aufgrund der, mit dem Baumanabdrücken ermittelten, mittleren Speckschichtdicke. Ziel war es, dass die Einbrandtiefe nicht über die Speckschichtdicke hinaus ragt, um zu verhindern, dass die Seigerungen im Inneren des Querschnitts das Schweißgut negativ beeinflussen. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurden nun jeweils ein Parametersetup für die Elektrodenhand Auftragsschweißung, die Elektrodenhand Kehlnahtschweißung, die Metallaktivgas Auftragsschweißung und die Metallaktivgas Kehlnahtschweißung gewählt. Diese Parametersetups konnten in einem weiteren Schritt für die Hauptversuche aufbereitet und vier neue Schweißpläne erarbeitet werden.

Schlussendlich wurden die Hauptversuche und eine Verfahrensprüfung durchgeführt. Zusätzlich zur Verfahrensprüfung wurde noch eine Bruchprüfung ausgeführt. Die Auswertung der Hauptversuche zeigte, dass der vorhandene Altstahl ohne besondere Vorkehrungen mit den ermittelten Schweißparametern schweißgeeignet ist. Entgegen der Erwartungen, welche sich auf die Literatur stützten, zeigten sich keine Heißrisse. Die

Einbrandtiefe ist im Altstahl bei den selben Parametersetups vergleichbar mit jenen am modernen Vergleichsstahl. Weiters zeigte sich, dass auch die Schweißung selbst problemlos möglich war. Dies ist jedoch unter Umständen auf die sehr gute elektronische Regelung der verwendeten Schweißstromquelle (WELBEE 500L) zurück zu führen.

Somit ist abschließend zu sagen, dass im speziellen Fall der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897 das Schweißen des Plattenmaterials problemlos möglich ist. Dies gilt für den Fall, dass die Einbrandtiefe die Speckschichtdicke nicht überschreitet. Im Allgemeinen ist jedoch zu erwähnen, dass die Literatur darauf verweist, dass jeder Fall von Altstahlschweißungen separat bewertet werden muss, da zu jener Zeit noch keine Standards in der Stahlerzeugung existierten. Die Anwendung der Ergebnisse der Speckschichtdickenmessungen, in der vorliegenden Diplomarbeit, ist auf den Stahl der Linzer Eisenbahnbrücke von 1897 beschränkt. Die Werte der Einbrandtiefe bei gewissen Wärmeeinbringungen ist jedoch universell anwendbar.

6 Ausblick

In der gegenständlichen Arbeit wurden die Schweißversuche mit dem Plattenmaterial durchgeführt. Weitere Schweißversuche mit dem Winkelmaterial könnten weitere Aufschlüsse über die Schweißbarkeit von Altstählen liefern. Die hat den Grund, da es sich hier unter Umständen um einen anderen Stahl handelt. Dies müsste jedoch zuvor mittels weiterer Analysen verifiziert werden.

Die sehr geringen Werte der Kerbschlagarbeit könnten auf Alterungserscheinungen zurückzuführen sein (durch die Bildung von Fe_4N). Um dies validieren zu können, müssten verschiedene Wärmebehandlungen, wie das Rekristallisationsglühen, durchgeführt werden. Aufgrund dieses Versuches könnte vermutlich eine bessere Vergleichbarkeit mit dem modernen Vergleichsstahl (S235 JR) erreicht werden.

Ein weiterer Schritt in der Charakterisierung des Stahles würde darin bestehen, dass der Querschnitt unter einem bestimmten Winkel angeschliffen wird um den Seigerungsstatus näher zu charakterisieren. Über den entstandenen Querschnitt könnte dann mittels Funkenemissionsspektroskopie die chemische Zusammensetzung in jeder der Querschnittszonen (Speckschicht, Porenband und Blockseigerung) ermittelt werden.

Um ein besseres Verständnis über das Verhalten von Altstählen während der Schweißung zu erlangen, müssten noch mehrere Versuche an unterschiedlichen Stählen durchgeführt werden. Somit könnte man eine statistische Auswertung über die vorhandenen Speckschichtdicken erstellen. Mit diesen Werten könnte eine Tabelle erstellt werden bei der zu jeder Speckschichtdicke ein dazugehöriges Parametersetup gegeben ist.

7 Literaturverzeichnis

- Aichele, Günter und Behnisch, Hellmuth. 2015.** Geschichte der Schweißtechnik. Düsseldorf : DVS Media GmbH, 2015. Bd. 159. 978-3-87155-238-0.
- Bargel, Hans-Jürgen und Schulze, Günter. 2008.** *Werkstoffkunde*. Berlin Heidelberg : Springer, 2008. 978-3-540-79297-0.
- Berns, Hans und Theisen, Werner. 2013.** Eisenwerkstoffe. *Stahl und Gusseisen*. Bochum : s.n., 2013. 4. 978-3-540-79957-3.
- ChemCargoo. 2016.** ChemCargoo. [Online] 2016. [Zitat vom: 23. Mai 2017.] http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/1/pc/pc_04/pc_04_04/pc_04_04_01.vlu/Page/vsc/de/ch/1/pc/pc_04/pc_04_04/pc_04_04_04.vscml.html.
- Collette, Quentin, et al. 2013.** *Experimental investigations on hot-driven structural rivets in historical French and Belgian wrought-iron structures (1880s - 1890s)*. Brüssel : s.n., 2013.
- DAIHEN VARSTROJ.** [Online] [Zitat vom: 1. März 2018.] <http://daihenvarstroj.hu/mig-mag-impulzus-hegesztokeszulek>.
- Dilthey, Ulrich. 2005.** *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 - Schweiß- und Schneidtechnologien*. Aachen : Springer, 2005. 3-540-21673-1.
- DIN 50125 : 2016 - 12. 2016.** *DIN 50125 : 2016 - 12; Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben*. 2016.
- DIN 8528-1: 1973-06. 1973.** DIN 8528-1: 1973-06; Schweißbarkeit; metallische Werkstoffe, Begriffe. 1973.
- Fahrenwaldt, Hans j., Schuler, Volkmar und Twrdek, Jürgen. 2014.** *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. 978-3-658-03141-1.
- Gräfen, Hubert. 1993.** *Lexikon Werkstofftechnik*. Berlin Heidelberg : VDI, 1993. 978-3-642-51732-7.
- Helmerich, Rosemarie. 2005.** Alte Stähle und Stahlbaukonstruktionen. *Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückenträgern un Messungen von 1990 bis 2003*. Berlin : Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2005. 3-86509-362-0.
- Hönigsberg, Otto. 1914.** Die Kessel- und Maschinenbaumaterialien nach Erfahrungen aus der Abnahmepraxis kurz dargestellt für Werkstätten- und Betriebsingenieure und für Konstrukteure. Berlin : Julius Springer, 1914. 978-3-642-91735-6.

Hosford, William F. 2012. Iron and Steel. Michigan : Cambridge University Press, 2012. 978-1-107-01798-6.

<http://genlex.de/schlagwort/puddelofen/>. 2015. Genealogie-Lexikon. [Online] 2015. [Zitat vom: 22. Mai 2017.] <http://genlex.de/schlagwort/puddelofen/>.

<http://mein.salzburg.com/fotoblog/heimat/2010/12/salzachbrucke.html>. Salzburger Nachrichten. [Online] [Zitat vom: 09. März 2018.] <http://mein.salzburg.com/fotoblog/heimat/2010/12/salzachbrucke.html>.

http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_feconi_gruppe.html. [Online] Universität Freiburg.[Zitat vom: 22. Mai 2017.] http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_feconi_gruppe.html.

<http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/25-spannungs-dehnungs-diagramm>. Maschinenbau-Wissen.de. [Online] [Zitat vom: 10. Jänner 2018.] <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/metall/25-spannungs-dehnungs-diagramm>.

<http://www.poly-mech.ch/poly-mech/web-stahlherstellung/desoxidieren.html#a2>.

<http://www.poly-mech.ch/poly-mech/web-stahlherstellung/desoxidieren.html#a2>.

[Online] [Zitat vom: 15. April 2018.]

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bessemerbirne>. 2010.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bessemerbirne>. [Online] 2010. [Zitat vom: 15. April 2018.]

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bessemerbirne>.

[https://de.wikipedia.org/wiki/Linz-Donawitz-](https://de.wikipedia.org/wiki/Linz-Donawitz-Verfahren#/media/File:Sch%C3%A9ma_LD_m%C3%A9tallurgie.svg)

[Verfahren#/media/File:Sch%C3%A9ma_LD_m%C3%A9tallurgie.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Linz-Donawitz-Verfahren#/media/File:Sch%C3%A9ma_LD_m%C3%A9tallurgie.svg). wikipedia.

[Online] [Zitat vom: 16. April 2018.] [https://de.wikipedia.org/wiki/Linz-Donawitz-](https://de.wikipedia.org/wiki/Linz-Donawitz-Verfahren#/media/File:Sch%C3%A9ma_LD_m%C3%A9tallurgie.svg)

[Verfahren#/media/File:Sch%C3%A9ma_LD_m%C3%A9tallurgie.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Linz-Donawitz-Verfahren#/media/File:Sch%C3%A9ma_LD_m%C3%A9tallurgie.svg).

https://de.wikipedia.org/wiki/M%C3%BCngstener_Br%C3%BCcke. wikipedia.org.

[Online] [Zitat vom: 09. März 2018.]

https://de.wikipedia.org/wiki/M%C3%BCngstener_Br%C3%BCcke.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Nietvorgang>. <https://de.wikipedia.org/wiki/Nietvorgang>.

[Online] [Zitat vom: 7. August 2017.] <https://de.wikipedia.org/wiki/Nietvorgang>.

https://de.wikipedia.org/wiki/SBB_Aarebr%C3%BCcke_Koblenz. wikipedia.org.

[Online] [Zitat vom: 09. März 2018.]

https://de.wikipedia.org/wiki/SBB_Aarebr%C3%BCcke_Koblenz.

<https://www.swissbeam.ch/dienstleistungen/pruefungen/kerbschlagbiegeversuch/>

[/](https://www.swissbeam.ch/dienstleistungen/pruefungen/kerbschlagbiegeversuch/). Swiss Beam. [Online] [Zitat vom: 10. Jänner 2018.]

<https://www.swissbeam.ch/dienstleistungen/pruefungen/kerbschlagbiegeversuch/>.

- Kerschbaumer, Klaus Günther. 2010.** *Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von artfremd geschweißten Kehlnähten an hochfesten TM-Stahl.* Graz : s.n., 2010.
- Leuschke, Uwe. 2013.** *Einfluss von Ausscheidungen auf das Duktilitätsverhalten einzelner Erstarrungsgefüge während der Drahtwalzung am Beispiel von Automatenstahl.* Aachen : s.n., 2013.
- LINDE. 2017.** Produktdatenblatt Linde CORGON 18 (EN ISO 14175 - M21-ArC-18). Pullach : Linde Gas Division, 2017.
- Lüddecke, Falk. 2006.** Ein Beitrag zur Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke unter besonderer Berücksichtigung des Fügeverfahrens Schweißen. Berlin : Wirtschaftsverlag N. W.; Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2006. Bd. 17. 3-86509-533-X.
- Mang, Fiedrich, Steidl, Gerhard und Bucak, Ömer. 1985.** Altstahl im Bauwesen. *Schweißen und Schneidenn* 37. 1985, 1.
- Metallograph. Metallograph.** [Online] [Zitat vom: 11. Oktober 2017.] <http://www.metallograf.de/start.htm?/probenvorbereitung/mikro1.htm>.
- Naumann, Friedrich Karl und Hengler, Erich. 1962.** Muscheliger Bruch bei Stahl, seine Ursachen und Bildungsbedingungen. *Stahl und Eisen.* 1962, Bd. 10.
- ÖNORM EN 10025-2: 2011 06 01. 2011.** *ÖNORM EN 10025-2 Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle.* 2011.
- ÖNORM EN 10027-1: 2016 12 01. 2016.** *ÖNORM EN 10027-1: 2016 12 01; Bezeichnungssysteme für Stähle - Teil 1: Kurznamen.* [Online] 2016.
- ÖNORM EN ISO 148-1: 2010 12 01. 2010.** *ÖNORM EN ISO 148-1: 2010 12 01; Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren.* 2010.
- ÖNORM EN ISO 15613 2004 09 01. 2004.** *ÖNORM EN ISO 15613 2004 09 01; Anforderung un Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Qualifizierung aufgrund einer vorgezogenen Arbeitsprüfung.* 2004.
- ÖNORM EN ISO 18265: 2013 12 01. 2013.** *ÖNORM EN ISO 18265: 2013 12 01; Metallische Werkstoffe - Umwertung von Härtewerten.* 2013.
- ÖNORM EN ISO 23277: 2015 06 01. 2015.** *ÖNORM EN ISO 23277: 2015 06 01; Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Eindrigprüfung von Schweißverbindungen - Zulässigkeitsgrenzen.* 2015.

- ÖNORM EN ISO 5817: 2014 10 15. 2014.** *ÖNORM EN ISO 5817: 2014 10 15; Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und anderen Legierungen- Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten.* 2014.
- ÖNORM EN ISO 6507-1: 2016 08 15. 2016.** *ÖNORM EN ISO 6507-1: 2016 08 15; Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers; Teil 1: Prüfverfahren.* 2016.
- ÖNORM EN ISO 6892-1: 2017 02 01. 2017.** *ÖNORM EN ISO 6892-1: 2017 02 01; Metallische Werkstoffe - Zugversuch; Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.* [Online]
- ÖNORM EN ISO 9017 2017 09 15. 2017.** *ÖNORM EN ISO 9017 2017 09 15; Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Bruchprüfung.* 2017.
- OTC DAIHEN EUROPE.** OTC DAIHEN EUROPE. [Online] [Zitat vom: 01. März 2018.] <http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2331>.
- Petersen, Christian. 2013.** *Stahlbau.* Wiesbaden : Springer, 2013. 978-3-8348-8610-1.
- Petzow, Günter. 1978.** *Metallographic Etching; Metallographic and Ceramographic Methods for Revealing Microstructure.* Berlin : Gebrüder Borntraeger, 1978. 0-87170-002-6.
- Roik, Karlheinz. 1983.** *Vorlesungen über Stahlbau.* Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 1983. 3-433-00969-4.
- Roller, Meinhard und Münzker, Friedrich. 2015.** *Richtlinie Revitalisierung historischer Stahlbauten. Konstruktion und Technologie.* Wien : Österreichischer Stahlbauverband, 2015.
- Salbert, Georg. 2010.** *Metallographie; Grundlagen und Anwendung.* Stuttgart : Gebrüder Borntraeger, 2010. 978-3-443-23017-3.
- Schulze, Günter. 2010.** *Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe.* Heidelberg : Springer, 2010. 978-3-642-03183-0.
- Steelsoft.** Steelsoft. [Online] Steelsoft.[Zitat vom: 22. 02 2018.] <https://www.steelsoft.at/Account/Login?ReturnUrl=%2f>.
- Streitt, Ute, Stadler, Gerhard A. und Schiller, Elisabeth. 2016.** *Die Linzer Eisenbahnbrücke.* Linz : Oberösterreichisches Landesmuseum, 2016. 978-3-85474-282-1.
- Vander Voort, George F. 1999.** *Metallography, Principles and Practice.* New York : ASM International, 1999. 978-0-87170-672-0.
- Verein Deutscher Eisenhüttenleute im NS.-Bund Deutscher Technik. 1944.** *Die Technik des Eisenhüttenwesens. Gemeinfasslichen Darstellung des Eisenhüttenwesens.* Düsseldorf : Stahleisen m.b.H., 1944. 5.

voestalpine Böhler Welding Austria GmbH. 2013. *Böhler Wissenswertes für den Schweißer.* Kapfenberg : s.n., 2013.

Wedding, Hermann. 1884. Die Darstellung des Schmiedbaren Eisens in Praktischer und Theoretischer Beziehung. Braunschweig : Friedrich Vieweg und Sohn, 1884.

Weilhammer, Gabriele. 2017. Möglichkeiten und Grenzen der Farbätzung nach Klemm. *Praktische Metallographie.* 05.2017, 2017, Bd. Praktische Metallographie, 05.2017.

Weißbach, Wolfgang. 2007. *Werkstoffkunde.* Wiesbaden : Vieweg & Sohn, 2007. 978-3-8348-0295-8.

Weißberger, Bruno. 1911. Walzbetrieb und Kalibrierung in graphischer Darstellung. *Stahl und Eisen.* 1911, Nr.14.

Werkstoffdatenblatt S 235 JR. Schachermayer. [Online]
https://webshop.schachermayer.com/cat/media/pdf/medias/docus/53/sdat_Datenblatt_S235JR.pdf.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: a) Müngstener Brücke bei Solingen um 1894 (D); Salzachbrücke bei Laufen / Oberndorf bei Salzburg (A) um 1901; c) Aarebrücke bei Koblenz (CH) um 1892	2
Abbildung 1-2: Abriss der Linzer Eisenbahnbrücke über die Donau, Juni 2016.....	3
Abbildung 2-1: Herstellverfahren einer Heißnietverbindung.....	7
Abbildung 2-2: Darstellung der Stahlherstellungsverfahren, Fügemethoden, Stahlsorten und Mindeststreckgrenzen über die Jahreszahl	10
Abbildung 2-3: Darstellung eines Puddelofens.....	11
Abbildung 2-4: Darstellung der Entkohlung im Eisen-Kohlenstoffdiagramm	14
Abbildung 2-5: Schweißisen aus einer Brücke von 1890	15
Abbildung 2-6: Darstellung der verwendeten Stahlherstellungsverfahren um 1900	17
Abbildung 2-7: Darstellung einer Bessemerbirne	19
Abbildung 2-8: Arbeitsschema des Thomas-Prozesses.....	24
Abbildung 2-9: Gaserzeuger mit korb förmigem Rost	26
Abbildung 2-10: Mit Generatorgas beheizter Siemens-Martin Ofen.....	28
Abbildung 2-11: Querschnitt eines Siemens-Martin Ofens.....	29
Abbildung 2-12: Zusammenhang Kohlenstoffgehalt und Sauerstoffgehalt im basischen Siemens Martin Ofen.....	33
Abbildung 2-13: Gegenüberstellung unberuhigt / beruhigt vergossener Stahl	38
Abbildung 2-14: Prinzip LD-Verfahren.....	40
Abbildung 3-1: Probenbeispiele für Kernlochproben	42
Abbildung 3-2: Gesamtansicht aller zur Verfügung stehender Proben.....	43
Abbildung 3-3: Baumannabdrücke des Flusstahls von a) Platte; b) Winkelprofil.....	46
Abbildung 3-4: Mit Heyn geätzte Schliffe a) Längsschliff eines Automatenstahls; b) Kraftflussverlauf einer geschmiedeten Schraube	47
Abbildung 3-5: Mehrlagenschweißung, geätzt mit Heyn	47
Abbildung 3-6: Winkelmaterial (WL1_2_NI1) - Nital Ätzung des Flusstahls	49

Abbildung 3-7: Schliffe mit Klemm I geätzt, a) Tiefziehblech mit Ferrit (blau-braun) und Zementit (weiß); b) Baustahl mit Phosphorseigerungen (gelb-braun).....	50
Abbildung 3-8: Zusammenhang zwischen Schwefel- und Mangangehalt mit der Rotbrüchigkeit von Stahl	52
Abbildung 3-9: Plattenmaterial (PL3_o_2_Ni2) - Mangansulfid Ausscheidungen in der Seigerungszone des untersuchten Altstahls	53
Abbildung 3-10: Einfluss der Alterungserscheinungen und der Erschmelzungsmethode auf die Kerbschlagzähigkeit	56
Abbildung 3-11: a) Baumannabdruck Plattenmaterial mit Speckschichtbemaßung; b) Baumannabdruck Winkelmaterial mit Speckschichtbemaßung.....	58
Abbildung 3-12: Heyn Ätzung; a) Plattenmaterial (PI3_o_2_BM1); b) Winkelmaterial (WL1_1); c) Niet (PL3_3_2).....	60
Abbildung 3-13: Plattenmaterial (PL3_o_2_Ni1) - 3 % Nital Ätzung a) Speckschicht; b) Porenband; c) Seigerungszone.....	61
Abbildung 3-14: Vergleich der Speckschichten - 3% Nital Ätzung: a) Plattenmaterial (PL3_o_2_Ni1), b) Winkelmaterial (WL1_2_Ni1)	62
Abbildung 3-15: Plattenmaterial (PI3_o_2_KI) - Klemm Ätzung a) Speckschicht; b) Porenband; c) Seigerungszone.....	63
Abbildung 3-16: Plattenmaterial (PL3_o_2_Ni2) - EDX Analyse „Speckschicht“.....	64
Abbildung 3-17: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - EDX Analyse Referenzmessung am Ferritkorn „Speckschicht“	64
Abbildung 3-18: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - EDX Analyse Messung der Korngrenzenanreicherung „Speckschicht“	65
Abbildung 3-19: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - Mikrohärtmessung a) Referenzmessung am Ferritkorn; b) Messung der Korngrenzenanreicherung „Speckschicht“	65
Abbildung 3-20: Winkelmaterial (WL1_2_Ni1) - EDX Analyse Messung einer charakteristischen Seigerung „Speckschicht“.....	66
Abbildung 3-21: Prüfprinzip Vickers Härtmessung	68
Abbildung 3-22: Bezeichnungsbeispiel Härte nach Vickers	69
Abbildung 3-23: Schematischer Aufbau einer Kerbschlagbiegeprüfung.....	70
Abbildung 3-24: Technisches Spannungs- Dehnungs Diagramm	72
Abbildung 3-25: Kerbschlagprobe	75

Abbildung 3-26: a) Bruchfläche Kerbschlagbiegeprobe Plattenmaterial (PL3_u_2); b) Bruchfläche Kerbschlagbiegeprobe Winkelmaterial	77
Abbildung 3-27: Maßzeichnung einer Flachzugprobe Form E	78
Abbildung 3-28: Spannungs-Dehnungskurven Zugversuche	79
Abbildung 3-29: Geprüfte Flachzugproben; a) Plattenmaterial (PL3_o_2_ZV); b) Plattenmaterial (PL3_u_2_ZV); c) Winkelmaterial (WL1_2_ZV)	80
Abbildung 4-1: Schweißversuche in Prozessdarstellung.....	82
Abbildung 4-2: Welbee P500L.....	83
Abbildung 4-3: Konstantspannungscharakteristik einer Schweißstromquelle	84
Abbildung 4-4: Einflussfaktoren auf die Schweißbarkeit.....	86
Abbildung 4-5: Gestaltungsmöglichkeiten zur Ertüchtigung von Altstahlkonstruktionen Teil 1 (grau - Altstahl; blau - moderner Baustahl).....	90
Abbildung 4-6: Gestaltungsmöglichkeiten zur Ertüchtigung von Altstahlkonstruktionen Teil 2 (grau - Altstahl; blau - moderner Baustahl).....	90
Abbildung 4-7: Verfahrensprinzip E-Hand-Schweißen	92
Abbildung 4-8: Fallende Kennlinie einer Schweißstromquelle.....	93
Abbildung 4-9: Verfahrensprinzip Metallaktivgas Schweißen.....	94
Abbildung 4-10: Maßzeichnung für die Auftragsschweißungen auf S235 JR.....	100
Abbildung 4-11: Probenplatten S235 JR mit markierten und nummerierten Linien für die Auftragsschweißungen.....	100
Abbildung 4-12: Maßzeichnung für die Kehlnahtschweißungen.....	101
Abbildung 4-13: Schweißaufbau für Kehlnahtschweißungen a) Elektrodenhandschweißen; b) Metall Aktivgasschweißen.....	101
Abbildung 4-14: Durchgeführte Auftragsschweißungen a) Elektrodenhandschweißen; b) Metall Aktivgasschweißen	102
Abbildung 4-15: Durchgeführte Kehlnahtschweißungen a) Elektrodenhandschweißen; b) Metall Aktivgasschweißen	103
Abbildung 4-16: Schnittvorbereitung a) Auftragsschweißung; b) Kehlnahtschweißung	104
Abbildung 4-17: Auswertung einer MAG Schweißung.....	104

Abbildung 4-18: Einbrandtiefe (2)/ Tiefe der WEZ (2) über die Streckenenergie; a) Auftragsschweißung E-Hand; b) Auftragsschweißung MAG; c) Kehlnahtschweißung Steg E-Hand; d) Kehlnahtschweißung Grundplatte E-Hand; e) Kehlnahtschweißung Steg MAG; f) Kehlnahtschweißung Grundplatte MAG	107
Abbildung 4-19: Vorbereitete Schweißversuchsproben a) Auftragsschweißprobe (111-011-3); b) Kehlnahtschweißprobe (111-012-3).....	109
Abbildung 4-20: Schweißprobe 111-012-1; Verbund aus Altstahl und S235 JR, Sichtprüfung (VT)	111
Abbildung 4-21: Schweißprobe 111-012-1; Verbund aus Altstahl und S235 JR, Eindringprüfung (PT).....	112
Abbildung 4-22: Auftragsschweißung- Altstahl; Auswertung der PT und der VT Prüfung; Proben Nummer: 111-011-2; a) VT; b) PT	113
Abbildung 4-23: Kehlnahtschweißung – Grundplatte S235 JR / waagrecht – Altstahl / senkrecht; Auswertung der Schweißprobe 135-010-1; a) 135-010-1-I; b) 135-010-1-III	114
Abbildung 4-24: Bruchprüfungsmöglichkeiten nach ÖNORM EN ISO 9017.....	116
Abbildung 4-25: Prüfaufbau der Bruchprüfung	117
Abbildung 4-26: Bruchprüfung der Kehlnähte mit dem Schweißplan 111-012 geschweißt	117
Abbildung 4-27: Bruchprüfung der Kehlnähte mit dem Schweißplan 135-010 geschweißt	118
Abbildung 4-28: Bruchprüfung 111-012-1	119
Abbildung 4-29: Bruchprüfung 135-010-2	120
Abbildung A-0-1: Übersicht über die Platte PL3 a) Ansicht von unten; b) Ansicht von oben	I
Abbildung A-0-2: Detailansicht zur Probenentnahme a) Ansicht Unterplatte PL3_u_2; b) Ansicht Oberplatte PL3_o_2	I
Abbildung A-0-3: Detailansicht zur Probenentnahme WL1	I
Abbildung B-0-1: Speckschichtdickenmessung a) WL1_1_BM; b) WL1_2_BM	II
Abbildung B-0-2: Speckschichtdickenmessung a) PL3_o_2_BM1; b) PL3_o_2_BM2	II
Abbildung B-0-3: Speckschichtdickenmessung a) PL3_u_2_BM1; b) PL3_u_2_BM2	II
Abbildung B-0-4: Speckschichtdickenmessung PL3_1_BM	III

Abbildung C-0-1: EDX Analyse PL3_o_2_Ni2.....	IV
Abbildung C-0-2: EDX Analyse PL3_o_2_Ni2.....	IV
Abbildung C-0-3: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Referenzmessung am Ferrit	IV
Abbildung C-0-4: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Messung der Korngrenzenanreicherung...	V
Abbildung C-0-5: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Messung einer charakteristischen Seigerung	V
Abbildung C-0-6: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Messung einer charakteristischen Seigerung	V
Abbildung D-0-1: Übersicht Kerbschlagbiegeprobe WL1_2_KB	VII
Abbildung D-0-2: a) Übersicht PL3_u_2_KB1-3; b) Übersicht PL3_u_2_KB4-6	VII
Abbildung D-0-3: a) Übersicht PL3_o_2_KB1-3; b) Übersicht PL3_o_2_KB4-6	VIII
Abbildung E-0-1: pWPS: 111-003	IX
Abbildung E-0-2: pWPS: 111-004	X
Abbildung E-0-3: pWPS: 111-005	XI
Abbildung E-0-4: pWPS: 111-006	XII
Abbildung E-0-5: pWPS: 111-007	XIII
Abbildung E-0-6: pWPS: 111-008	XIV
Abbildung E-0-7: pWPS: 111-009	XV
Abbildung E-0-8: pWPS: 111-010	XVI
Abbildung E-0-9: pWPS: 135-001	XVII
Abbildung E-0-10: pWPS: 135-002	XVIII
Abbildung E-0-11: pWPS: 135-002	XIX
Abbildung E-0-12: pWPS: 135-004	XX
Abbildung E-0-13: pWPS: 135-005	XXI
Abbildung E-0-14: pWPS: 135-006	XXII
Abbildung E-0-15: pWPS: 135-007	XXIII
Abbildung E-0-16: pWPS: 135-008	XXIV
Abbildung E-0-17: pWPS Hauptversuch: 111-011	XXV
Abbildung E-0-18: pWPS Hauptversuch: 111-012	XXVI

Abbildung E-0-19: pWPS Hauptversuch: 135-009	XXVII
Abbildung E-0-20: pWPS Hauptversuch: 135-010	XXVIII
Abbildung F-0-1: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-003.....	XXIX
Abbildung F-0-2: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-004.....	XXIX
Abbildung F-0-3: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-005.....	XXX
Abbildung F-0-4: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-006.....	XXX
Abbildung F-0-5: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-007.....	XXXI
Abbildung F-0-6: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-008.....	XXXI
Abbildung F-0-7: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-009.....	XXXII
Abbildung F-0-8: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-010.....	XXXII
Abbildung F-0-9: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-001.....	XXXIII
Abbildung F-0-10: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-002.....	XXXIII
Abbildung F-0-11: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-003.....	XXXIV
Abbildung F-0-12: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-004.....	XXXIV
Abbildung F-0-13: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-005.....	XXXV
Abbildung F-0-14: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-006.....	XXXV
Abbildung F-0-15: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-007.....	XXXVI
Abbildung F-0-16: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-008.....	XXXVI
Abbildung G-0-1: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-011-1; a) VT; b) PT.....	XXXVII
Abbildung G-0-2: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-011-2; a) VT; b) PT.....	XXXVII
Abbildung G-0-3: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-011-3; a) VT; b) PT.....	XXXVIII
Abbildung G-0-4: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-1; a) VT; b) PT.....	XXXVIII
Abbildung G-0-5: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-2; a) VT; b) PT.....	XXXIX
Abbildung G-0-6: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-3; a) VT; b) PT.....	XXXIX

Abbildung G-0-7: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-4; a) VT; b) PT.....	XL
Abbildung G-0-8: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-009-1; a) VT; b) PT.....	XL
Abbildung G-0-9: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-009-2; a) VT; b) PT.....	XLI
Abbildung G-0-10: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-009-3; a) VT; b) PT.....	XLI
Abbildung G-0-11: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-1; a) VT; b) PT.....	XLII
Abbildung G-0-12: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-2; a) VT; b) PT.....	XLII
Abbildung G-0-13: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-3; a) VT; b) PT.....	XLIII
Abbildung G-0-14: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-4; a) VT; b) PT.....	XLIII
Abbildung H-0-1: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-011-1	XLIV
Abbildung H-0-2: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-011-2	XLIV
Abbildung H-0-3: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-011-3	XLV
Abbildung H-0-4: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-1	XLV
Abbildung H-0-5: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-2	XLVI
Abbildung H-0-6: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-3	XLVI
Abbildung H-0-7: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-4	XLVII
Abbildung H-0-8: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-009-1	XLVII
Abbildung H-0-9: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-009-2	XLVIII
Abbildung H-0-10: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-009-3	XLVIII
Abbildung H-0-11: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-1	XLIX
Abbildung H-0-12: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-2	XLIX
Abbildung H-0-13: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-3	L
Abbildung H-0-14: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-4	L
Abbildung I-0-1: Bruchprüfung 111-012-1	LI

Abbildung I-0-2: Bruchprüfung 111-012-2LI
Abbildung I-0-3: Bruchprüfung 111-012-3LI
Abbildung I-0-4: Bruchprüfung 111-012-4LII
Abbildung I-0-5: Bruchprüfung 135-010-1LII
Abbildung I-0-6: Bruchprüfung 135-010-2LII
Abbildung I-0-7: Bruchprüfung 135-010-3LIII
Abbildung I-0-8: Bruchprüfung 135-010-4LIII

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Beteiligte Bauunternehmen und Teilprojekte.....	6
Tabelle 2-2: Statistische chemische Zusammensetzung von Puddelstahl	16
Tabelle 2-3: Zusammensetzung des Roheisens beim Bessemer Verfahren.....	18
Tabelle 2-4: Zusammensetzung Bessemer Baustahl	21
Tabelle 2-5: Zusammensetzung des Roheisens beim Thomas Verfahren	22
Tabelle 2-6: Zusammensetzung Thomas Baustahl	24
Tabelle 2-7: Zusammensetzung basischer Siemens Martin Baustahlblech	31
Tabelle 2-8: Verteilung von Schwefel und Phosphor im Vergleich zum Gesamtquerschnitt	35
Tabelle 2-9: Gegenüberstellung der Erstarrungsvorgänge.....	37
Tabelle 3-1: Probenübersicht	44
Tabelle 3-2: Vergleich der chemischen Zusammensetzung des Altstahls mit dem Referenzmaterial S235 JR:.....	57
Tabelle 3-3: Härtemesseinrichtungen.....	69
Tabelle 3-4: Kurzzeichen für Prüftemperatur und Kerbschlagarbeit.....	71
Tabelle 3-5: Verwendete Kerbschlagbiege-Prüfeinrichtung	71
Tabelle 3-6: Plattenmaterial (PL3_o_2_NI1) - Härtewerte.....	73
Tabelle 3-7: Winkelmaterial (WL1_2_NI2) Härtewerte	73
Tabelle 3-8: Härte- und Zugfestigkeitsvergleich, S235 JR und Altstahl	74
Tabelle 3-9: Maße für Kerbschlagbiegeprobe	75
Tabelle 3-10: Mittelwerte aus Kerbschlagbiegeversuch	76
Tabelle 3-11: Abmaße für Flachzugprobe Form E	78
Tabelle 4-1: Richtanalyse reines Schweißgut Böhler FOX EV 50 (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5).....	96
Tabelle 4-2: Mechanische Eigenschaften reines Schweißgut Böhler FOX EV 50 (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 4 2 H5)	96
Tabelle 4-3: Richtanalyse reines Schweißgut BÖHLER EMK 6 (EN ISO 14341: G3Si1)	97

Tabelle 4-4: Mechanische Eigenschaften reines Schweißgut BÖHLER EMK 6 (EN ISO 14341: G3Si1)	97
Tabelle 4-5: Übersicht zu den Schweißplänen in Anhang E zu den Vorversuchen mit S235 JR	99
Tabelle 4-6: Auswertetabelle Vorversuche	106
Tabelle 4-7: Übersicht zu den Schweißplänen in Anhang E zu den Hauptversuchen mit Altstahl	110
Tabelle 4-8: Auswertetabelle der Hauptversuche	115
Tabelle 4-9: Auswertung der Prüfkraft der Bruchprüfung	119
Tabelle D-1: Werte Kerbschlagbiegeversuch	VI

10 Abkürzungsverzeichnis

111	Elektrodenhandschweißen
135	Metallaktivgasschweißen
A	Bruchdehnung [m]
a	Probendicke [mm]
A _{0,75}	Querschnitt Untermaßprobe = 75 [mm ²]
A ₁₀	Querschnitt Normalprobe = 100 [mm ²]
A _g	Gleichmaßdehnung [m]
Al	Aluminium
A _L	Lüdersdehnung [m]
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
AlN	Aluminiumnitrid
Ar	Argon
A _t	Gesamte Dehnung bei Bruch [m]
A _v	Kerbschlagarbeit [J]
AV _g	Kerbschlagarbeit gemessen [J]
AV _v	Kerbschlagarbeit Vergleichswert [J]
b	Probenbreite [mm]
B	Kopfbreite [mm]
BM	Baumannabdruck
C	Kohlenstoff
CaCO ₃	Kalkspat
CaF ₂	Flussspat
CEV	Kohlenstoffäquivalent
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
d	Arithmetischer Mittelwert der beiden Eindruckdiagonalen [m]
d ₁ , d ₂	Eindruckdiagonalen [m]
DACH	Deutschland (D), Österreich (A), Schweiz (CH)
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
F	Kraft [N]
Fe	Eisen
Fe ₃ C	Zementit
FeC	Eisen- Kohlenstoff
FeO	Eisenoxid
FF	besonders beruhigt vergossene Stähle
F _G	Gewichtskraft des Hammers [N]

FN	beruhigt vergossener Stahl
FU	unberuhigt vergossener Stahl
g	Erdbeschleunigung $g=9,80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$
h	Höhe [m]
H, H ₂	Wasserstoff
h ₁	Fallhöhe [m]
h ₂	Steighöhe [m]
HB	Brinellhärte
HV	Härte nach Vickers
JR	27J Midestkerbschlagarbeit bei Raumtemperatur (20°C)
k. A.	keine Angabe
Kb	Kerbschlagbiegeversuch
Kl	Klemmätzung
l	Länge [m]
L ₀	Anfangsmesslänge [mm]
L _c	Versuchslänge [mm]
L _t	Gesamtlänge [mm]
m	arithmetisches Mittel
MAG	Metallaktivgasschweißen
Mn	Mangan
MnO	Manganoxid
Mo	Molybdän
MT	Magnetpulverprüfung
n	Stichprobenanzahl
N, N ₂	Stickstoff
Na ₂ S ₃ O ₂ x 5H ₂ O	Natriumthiosulfat-Pentahydrat
Ni	Nitalätzung
O, O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
PL	Plattenmaterial
PT	Farbeindringprüfung
pWPS	Vorläufige Schweißanweisung
R _{eH}	Obere Streckgrenze [MPa]
R _{eL}	Untere Streckgrenze [MPa]
R _m	Zugfestigkeit [MPa]
s	Standartabweichung
S	Schwefel
Si	Silizium
SiO ₂	Siliziumoxid
Ti	Titan
v	Variationskoeffizient

V	Vanadium
VT	Sichtprüfung
w	Breite [m]
WEZ	Wärmeeinflusszone
WL	Winkelmaterial
Zr	Zirkonium
ZV	Zugversuch
α	Winkel der Pyramidenspitze [°]
ΔH^0	Reaktionsenthalpie [kJ/mol]
ε	Dehnung [m]
σ	Spannung [MPa]

Anhang A: Probenentnahme

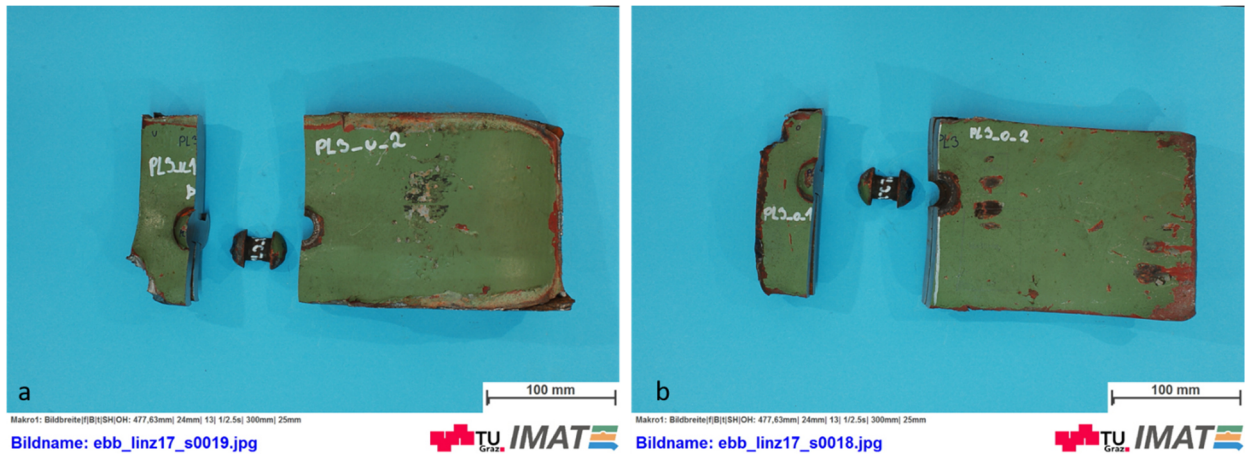


Abbildung A-0-1: Übersicht über die Platte PL3 a) Ansicht von unten; b) Ansicht von oben

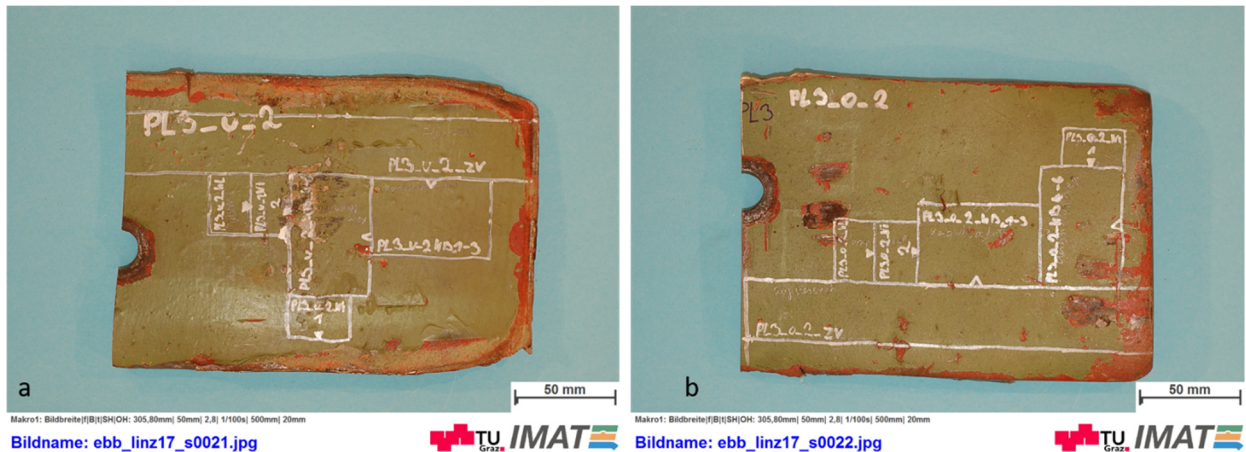


Abbildung A-0-2: Detailansicht zur Probenentnahme a) Ansicht Unterplatte PL3_u_2; b) Ansicht Oberplatte PL3_o_2



Abbildung A-0-3: Detailansicht zur Probenentnahme WL1

Anhang B: Analyse zur Dicke der Speckschicht



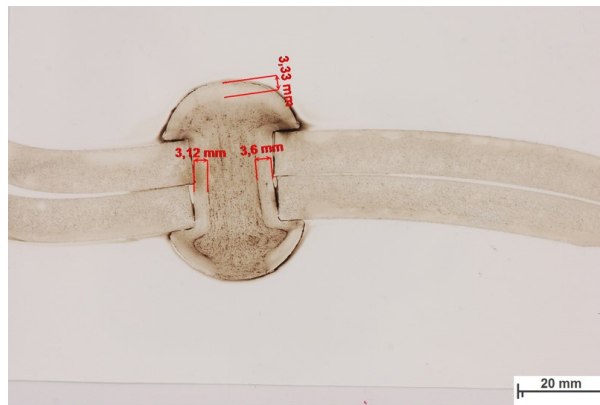
Abbildung B-0-1: Speckschichtdickenmessung a) WL1_1_BM; b) WL1_2_BM



Abbildung B-0-2: Speckschichtdickenmessung a) PL3_o_2_BM1; b) PL3_o_2_BM2



Abbildung B-0-3: Speckschichtdickenmessung a) PL3_u_2_BM1; b) PL3_u_2_BM2



Makro1: Bildbreite[F|B|](SH[OH: 138,50mm] 105mm] 13] 1|Bs| 500mm] 0mm

Messbildname: ebb_linz17_s0363.jpg



Abbildung B-0-4: Speckschichtdickenmessung PL3_1_BM

Anhang C: EDX Analysen

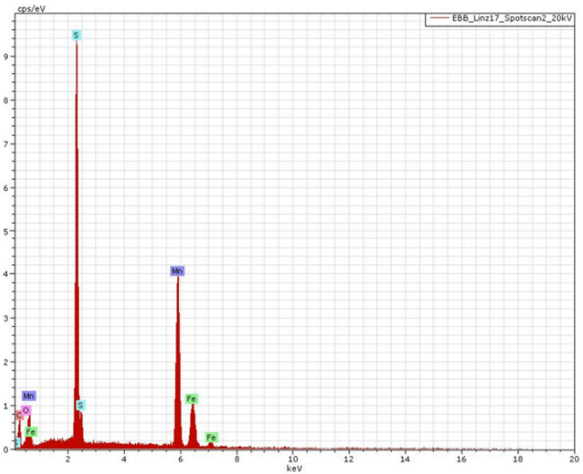
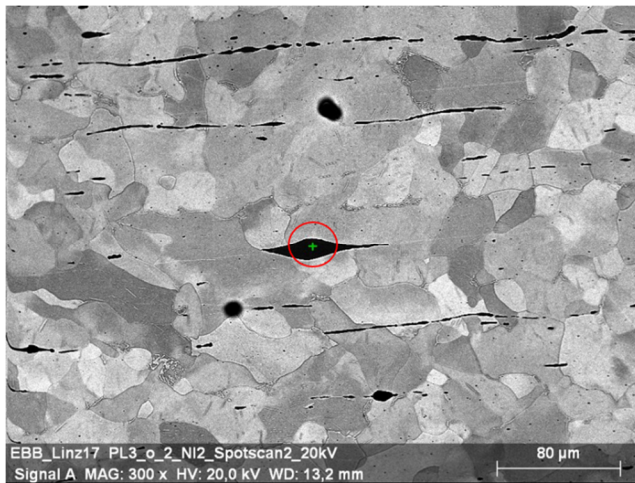


Abbildung C-0-1: EDX Analyse PL3_o_2_Ni2

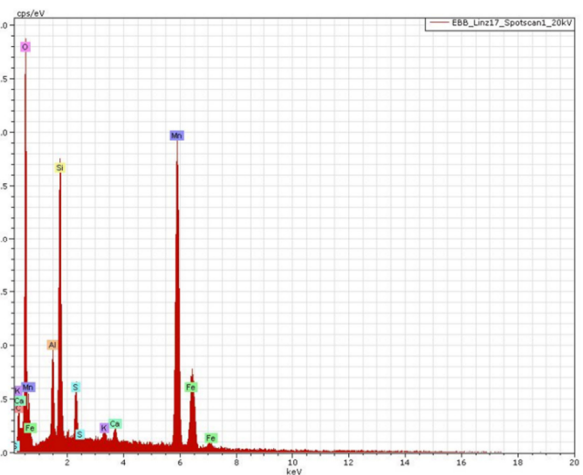
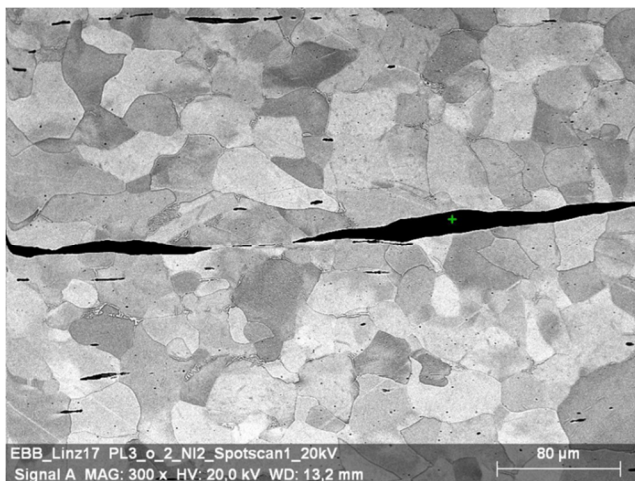


Abbildung C-0-2: EDX Analyse PL3_o_2_Ni2

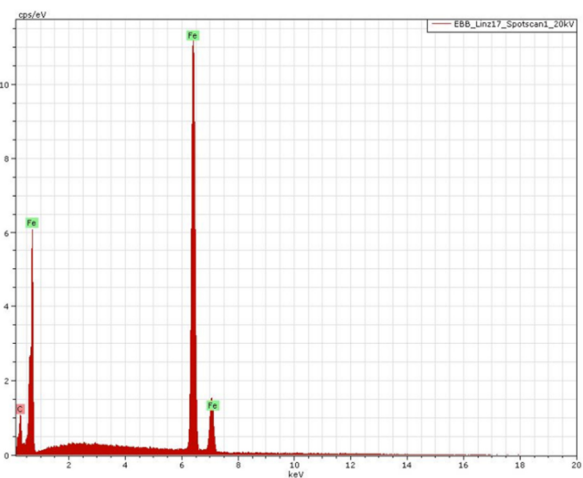
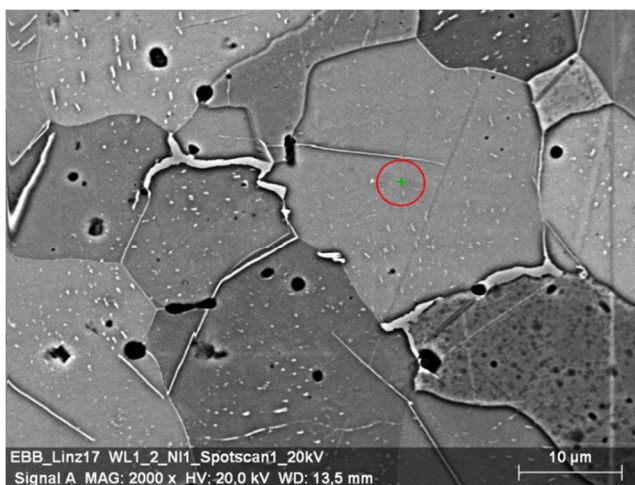


Abbildung C-0-3: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Referenzmessung am Ferrit

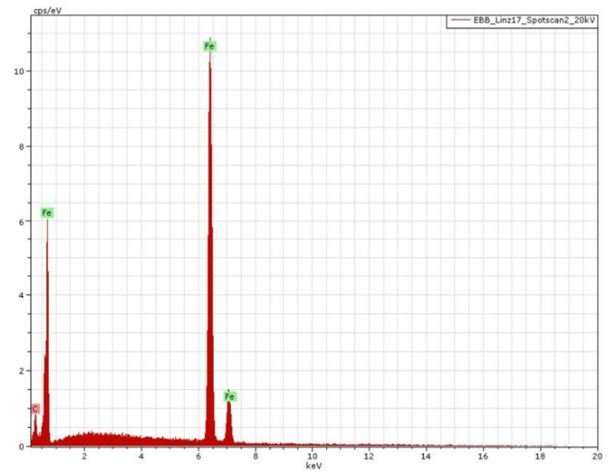
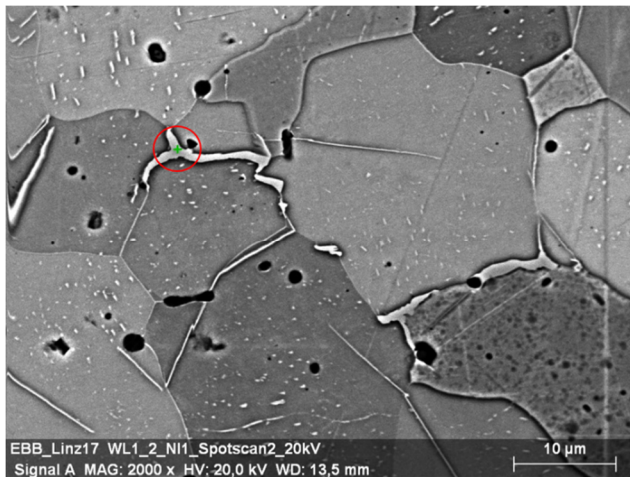


Abbildung C-0-4: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Messung der Korngrenzenanreicherung

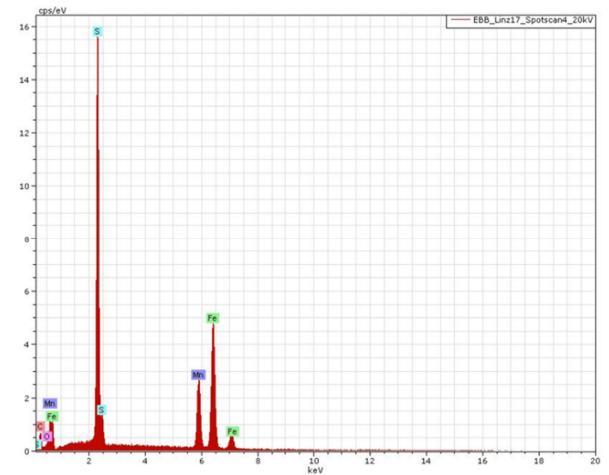
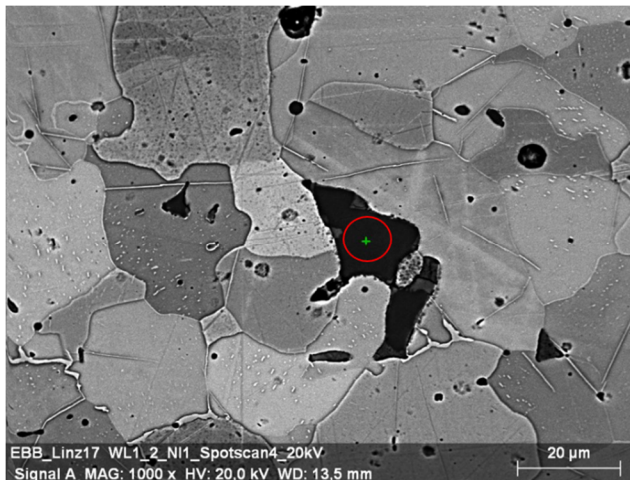


Abbildung C-0-5: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Messung einer charakteristischen Seigerung

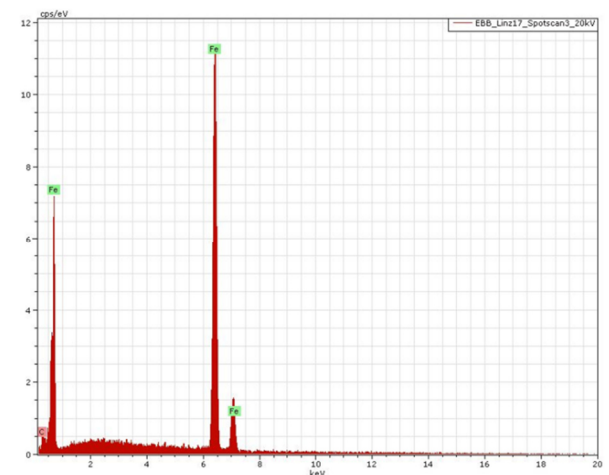
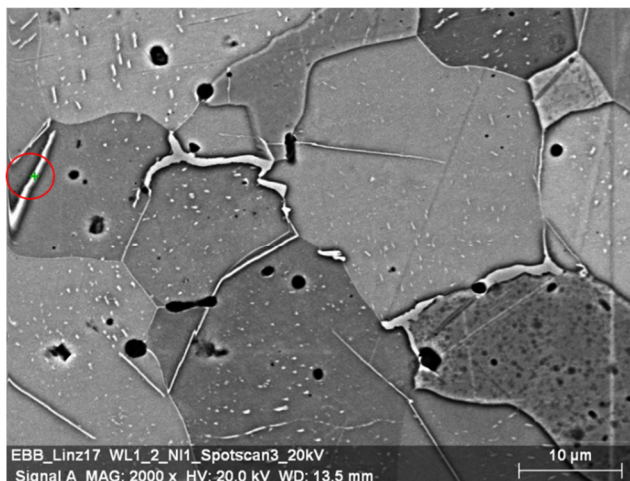


Abbildung C-0-6: EDX Analyse WL1_2_Ni1 Messung einer charakteristischen Seigerung

Anhang D: Kerbschlagbiegeversuch

Tabelle D-1: Werte Kerbschlagbiegeversuch

Probennummer	AV _g [J]	AV _v [J]	durchgebrochen	gültig	Mittelwert AV _g [J]	Mittelwert AV _v [J]
WL1_2_KB_						
1	44	58,7	Ja	Ja	32,5	43,3
2	21	28	Ja	Ja		
3	144	192	Nein	Nein		
PL3_o_2_KB_						
1	4	5,33	Ja	Ja	4	5,3
2	4	5,33	Ja	Ja		
3	4	5,33	Ja	Ja		
4	9	12	Ja	Ja	7	9,3
5	6	8	Ja	Ja		
6	6	8	Ja	Ja		
PL3_u_2_KB_						
1	10	13,3	Ja	Ja	9	12
2	8	10,7	Ja	Ja		
3	9	12	Ja	Ja		
4	6	8	Ja	Ja	6	8
5	6	8	Ja	Ja		
6	6	8	Ja	Ja		



Abbildung D-0-1: Übersicht Kerbschlagbiegeprobe WL1_2_KB

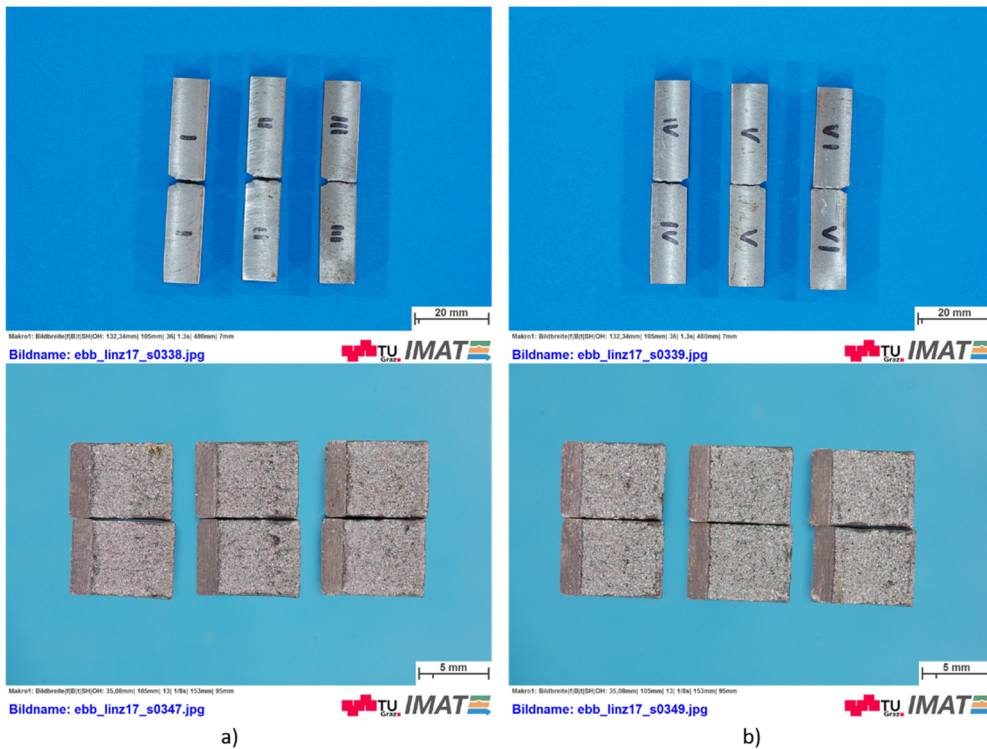


Abbildung D-0-2: a) Übersicht PL3_u_2_KB1-3; b) Übersicht PL3_u_2_KB4-6

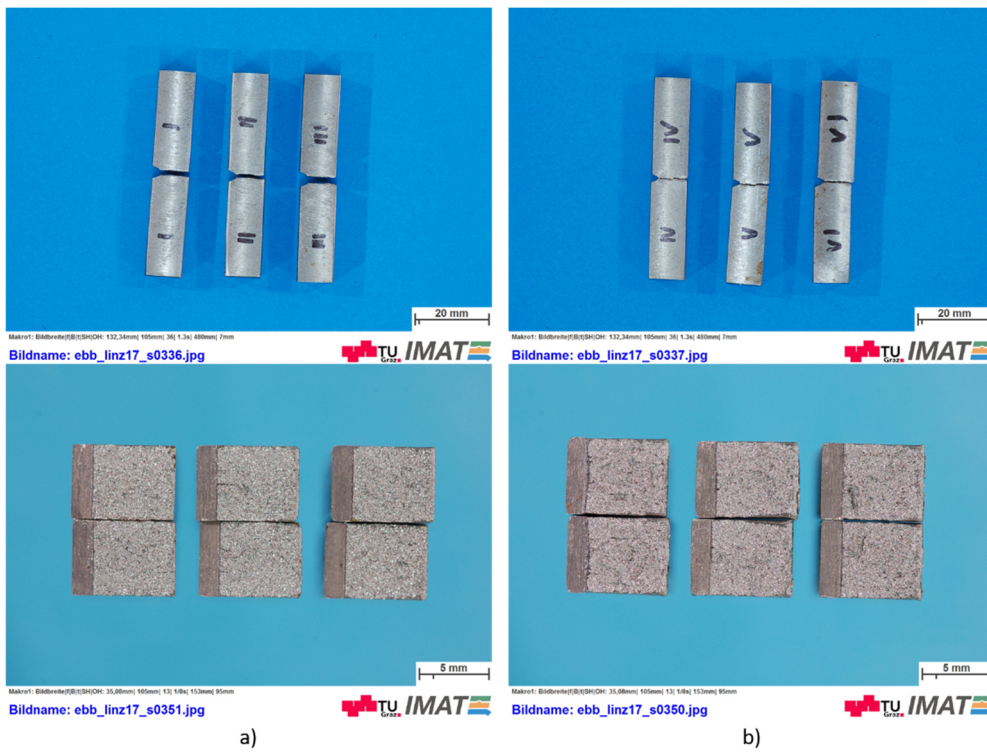


Abbildung D-0-3: a) Übersicht PL3_o_2_KB1-3; b) Übersicht PL3_o_2_KB4-6

Anhang E: Schweißpläne

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 111-003						
WPSR Norm / Bericht Nr. WPSR Standard / Report No.	---	Art der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitssprobe Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffes Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0037)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nähten Joint Type and Weld Type	--- s15-B / ss ab	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 15					
Einschleifen der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellungsort des Grundwerkstoffes Category of Manufacture of Par. Mat.	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Rse	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff # Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current-Type / Pole [DC+ / AC]	Drahtorschub Wire Feed Speed [m/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/cm]
1	111	2,5	85	20-25	DC+	---	35- 40	0,20-0,29
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2580-A: E 42 5 B 42 H5) Böhler FOX EV50 Ø3,2x350		Wasserstoffarmgüßen Post-Welding		---		
Sondervorschriften für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h		Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Fluxname		Schutzgas Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Penetration (maximale Rausenbreite) Welding (maximum width of root)		---		
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Pulserschweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		Abstand Stromkathode/Werkstück Distance Contact Tip/Work Piece		---		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back Gouging / Backing		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend		
Zwischenlagertemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		---		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Ausheilen Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		Schweißer:		Leander Herbitschek		

Vorversuch Blindnaht_1

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signatures.	

Abbildung E-0-1: pWPS: 111-003

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 111-004						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0637)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s15- B / ss sb	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 15					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole [DC/AC]	Drahtvorschub Wire Feed Speed [m/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	100	21-25	DC+	---	35-40	0,25-0,34
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h			Aufheiz- und Abkühlraten [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---			Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		---	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---			Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20			Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend	
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---			Gaslöslänge Gas nozzle-lf		---	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20			Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---	
Wärmebehandlung und/oder Ausheilen Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---			Schweißer:		Leander Herbitschek	

Vorversuch Blindnaht_2

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-2: pWPS: 111-004

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 111-005						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0037)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s15- B / ss sb	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 15					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Außendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole [DC/ AC]	Drahtvorschub Wire Feed Speed [m/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	115	21-25	DC+	---	35-40	0,29-0,39
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2500-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350		Wasserstoffemissionen Porosity		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h		Aufheiz- und Abkühlraten [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Auslenkung) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		---		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend		
Zwischenlagtemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		---		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		Schweißer:		Leander Herbitschek		

Vorversuch Blindnaht_3

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-3: pWPS: 111-005

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 111-006						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0637)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s15- B / ss sb	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 15					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Außendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DCs / AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [m/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	130	20-25	DC+	---	35-40	0,31-0,45
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h			Aufheiz- und Abkühlraten [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---			Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tab/Work Piece		---	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---			Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20			Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend	
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---			Gaslösen-Ø Gas nozzle-Ø		---	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20			Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---	
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---			Schweißer:		Leander Herbitschek	

Vorversuch Blindnaht_4

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-4: pWPS: 111-006

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 111-007				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)		
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1 (S235JR/1.0637)		
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 15		
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---		
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			CEV max		0,35		
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max		0,35		
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole [DC/AC]	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	140	20-23	DC+	---	35-40	0,34-0,44
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2500-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Filler		Schutzgas Shielding		---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---	
		Wurzelschutz Backing		---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---	
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding		---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---	
		Wurzelschutz Backing		---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---	
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		---	Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		---	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Shaping / Backing)		---		---	Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		---	Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend	
Zwischenlagertemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		---	Gaslösen-Ø Gas nozzle-Ø		---	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		---	Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---	
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		---	Schweißer:		Leander Herbitschek	

Vorversuch Kehlnaht_1

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-5: pWPS: 111-007

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 111-008				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)		
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1 (S235JR/1.0637)		
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 15		
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW a3- / sl			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---		
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			CEV max		0,35		
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max		---		
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/ AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	100	20-23	DC+	---	35-40	0,24-0,32
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2500-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---	---	Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		---		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---	---	Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20	---	Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend		
Zwischenlagertemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---	---	Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		---		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20	---	Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Auslichten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---	---	Schweißer:		Leander Herbitschek		

Vorversuch Kehlnaht_2

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-6: pWPS: 111-008

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 111-009				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)		
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1 (S235JR/1.0637)		
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 15		
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---		
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			CEV max		0,35		
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max		---		
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/ AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	115	20-23	DC+	---	35-40	0,28-0,36
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Filler		Schutzgas Shielding		---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---	
		Wurzelschutz Backing		---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---	
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding		---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---	
		Wurzelschutz Backing		---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---	
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		---	Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		---	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Shaping) / Backing		---		---	Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		---	Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend	
Zwischenlagertemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		---	Gaslösen-Ø Gas nozzle-Ø		---	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		---	Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---	
Wärmebehandlung und/oder Auslichten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		---	Schweißer:		Leander Herbitschek	

Vorversuch Kehlnaht_3

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-7: pWPS: 111-009

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 111-010				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)		
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1 (S235JR/1.0637)		
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 15		
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---		
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			CEV max		0,35		
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max		0,35		
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißraupe Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	130	20-23	DC+	---	35-40	0,31-0,41
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Filler		Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---	---	Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		---		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Shading) / Backing		---	---	Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20	---	Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend		
Zwischenlagertemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---	---	Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		---		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20	---	Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---	---	Schweißer:		Leander Herbitschek		

Vorversuch Kehlnaht_4

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-8: pWPS: 111-010

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 135-001						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschne Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0637)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s15- S / ss sb	Werkstoffdicke (mm) Material Thickness (mm)	t1 = 15					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Aussendurchmesser (mm) Outside Diameter (mm)	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material (mm)	Stromstärke Current (A)	Spannung Voltage (V)	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/ AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed (cm/min)	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed (cm/min)	Wärmeeinbringung Heat Input (kJ/mm)
1	135	1,2	200	22-25	DC+	8,5-10,0	40- 50	0,42-0,60
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make	S (EN ISO 14341-A: G3S11) Böhler EMK 6 Ø1,2mm		Wasserstoffermittlung Porosity-Heating		---			
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying	---		Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---			
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux	Schutzgas Shielding	M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18	Act des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		Kurzschluss			
	Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---			
Gasflussmenge (l/min) Gas Flow Rate (l/min)	Schutzgas Shielding	14- 16	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---			
	Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Pulschweißen Pulse Welding Details		---			
Wolframelektrode / Durchmesser (mm) Tungsten Electrode Type / Size (mm)	---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm			
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Slagging / Backing)	---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen			
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]	≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend			
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]	---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm			
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]	≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---			
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging	---		Schweißer:		Leander Herbitschek			

Vorversuch Blindnaht_5

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-9: pWPS: 135-001

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 135-002						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0637)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s15- S / ss sb	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 15					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole [DC+/AC]	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	135	1,2	220	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,46-0,66
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißnahtbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S11) Böhler EMK 6 Ø1,2mm		Wasserstoffermittlung Porosity		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---		Aufheiz- und Abkühlraten [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18		Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		Kurzschluss		
Wurzelschutz Backing		---		Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding 14-16		Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
Wurzelschutz Backing		---		Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Draping / Backing)		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend		
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Ausheilen Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		Schweißer:		Leander Herbitschek		

Vorversuch Blindnaht_6

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-10: pWPS: 135-002

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 135-003						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0637)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s15- S / ss sb	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 15					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Außendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DCs / AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	135	1,2	240	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,51-0,72
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißnahtbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S11) Böhler EMK 6 Ø1,2mm		Wasserstoffarmgüßen Post-Heating		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---		Aufheiz- und Abkühlungsrate [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18		Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		Kurzschluss		
Wurzelschutz Backing		---		Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding 14-16		Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
Wurzelschutz Backing		---		Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Draping / Backing)		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend		
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		Schweißer:		Leander Herbitschek		

Vorversuch Blindnaht J

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-11: pWPS: 135-002

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 135-004						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1 (S235JR/1.0637)					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s15- S / ss sb	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 15					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---	CEV max CEV max	0,35					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole [DCs / AC]	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	135	1,2	260	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,55-0,78
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißnahtbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S11) Böhler EMK 6 Ø1,2mm		Wasserstoffemissionen Porosity		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---		Aufheiz- und Abkühlraten [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding	M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		Kurzschluss		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	14-16	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend		
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Ausheilen Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		Schweißer:		Leander Herbitschek		

Vorversuch Blindnaht_8

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-12: pWPS: 135-004

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 135-005					
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)			
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1 (S235JR/1.0637)			
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 15			
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---			
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			CEV max		0,35			
Herstellungsort des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max		0,35			
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence					
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]	
1	135	1,2	200	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,42-0,60	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S1) Böhler EMK 6 Ø1,2mm			Wasserstoffemissionen Porosity		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Flux		Schutzgas Shielding		M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18		Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---	
		Wurzelschutz Backing		---		Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---	
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding		14-16		Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---	
		Wurzelschutz Backing		---		Einzelheiten für das Pulschweißen Pulse Welding Details		---	
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		---		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend	
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		---		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---	
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		---		Schweißer:		Leander Herbitschek	

Vorversuch Kehlnaht_5

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-13: pWPS: 135-005

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 135-006				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)		
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1 (S235JR/1.0637)		
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Verbindungsart Joint Type		t1 = 15 / t2 = 15		
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 15		
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---		
Herstellungsart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max CEV max		0,35		
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole [DC/AC]	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	135	1,2	220	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,46-0,66
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S1) Böhler EMK 6 Ø1,2mm			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Flux		Schutzgas Shielding		M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18		Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---
		Wurzelschutz Backing		---		Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding		14-16		Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---
		Wurzelschutz Backing		---		Einzelheiten für das Pulschweißen Pulse Welding Details		---
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		---		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		---		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		---		Schweißer: Welder		Leander Herbitschek

Vorversuch Kehlnaht_6

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-14: pWPS: 135-006

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 135-007					
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)			
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1 (S235JR/1.0637)			
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Verbindungsart Joint Type		t1 = 15 / t2 = 15			
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 15			
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---			
Herstellungsort des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max CEV max		0,35			
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence					
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]	
1	135	1,2	240	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,51-0,72	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	---	---	---	---	
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S1) Böhler EMK 6 Ø1,2mm			Wasserstoffemissionen Porosity		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Flux		Schutzgas Shielding		M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18		Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---	
		Wurzelschutz Backing		---		Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---	
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding		14-16		Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---	
		Wurzelschutz Backing		---		Einzelheiten für das Pulschweißen Pulse Welding Details		---	
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		---		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend	
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		---		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---	
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		---		Schweißer:		Leander Herbitschek	

Vorversuch Kehlnaht_7

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-15: pWPS: 135-007

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 135-008				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning				metallisch blank (schleifen)
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation				t1 = 1.1 (S235JR/1.0037) t2 = 1.1 (S235JR/1.0037)
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Verbindungsart Joint Type				t1 = 15 / t2 = 15
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW a3 / a1			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]				t1 = 15 / t2 = 15
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]				---
Herstellungsart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max CEV max				0,35
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	135	1,2	260	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,55-0,78
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S11) Böhler EMK 6 Ø1,2mm			Wasserstoffemissionen Porosity		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Flux		Schutzgas Shielding M21 (EN ISO 14175) Linde CORGON 18			Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---	
		Wurzelschutz Backing			Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---	
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding 14-16			Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---	
		Wurzelschutz Backing			Einzelheiten für das Pulschweißen Pulse Welding Details		---	
Wolfsblektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---			Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Slagging / Backing)		---			Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20			Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend	
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---			Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20			Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---	
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---			Schweißer:		Leander Herbitschek	

Vorversuch Kehlnaht_8

Datum / date	Erstellt / created
2017-10-25	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-16: pWPS: 135-008

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 111-011						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschne Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s10- B / ss nb	Werkstoffdicke (mm) Material Thickness (mm)	t1 = 10					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Außendurchmesser (mm) Outside Diameter (mm)	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat	---	CEV max CEV max	0,09					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material (mm)	Stromstärke Current (A)	Spannung Voltage (V)	Stromart / Polung Current Type / Pole (DCs / AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed (m/min)	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed (cm/min)	Wärmeeinbringung Heat Input (kJ/mm)
1	111	2,5	115	21-25	DC+	---	35-40	0,29-0,39
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 B3,2x350		Wasserstoffemissionen Porosity		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h		Aufheiz- und Abkühlraten [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Flux		Schutzgas Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasdurchflussmenge (l/min) Gas Flow Rate (l/min)		Schutzgas Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolfsstahlelektrode / Durchmesser (mm) Tungsten Electrode Type / Size (mm)		---		Abstand Stromkontakt/Werkstück Distance Contact Tab/Work Piece		---		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (lagging / Backing)		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		Handschweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		schleppend		
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		---		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		Schweißer:		Leander Herbitschek		

Hauptversuch

Datum / date	Erstellt / created
2018-03-01	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-17: pWPS Hauptversuch: 111-011

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 111-012				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning				metallisch blank (schleifen)
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation				t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]				t1 = 15 / t2 = 10
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]				---
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			CEV max				0,09
Herstellungsort des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max				0,09
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DCs / AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	111	2,5	130	20-23	DC+	---	35-40	0,31-0,41
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		B (EN ISO 2560-A: E 42 5 B 42 HS) Böhler FOX EV50 83,2x350			Wasserstoffemissionen Porosity			---
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		300-350°C/2h			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method			---
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Filler		Schutzgas Shielding	---	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer			---	
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)			---	
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	---	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time			---	
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details			---	
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---	---	Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece			---	
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Shaping / Backing)		---	---	Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization			Handschweißen	
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20	---	Brennerneigewinkel Torch Angle			schleppend	
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---	---	Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø			---	
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20	---	Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes			---	
Wärmebehandlung und/oder Anlagern Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---	---	Schweißer:			Leander Herbitschek	

Hauptversuch

Datum / date	Erstellt / created
2018-08-01	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-18: pWPS Hauptversuch: 111-012

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT		pWPS Nr. pWPS No. 135-009						
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---	Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning	metallisch blank (schleifen)					
Schweißer / Arbeitsschne Welder / Work Sample	---	Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation	t1 = 1.1					
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PA / Andere Verbindungen							
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	--- s10- S / ss nb	Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]	t1 = 10					
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	---	Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]	---					
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---	CEV max CEV max	0,09					
Gestaltung der Verbindung Joint Design								
Schweißnaht Run	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole [DCa / AC]	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	135	1,2	240	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,51-0,72
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißnahtbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S11) Böhler EMK 6 Ø1,2mm		Wasserstoffemissionen Porosity		---		
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---		Aufheiz- und Abkühlraten [°C/h] Heating and Cooling Rates [°C/h]		---		
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation/Flux		Schutzgas Shielding	M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18	Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		Kurzschluss		
		Wurzelschutz Backing	---	Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---		
Gasflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding	14-16	Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---		
		Wurzelschutz Backing	---	Einzelheiten für das Puls-schweißen Pulse Welding Details		---		
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm		
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (slagging / Backing)		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen		
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend		
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		Gaslöslänge-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm		
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---		
Wärmebehandlung und/oder Anlagern Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		Schweißer:		Leander Herbitschek		

Hauptversuch

Datum / date	Erstellt / created
2018-03-01	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-19: pWPS Hauptversuch: 135-009

Vorläufige Schweißanweisung

preliminary Welding Procedure Specifications - pWPS



Firma Company TU-Graz/IMAT				pWPS Nr. pWPS No. 135-010				
WPQR Norm / Bericht Nr. WPQR Standard / Report No.	---			Act der Vorbereitung und Reinigung Method of Preparation and Cleaning		metallisch blank (schleifen)		
Schweißer / Arbeitsschneide Welder / Work Sample	---			Bezeichnung des Grundwerkstoffs Parent Material Designation		t1 = 1.1 (S235JR/1.0637) t2 = 1.1		
Schweißposition / Stoßart Welding Position / Type of Joint	PB / T-Stoß			Werkstoffdicke [mm] Material Thickness [mm]		t1 = 15 / t2 = 10		
Verbindung und Nahtart Joint Type and Weld Type	FW s3 / s1			Aussendurchmesser [mm] Outside Diameter [mm]		---		
Einzelheiten der Fugenvorbereitung Weld Preparation Details	EN ISO 9692-1			CEV max		0,35		
Herstellart des Grundwerkstoffs Category of Manufacture of Par. Mat.	---			CEV max		0,35		
Gestaltung der Verbindung Joint Design				Schweißfolge Welding Sequence				
Schweißnaht Rue	Schweißprozess Welding Process	Ø Zusatzwerkstoff Ø Filler Material [mm]	Stromstärke Current [A]	Spannung Voltage [V]	Stromart / Polung Current Type / Pole (DC/AC)	Drahtvorschub Wire Feed Speed [cm/min]	Vorschubgeschwindigkeit Welding Speed [cm/min]	Wärmeeinbringung Heat Input [kJ/mm]
1	135	1,2	240	22-25	DC+	8,5-10,0	40-50	0,51-0,72
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
Schweißzusatzbezeichnung und Fabrikat Filler Material Designation and Make		S (EN ISO 14341-A: G3S11) Böhler EMK 6 Ø1,2mm			Wasserstoffermittlung Porit-Heating		---	
Sonderanweisungen für Trocknung Any Special Baking or Drying		---			Zeit, Temperatur, Verfahren Time, Temperature, Method		---	
Schutzgas/Schweißpulverbezeichnung Designation of Gas/Flux		Schutzgas Shielding		M21 (EN ISO 14175) Linco CORGON 18		Art des Tropfenübergangs Mode of Metal Transfer		---
		Wurzelschutz Backing		---		Pendeln (maximale Raupenbreite) Weaving (maximum width of run)		---
Gasdurchflussmenge [l/min] Gas Flow Rate [l/min]		Schutzgas Shielding		14-16		Oszillation: Amplitude, Frequenz, Verweilzeit Oscillation: amplitude, frequency, dwell time		---
		Wurzelschutz Backing		---		Einzelheiten für das Pulschweißen Pulse Welding Details		---
Wolframelektrode / Durchmesser [mm] Tungsten Electrode Type / Size [mm]		---		---		Abstand Stromkontaktrohr/Werkstück Distance Contact Tube/Work Piece		10 mm
Einzelheiten über Auflegen / Schweißbedeckung Details of Back (Shaping / Backing)		---		---		Mechanisierungsgrad Degree of Mechanization		teilmechanisches Schweißen
Vorwärmtemperatur [°C] Preheat Temperature [°C]		≥ 20		---		Brennerneigewinkel Torch Angle		stehend
Zwischenlagentemperatur [°C] Interpass Temperature [°C]		---		---		Gasdüsen-Ø Gas nozzle-Ø		16 mm
Haltezeittemperatur [°C] Pre-Heat Maintenance Temperature [°C]		≥ 20		---		Anzahl der Drahtelektroden Number of electrodes		---
Wärmebehandlung und/oder Aushärten Post-Weld Heat Treatment and/or Aging		---		---		Schweißer:		Leander Herbitschek

Hauptversuch

Datum / date	Erstellt / created
2018-03-01	M. Neunteufel
Die Bestätigung erfolgte elektronisch und ist ohne Unterschrift gültig. The confirmation was made electronically and is valid without signature.	

Abbildung E-0-20: pWPS Hauptversuch: 135-010

Anhang F: Auswertung der Vorversuche

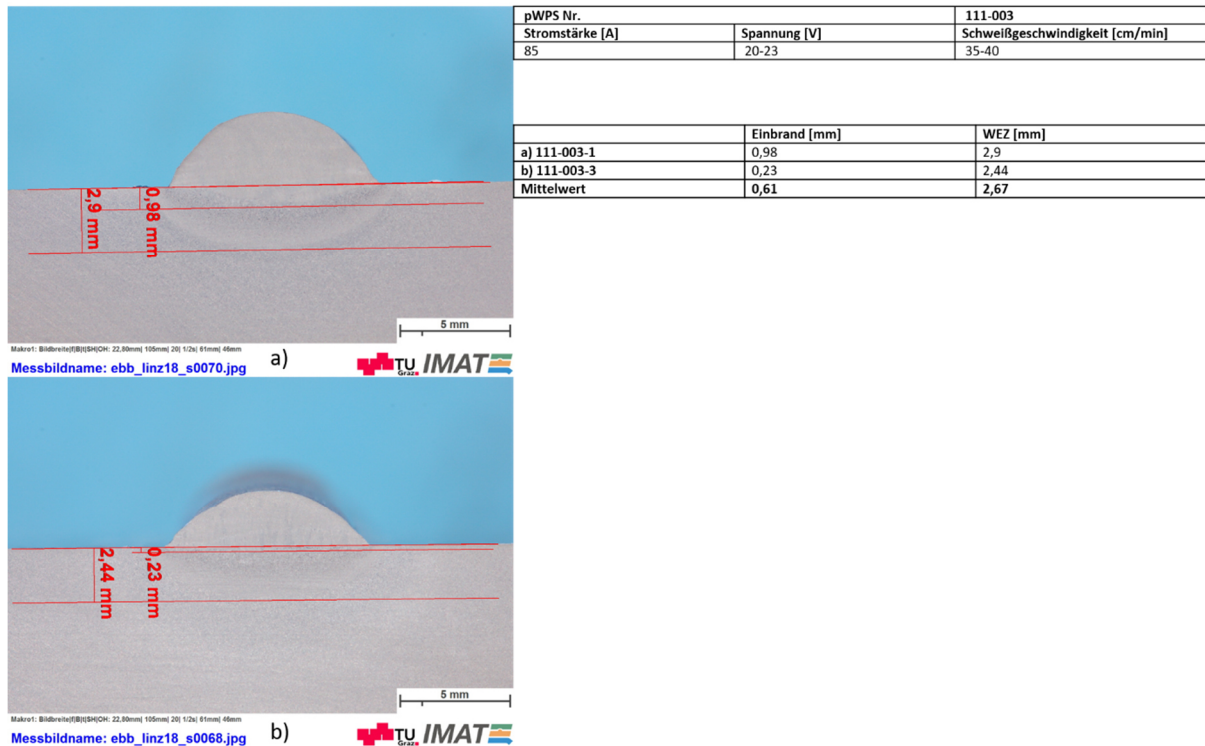


Abbildung F-0-1: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-003

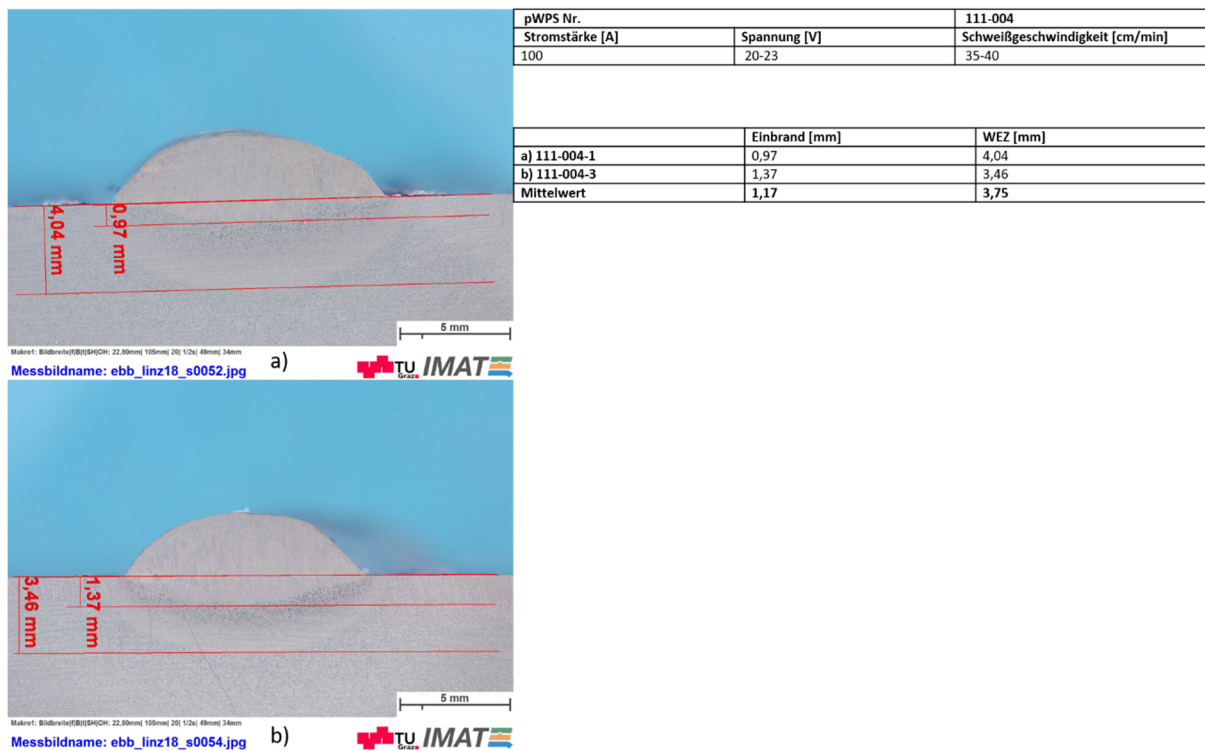


Abbildung F-0-2: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-004

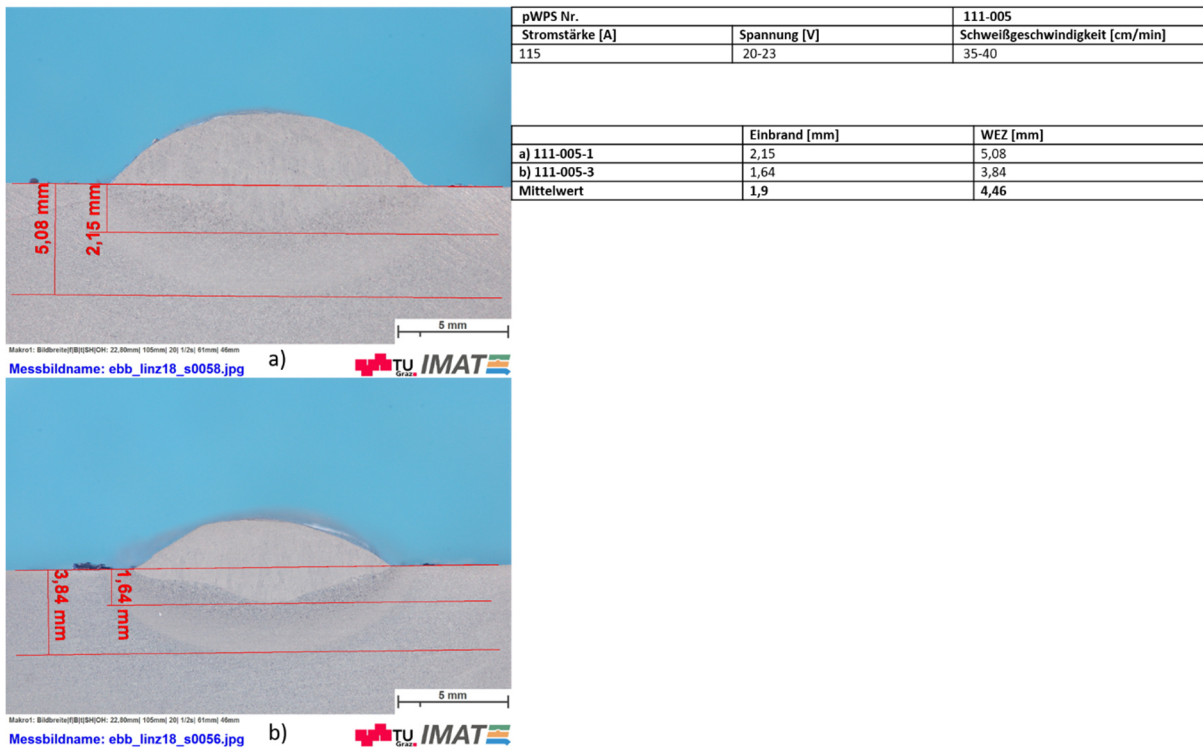


Abbildung F-0-3: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-005

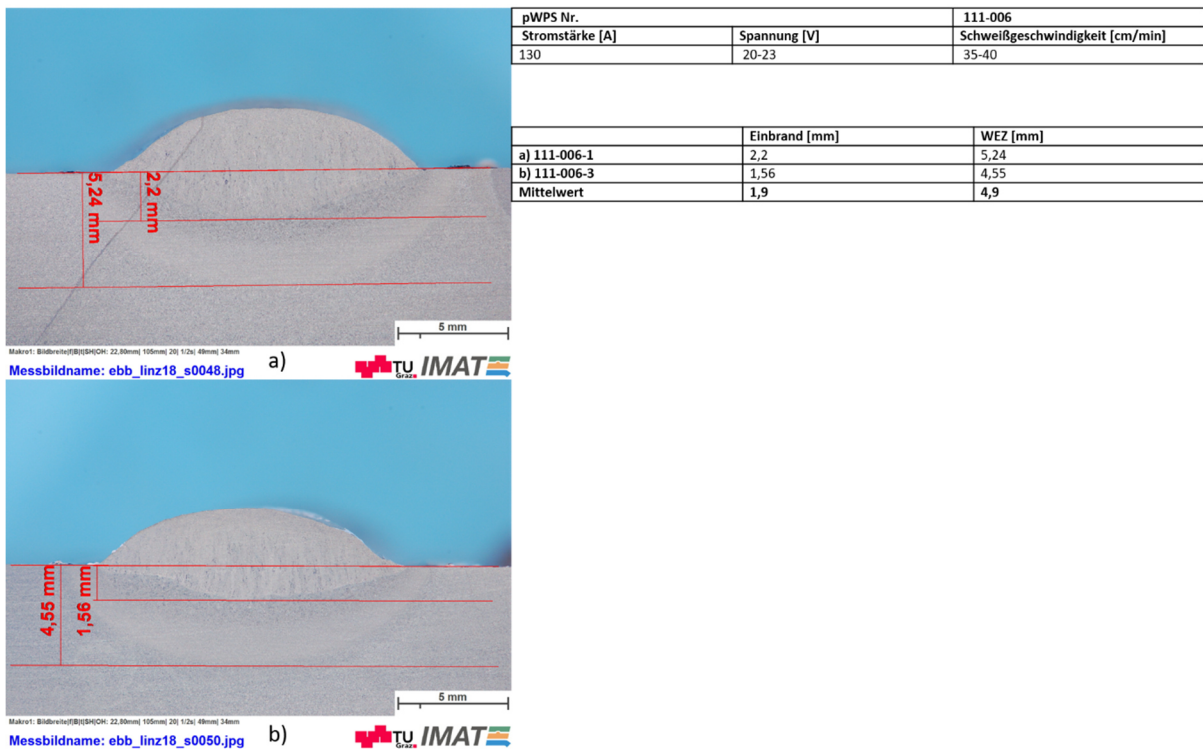
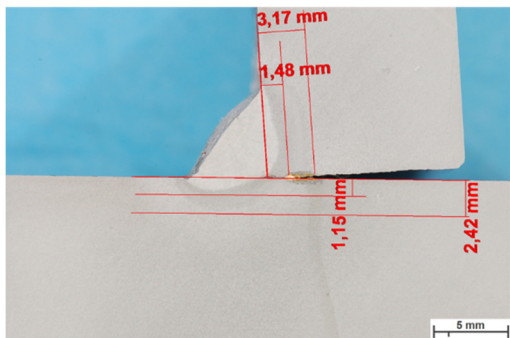


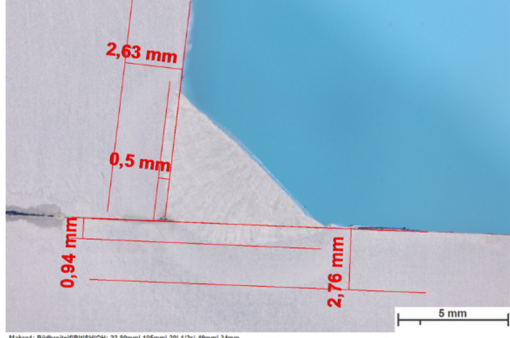
Abbildung F-0-4: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-006



pWPS Nr.	111-007	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
140	20-23	35-40

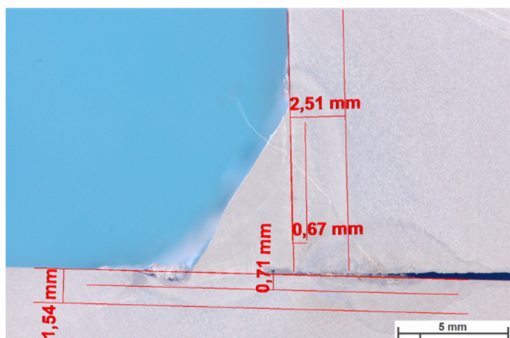
	Einbrand [mm]	WEZ [mm]
Steg		
a) 111-007-1	1,48	3,17
b) 111-007-3	0,5	2,63
Mittelwert	0,99	2,9
Grundplatte		
a) 111-007-1	1,15	2,42
b) 111-007-3	0,94	2,76
Mittelwert	1,05	2,59

Makro1: Bildbreite/ Höhe [mm]: 34,20mm/ 105mm [22: 3x] 100mm/ 45mm
Messbildname: ebb_linz18_s0078.jpg a)



Makro1: Bildbreite/ Höhe [mm]: 22,80mm/ 105mm [20: 1/2x] 48mm/ 34mm
Messbildname: ebb_linz18_s0006.jpg b)

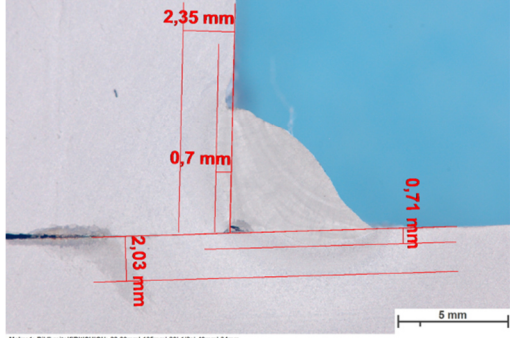
Abbildung F-0-5: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-007



pWPS Nr.	111-008	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
100	20,23	35-40

	Einbrand [mm]	WEZ [mm]
Steg		
a) 111-008-1	0,67	2,51
b) 111-008-3	0,7	2,35
Mittelwert	0,69	2,43
Grundplatte		
a) 111-008-1	0,71	1,54
b) 111-008-3	0,71	2,03
Mittelwert	0,71	1,79

Makro1: Bildbreite/ Höhe [mm]: 22,80mm/ 105mm [20: 1/2x] 48mm/ 34mm
Messbildname: ebb_linz18_s0018.jpg a)



Messbildname: ebb_linz18_s0016.jpg b)

Abbildung F-0-6: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-008

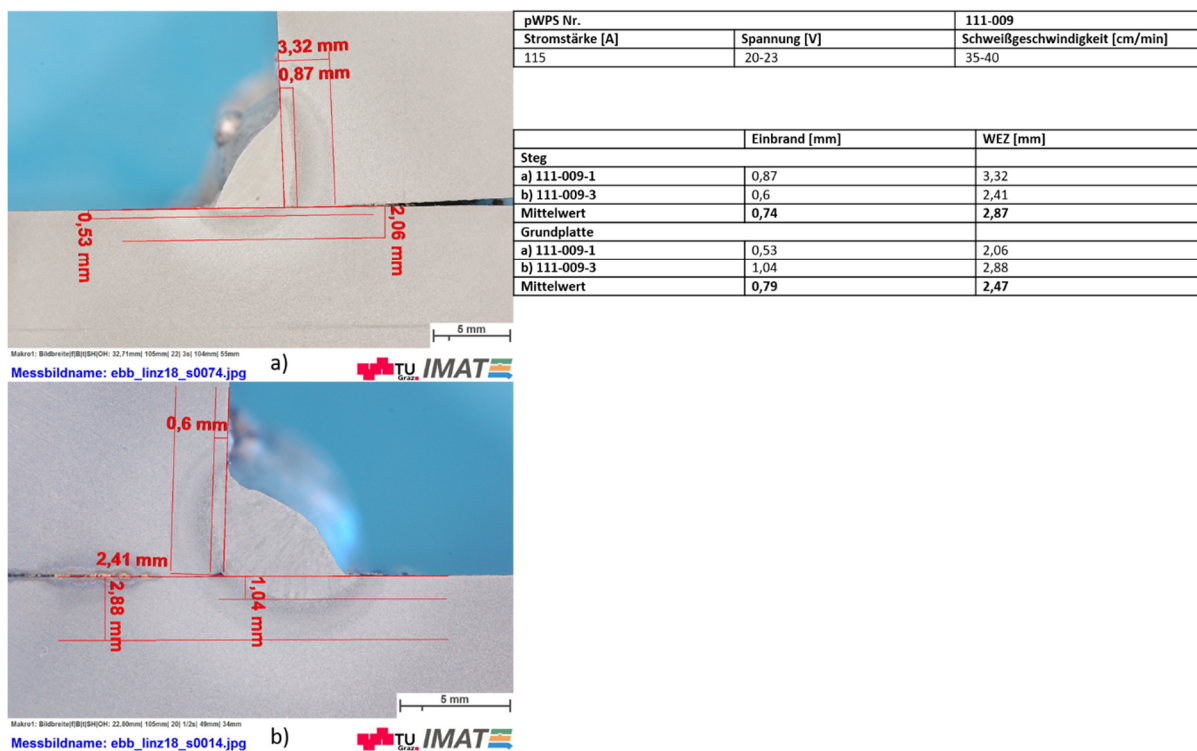


Abbildung F-0-7: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-009

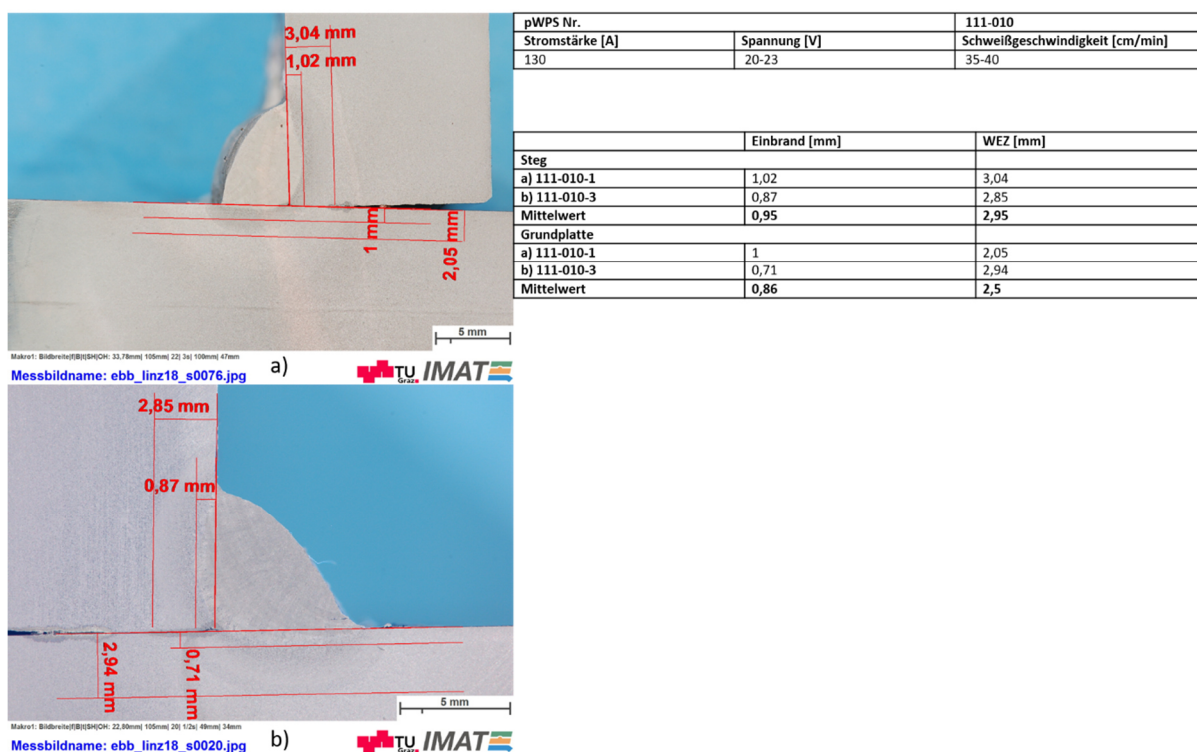


Abbildung F-0-8: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 111-010

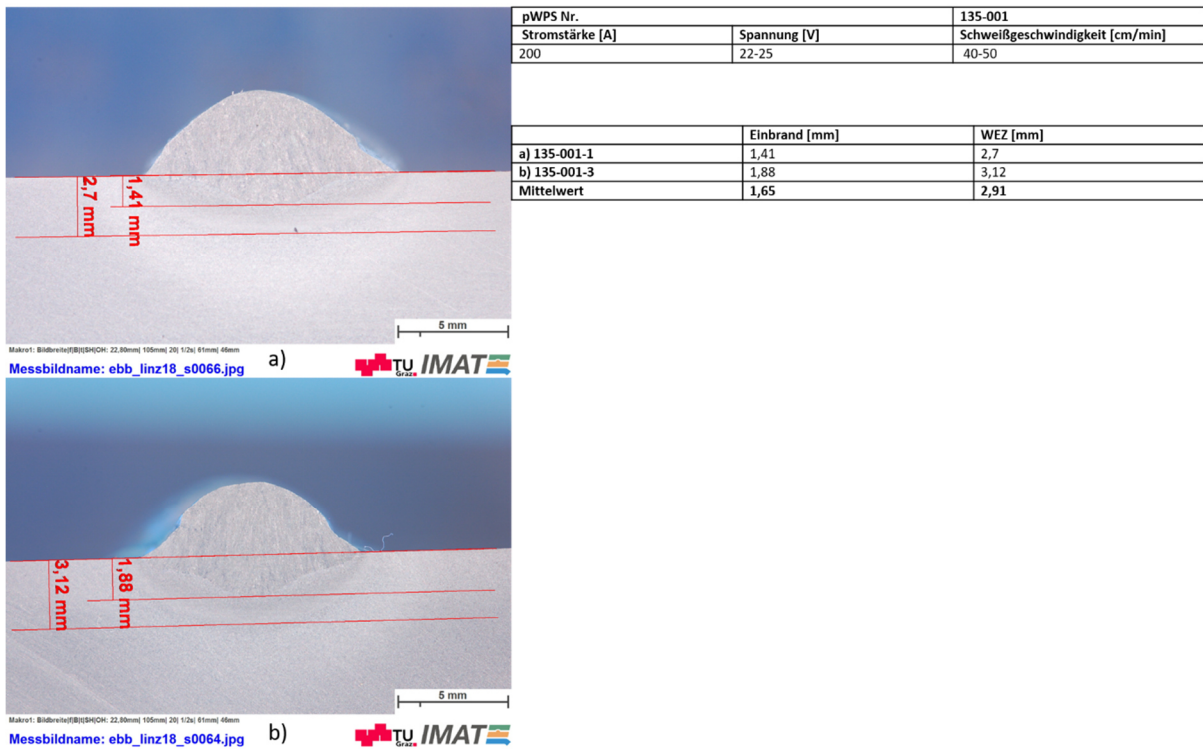


Abbildung F-0-9: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-001

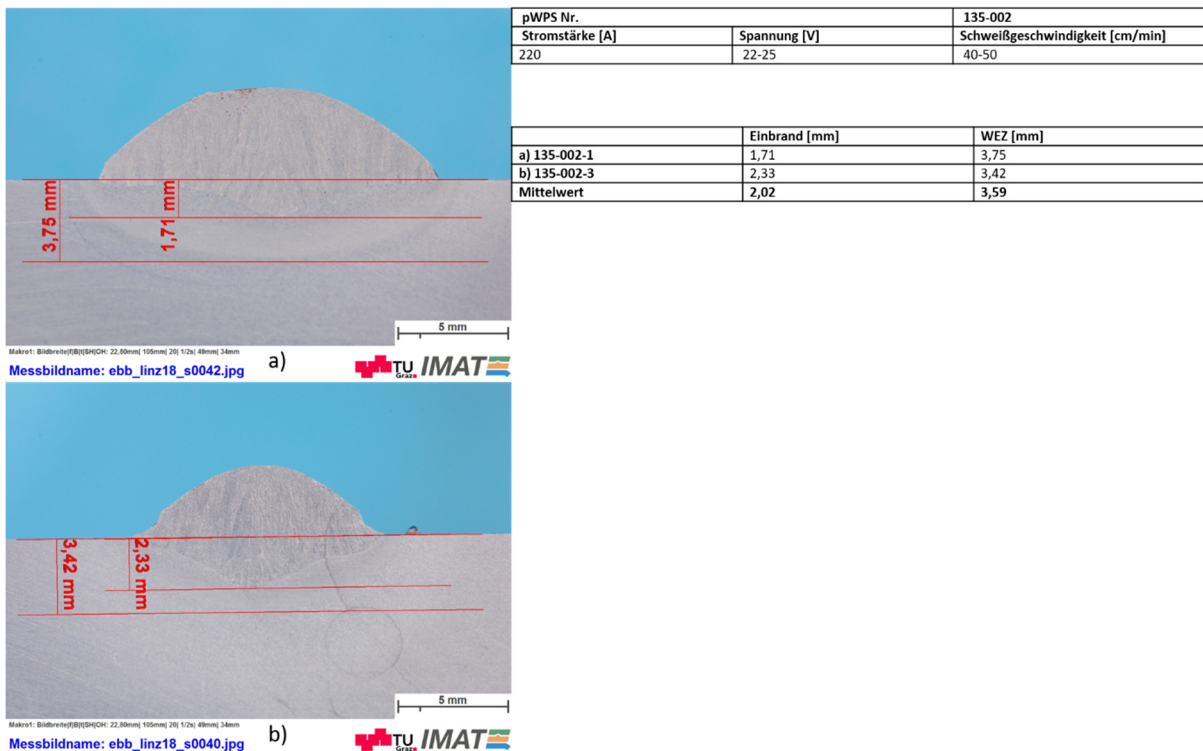
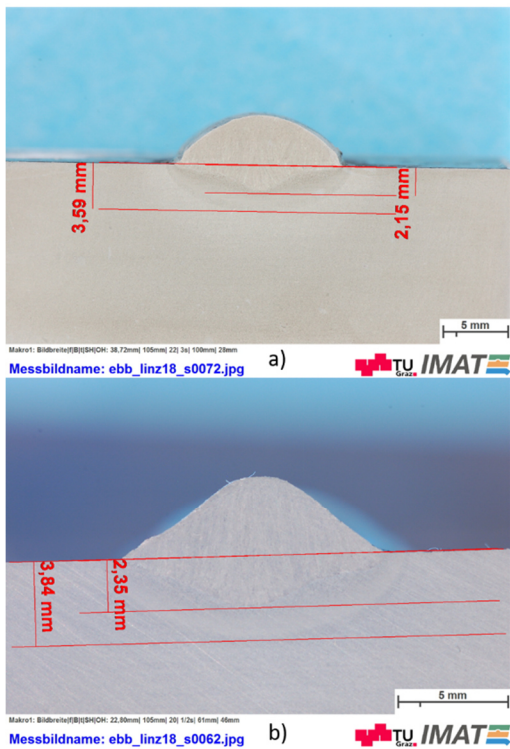


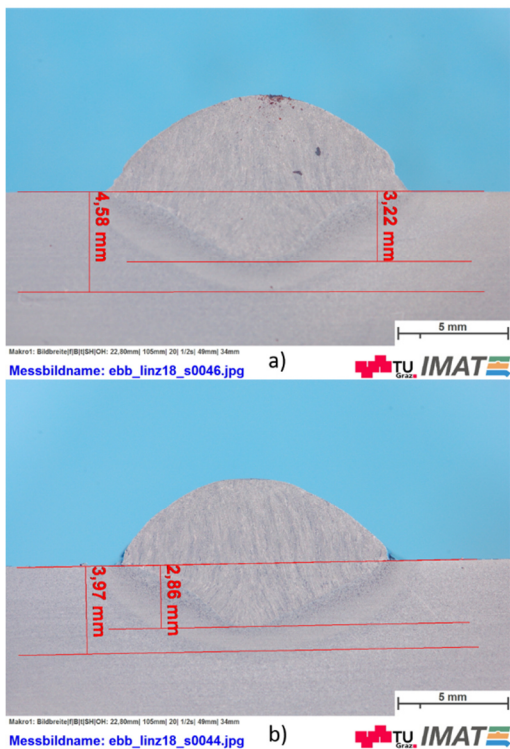
Abbildung F-0-10: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-002



pWPS Nr.	135-003	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50

	Einbrand [mm]	WEZ [mm]
a) 135-003-1	2,15	3,59
b) 135-003-3	2,35	3,84
Mittelwert	2,25	3,72

Abbildung F-0-11: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-003



pWPS Nr.	135-004	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
260	22-25	40-50

	Einbrand [mm]	WEZ [mm]
a) 135-004-1	3,22	4,58
b) 135-004-3	2,86	3,97
Mittelwert	3,04	4,28

Abbildung F-0-12: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-004

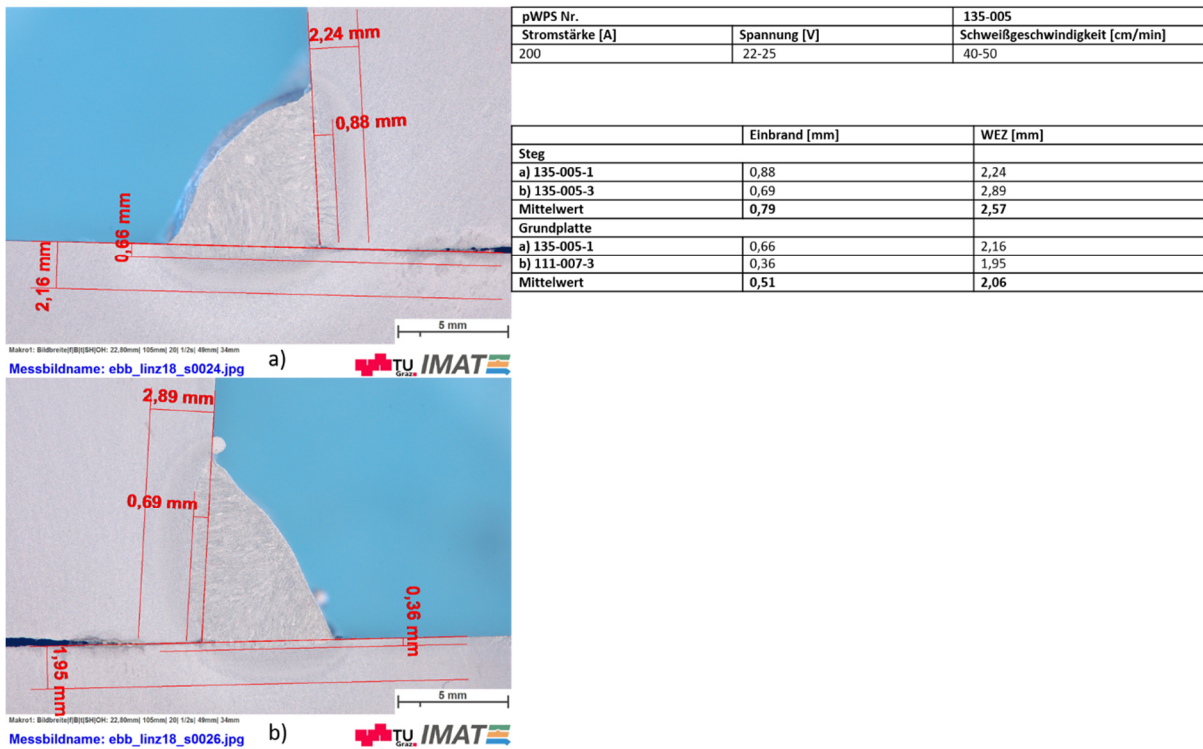


Abbildung F-0-13: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-005

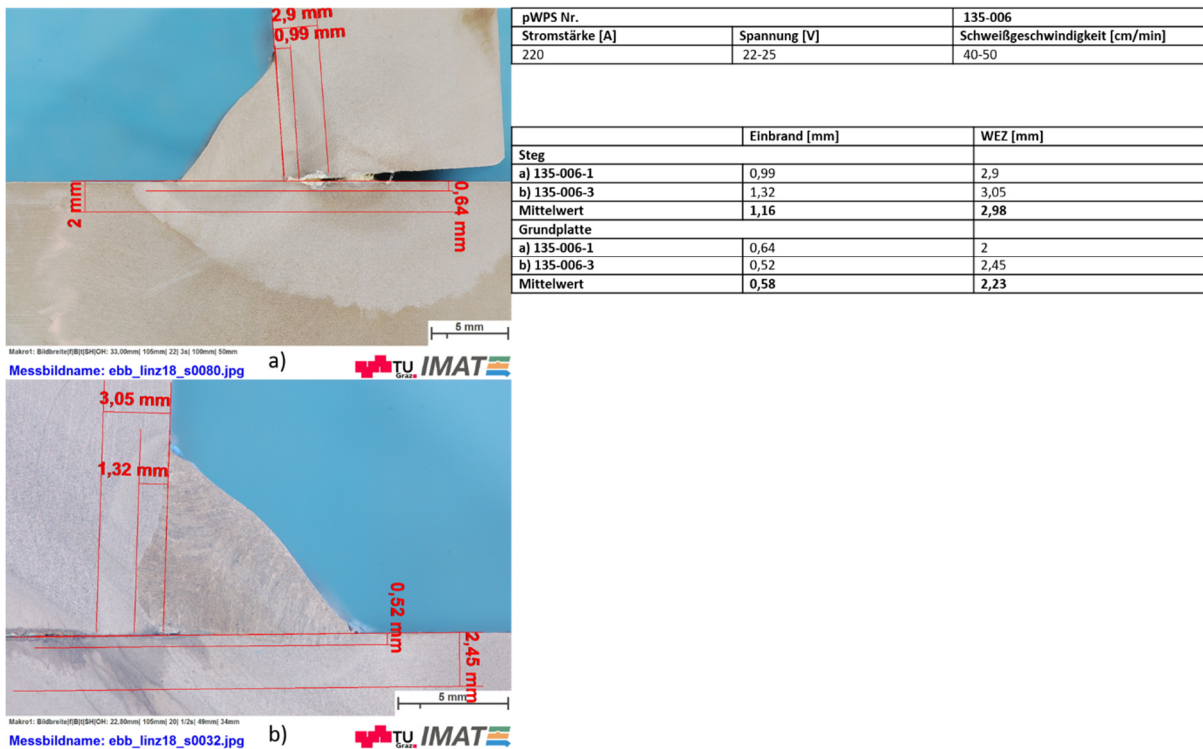


Abbildung F-0-14: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-006

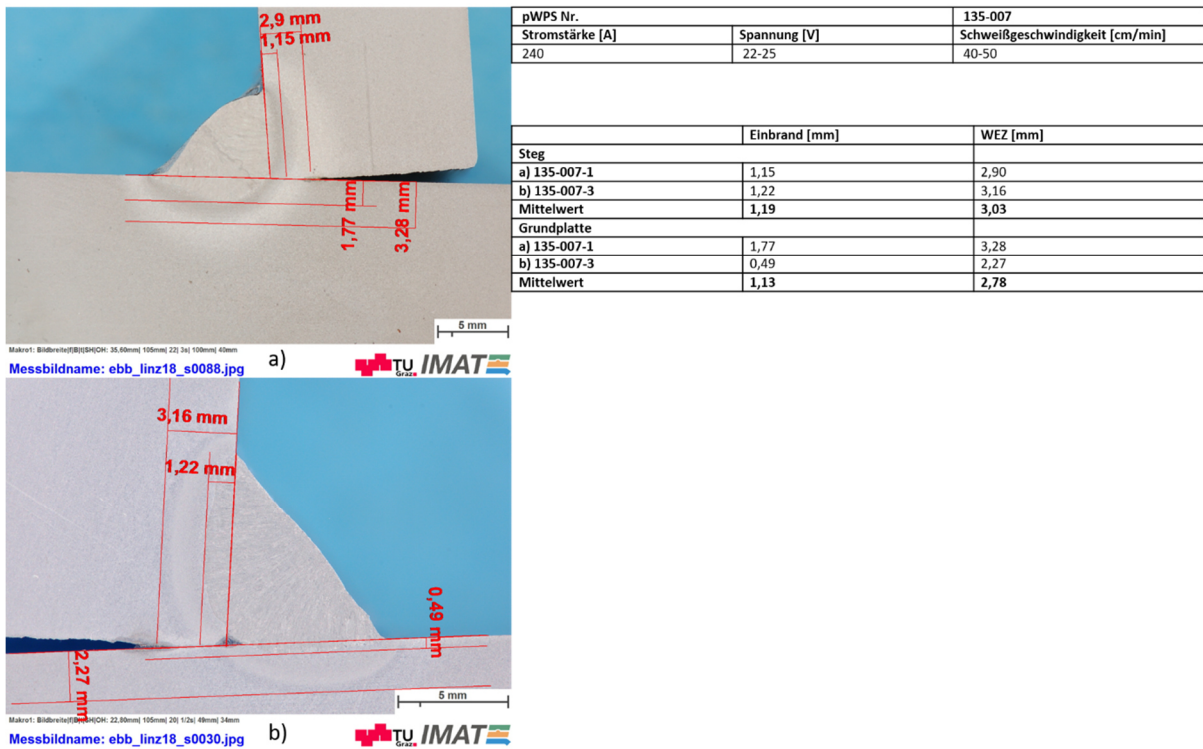


Abbildung F-0-15: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-007

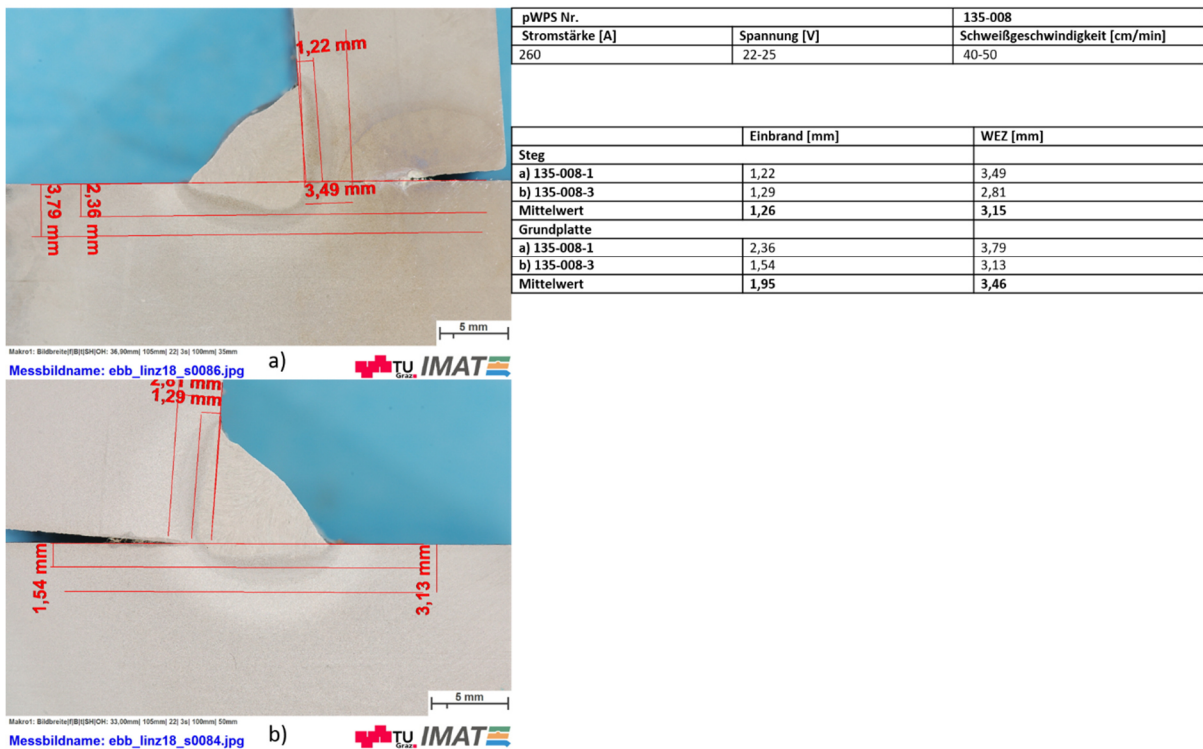


Abbildung F-0-16: Auswertung Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ 135-008

Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung



a)

Schweißproben Nummer:			111-011-1
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			



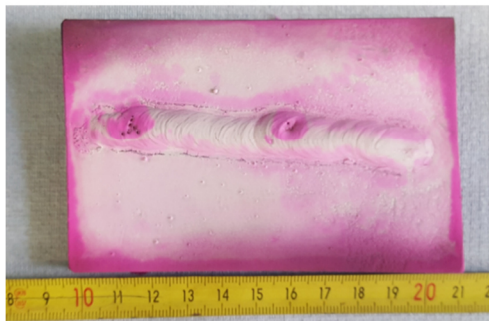
b)

Abbildung G-0-1: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-011-1; a) VT; b) PT



a)

Schweißproben Nummer:			111-011-2
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			
- Vereinzelte Poren ($\varnothing < 1\text{mm}$)			



b)

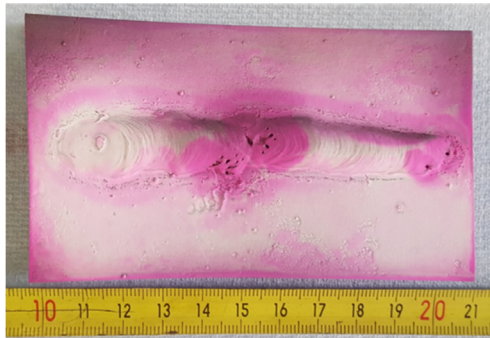
Abbildung G-0-2: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-011-2; a) VT; b) PT

Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung



a)

Schweißproben Nummer:			111-011-3
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelt Spritzer			
- Porennest wo abgesetzt wurde			



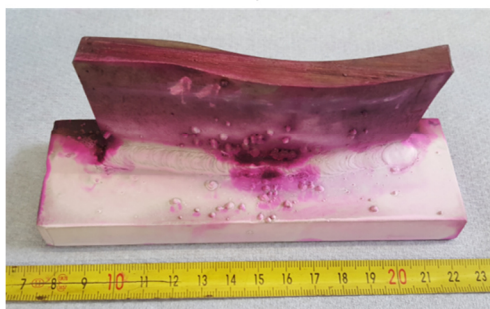
b)

Abbildung G-0-3: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-011-3; a) VT; b) PT



a)

Schweißproben Nummer:			111-012-1
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	Nicht bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	Nicht bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Sehr viele Spritzer			
- Im Bereich der Spritzer ungenügende Schweißnaht			



b)

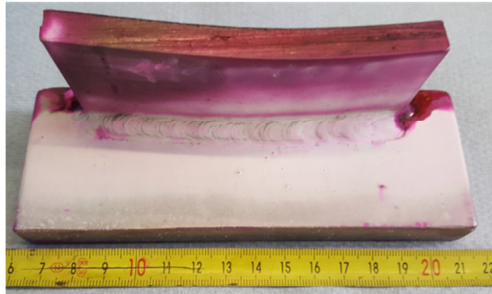
Abbildung G-0-4: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-1; a) VT; b) PT

Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung



a)

Schweißproben Nummer:			111-012-2
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			



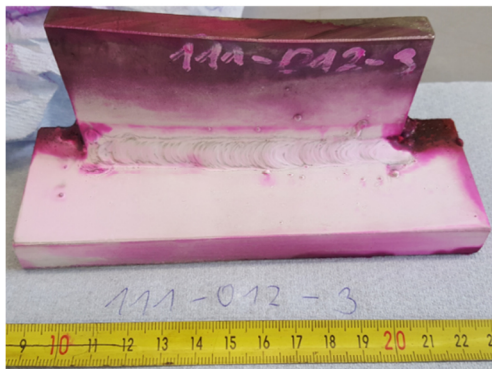
b)

Abbildung G-0-5: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-2; a) VT; b) PT



a)

Schweißproben Nummer:			111-012-3
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			



b)

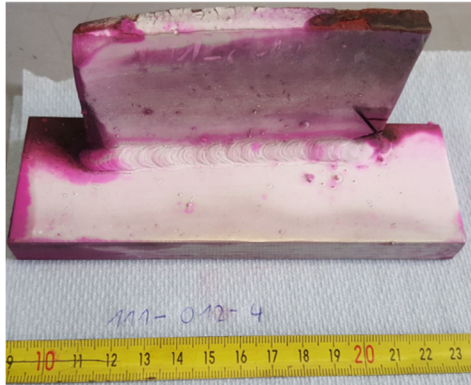
Abbildung G-0-6: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-3; a) VT; b) PT

Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung



Schweißproben Nummer:			111-012-4
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			

a)



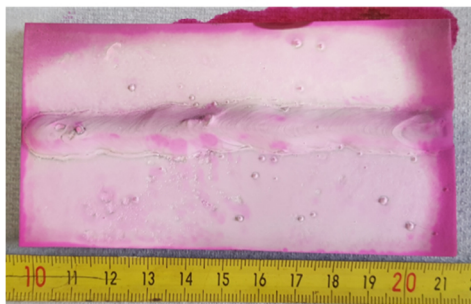
b)

Abbildung G-0-7: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 111-012-4; a) VT; b) PT



Schweißproben Nummer:			135-009-1
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			

a)



b)

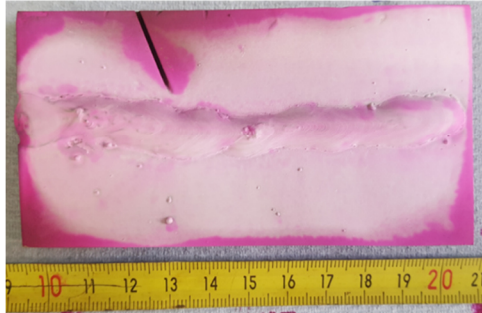
Abbildung G-0-8: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-009-1; a) VT; b) PT

Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung



a)

Schweißproben Nummer:			135-009-2
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelt Spritzer			



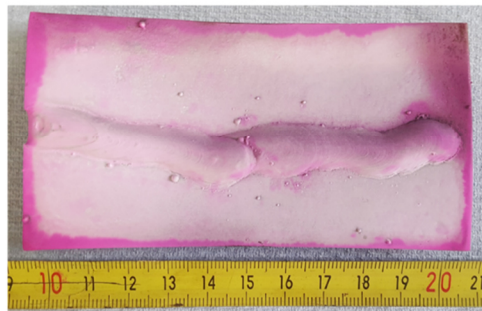
b)

Abbildung G-0-9: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-009-2; a) VT; b) PT



a)

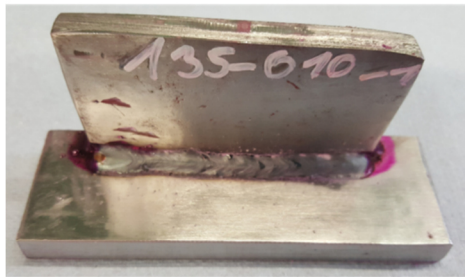
Schweißproben Nummer:			135-009-3
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelt Spritzer			



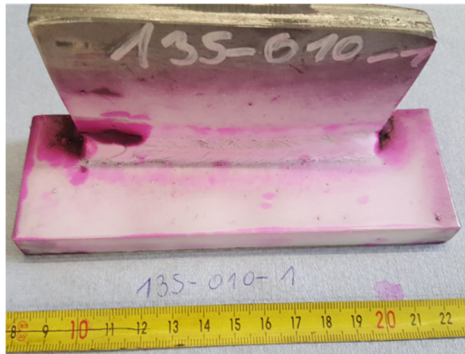
b)

Abbildung G-0-10: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-009-3; a) VT; b) PT

Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung



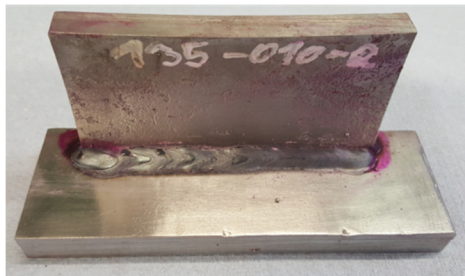
a)



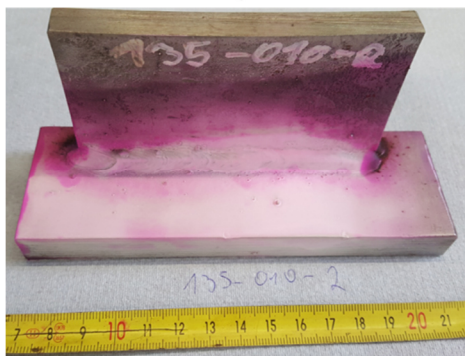
b)

Schweißproben Nummer:			135-010-1
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			

Abbildung G-0-11: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-1; a) VT; b) PT



a)

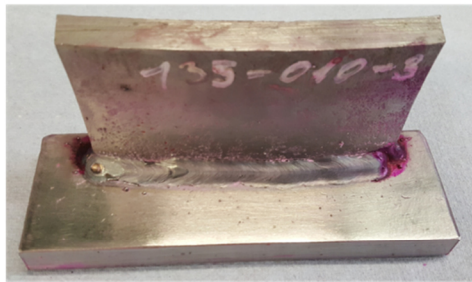


b)

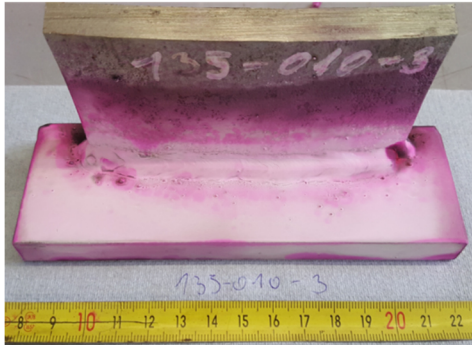
Schweißproben Nummer:			135-010-2
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelte Spritzer			

Abbildung G-0-12: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-2; a) VT; b) PT

Anhang G: Auswertung Sichtprüfung und Eindringprüfung



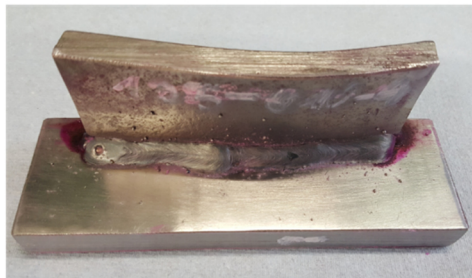
a)



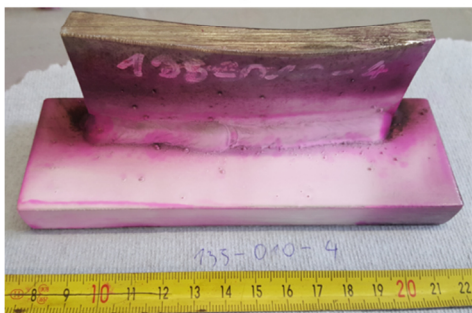
b)

Schweißproben Nummer:			135-010-3
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelt Spritzer			

Abbildung G-0-13: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-3; a) VT; b) PT



a)



b)

Schweißproben Nummer:			135-010-4
Prüfungsdatum			11.03.2018
Durchgeführte Prüfung	Verwendete Hilfsmittel	Bewertung nach	Ergebnis
VT	-	EN ISO 5817	bestanden
PT	ARDROX 9PR88	EN ISO 23277	bestanden
	ARDROX 9VF2		
	ARDROX NQ1		
Anmerkungen:			
- Vereinzelt Spritzer			

Abbildung G-0-14: Auswertung der PT und der VT Prüfung Proben Nummer: 135-010-4; a) VT; b) PT

Anhang H: Auswertung Einbrandtiefe Hauptversuche

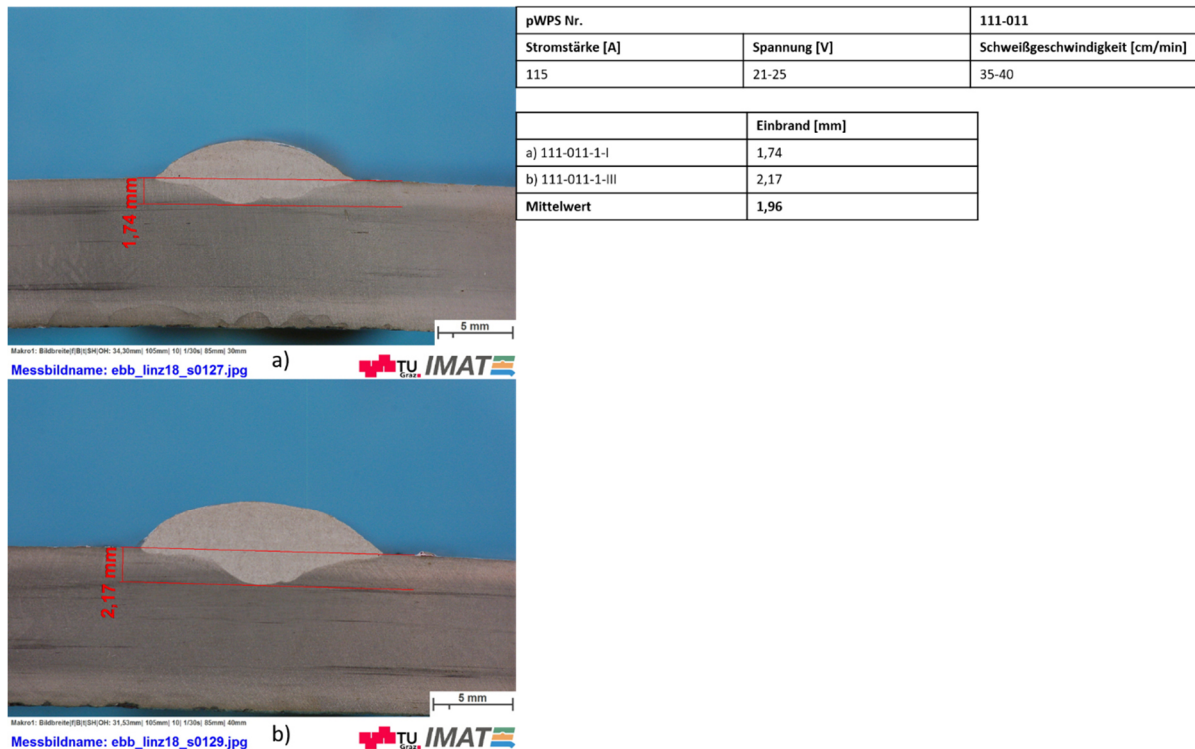
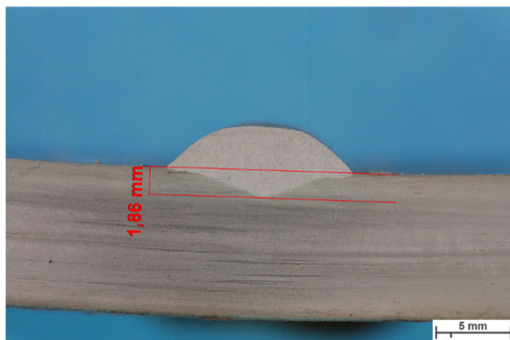


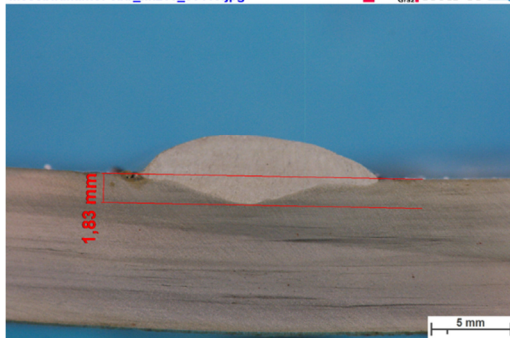
Abbildung H-0-1: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-011-1



Abbildung H-0-2: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-011-2



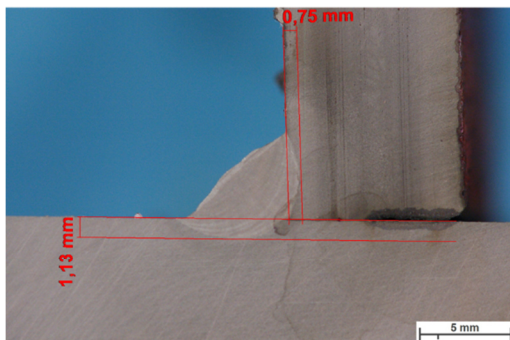
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 34,30mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0119.jpg a)



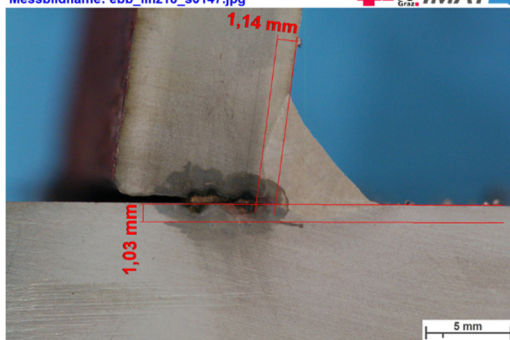
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 32,12mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0121.jpg b)

pWPS Nr.	111-011	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
115	21-25	35-40
	Einbrand [mm]	
a) 111-011-3-I	1,86	
b) 111-011-3-III	1,83	
Mittelwert	1,85	

Abbildung H-0-3: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-011-3



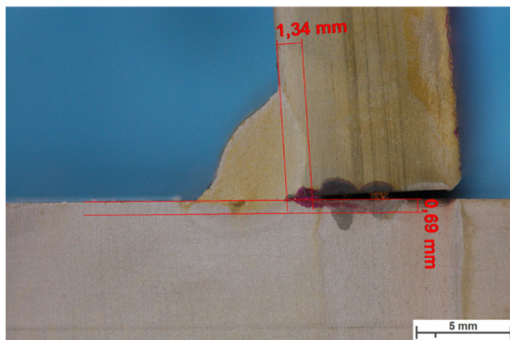
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 28,01mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 55mm
Messbildname: ebb_linz18_s0147.jpg a)



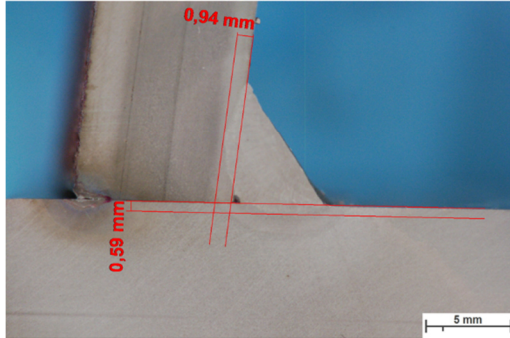
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 30,07mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 45mm
Messbildname: ebb_linz18_s0149.jpg b)

pWPS Nr.	111-012	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
130	20-23	35-40
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 111-012-1-I	1,13	0,75
b) 111-012-1-III	1,03	1,14
Mittelwert	1,08	0,95

Abbildung H-0-4: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-1



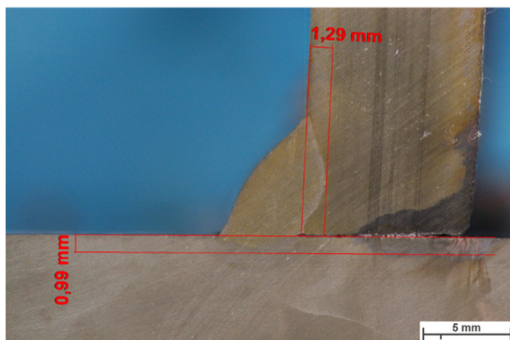
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 27,13mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0151.jpg a)



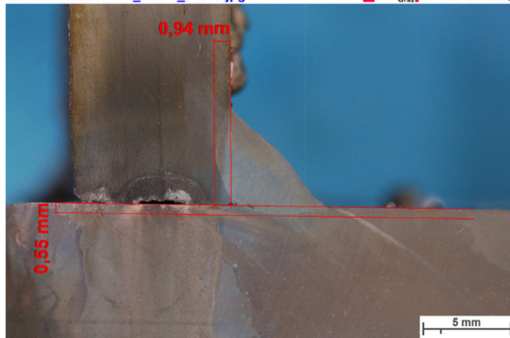
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 30,87mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 45mm
Messbildname: ebb_linz18_s0153.jpg b)

pWPS Nr.	111-012	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
130	20-23	35-40
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 111-012-2-I	0,69	1,34
b) 111-012-2-III	0,59	0,94
Mittelwert	0,64	1,14

Abbildung H-0-5: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-2



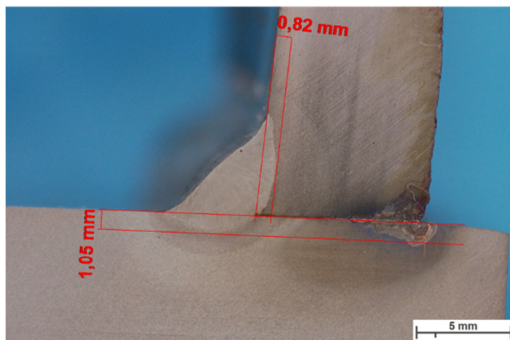
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 28,80mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0155.jpg a)



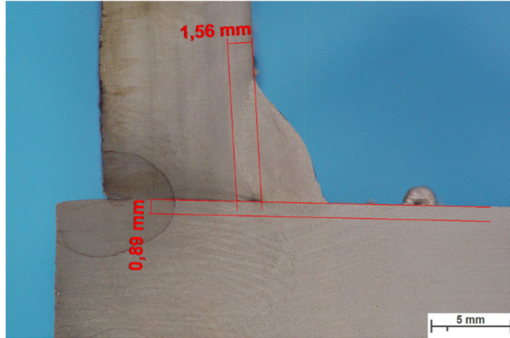
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 28,80mm/ 105mm) 10) 1/20x) 85mm) 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0157.jpg b)

pWPS Nr.	111-012	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
130	20-23	35-40
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 111-012-3-I	0,99	1,29
b) 111-012-3-III	0,55	0,94
Mittelwert	0,77	1,12

Abbildung H-0-6: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-3



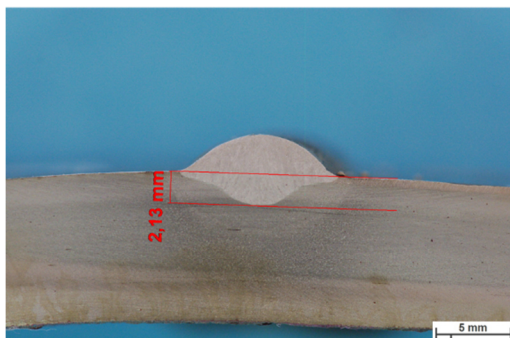
Makro1: Bildbreite/Fläche/Oh: 20,84mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 85mm/ 56mm
Messbildname: ebb_linz18_s0159.jpg a)



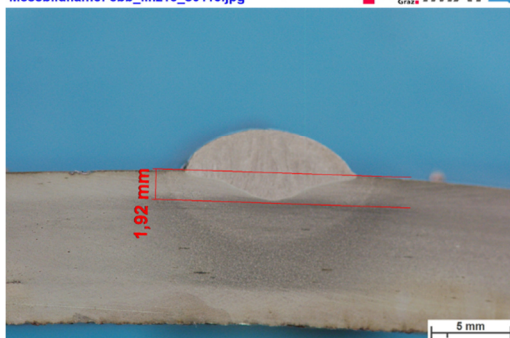
Makro1: Bildbreite/Fläche/Oh: 31,53mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 85mm/ 40mm
Messbildname: ebb_linz18_s0161.jpg b)

pWPS Nr.	111-012	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
130	20-23	35-40
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 111-012-4-I	1,05	0,82
b) 111-012-4-III	0,89	1,56
Mittelwert	0,97	1,19

Abbildung H-0-7: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 111-012-4



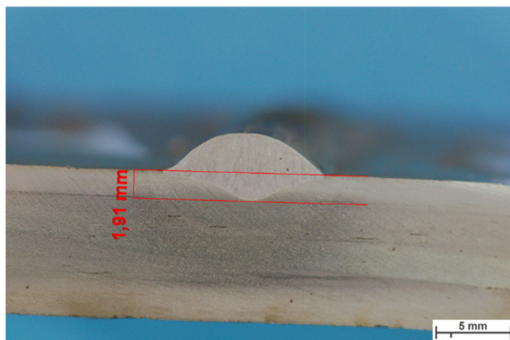
Makro1: Bildbreite/Fläche/Oh: 33,52mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 85mm/ 33mm
Messbildname: ebb_linz18_s0115.jpg a)



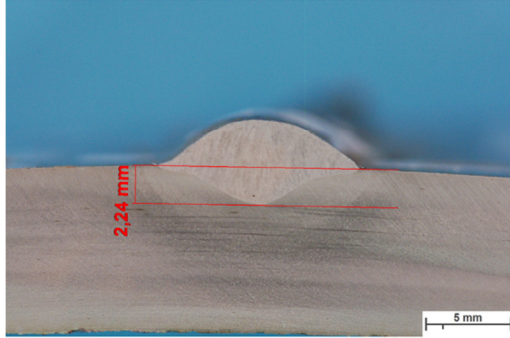
Makro1: Bildbreite/Fläche/Oh: 31,53mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 85mm/ 40mm
Messbildname: ebb_linz18_s0117.jpg b)

pWPS Nr.	135-009	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50
	Einbrand [mm]	
a) 135-009-1-I	2,13	
b) 135-009-1-III	1,92	
Mittelwert	2,03	

Abbildung H-0-8: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-009-1



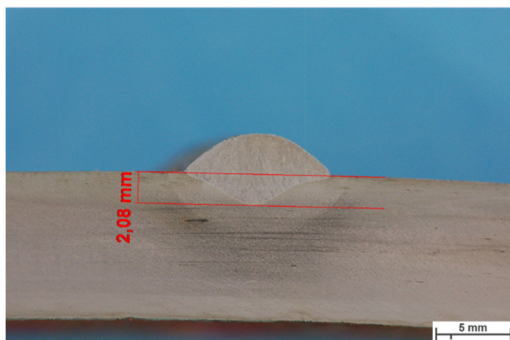
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 34,30mm/ 105mm(10: 1/20x) 85mm/ 20mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0111.jpg a)



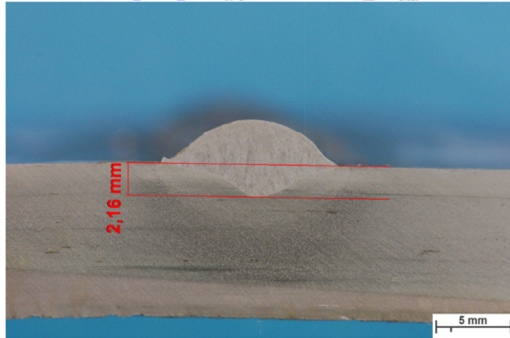
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 30,87mm/ 105mm(10: 1/20x) 85mm/ 45mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0113.jpg b)

pWPS Nr.	135-009	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50
	Einbrand [mm]	
a) 135-009-2-I	1,91	
b) 135-009-2-III	2,24	
Mittelwert	2,08	

Abbildung H-0-9: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-009-2



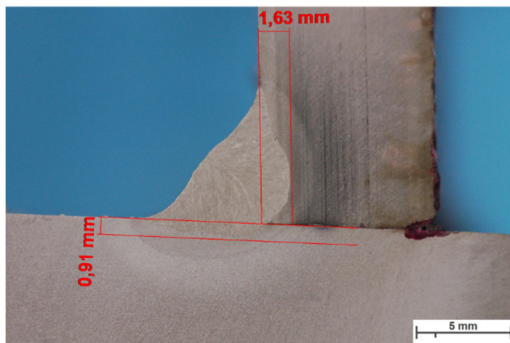
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 34,30mm/ 105mm(10: 1/20x) 85mm/ 20mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0107.jpg a)



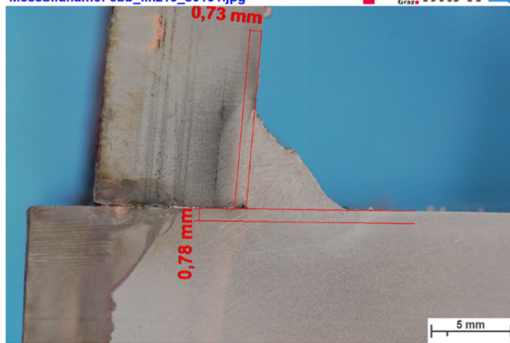
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 34,30mm/ 105mm(10: 1/20x) 85mm/ 20mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0109.jpg b)

pWPS Nr.	135-009	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50
	Einbrand [mm]	
a) 135-009-3-I	2,08	
b) 135-009-3-III	2,16	
Mittelwert	2,12	

Abbildung H-0-10: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-009-3



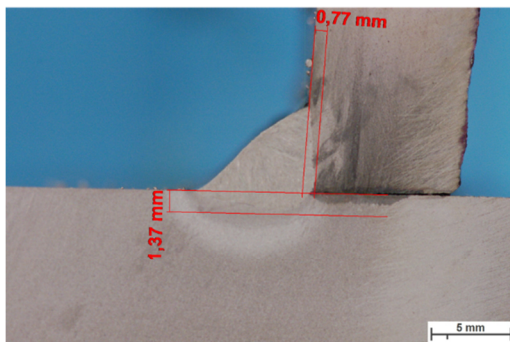
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 26,55mm/ 105mm) 10) 1/20x) 88mm) 60mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0131.jpg a)



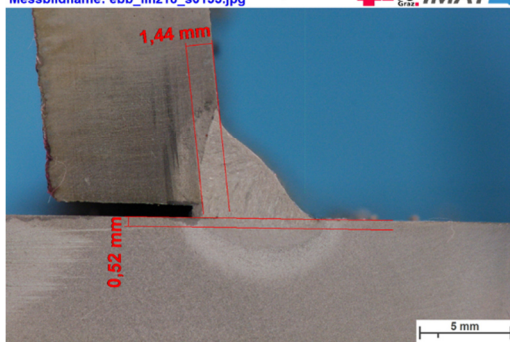
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 32,41mm/ 105mm) 10) 1/20x) 88mm) 60mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0133.jpg b)

pWPS Nr.	135-010	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 135-010-1-I	0,91	1,63
b) 135-010-1-III	0,78	0,73
Mittelwert	0,85	1,18

Abbildung H-0-11: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-1



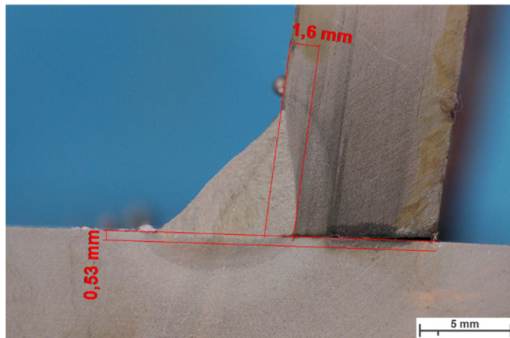
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 32,41mm/ 105mm) 10) 1/20x) 88mm) 60mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0135.jpg a)



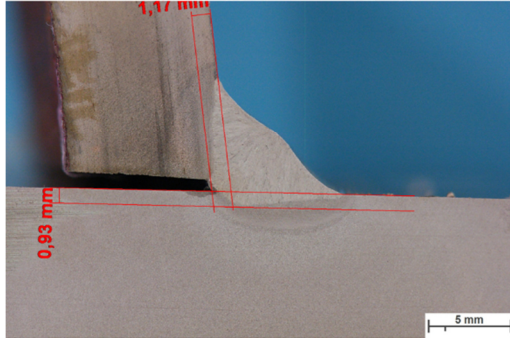
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 28,01mm/ 105mm) 10) 1/20x) 88mm) 60mm
 Messbildname: ebb_linz18_s0137.jpg b)

pWPS Nr.	135-010	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 135-010-2-I	1,37	0,77
b) 135-010-2-III	0,52	1,44
Mittelwert	0,95	1,11

Abbildung H-0-12: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-2



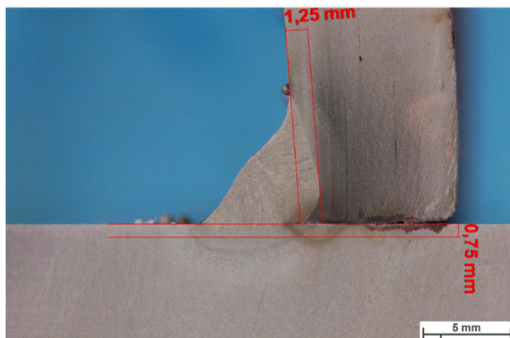
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 28,81mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 88mm/ 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0139.jpg a)



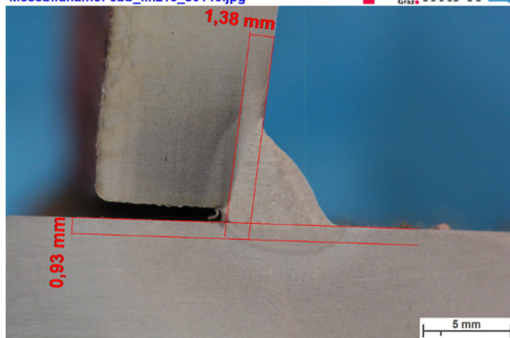
Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 30,85mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 88mm/ 45mm
Messbildname: ebb_linz18_s0141.jpg b)

pWPS Nr.	135-010	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 135-010-3-I	0,53	1,6
b) 135-010-3-III	0,93	1,17
Mittelwert	0,73	1,39

Abbildung H-0-13: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-3



Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 28,46mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 88mm/ 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0143.jpg a)



Makro1: Bildbreite/Bildhöhe: 28,46mm/ 105mm/ 10/ 1/20x/ 88mm/ 50mm
Messbildname: ebb_linz18_s0145.jpg b)

pWPS Nr.	135-010	
Stromstärke [A]	Spannung [V]	Schweißgeschwindigkeit [cm/min]
240	22-25	40-50
	Einbrand Grundplatte [mm]	Einbrand Steg [mm]
a) 135-010-4-I	0,75	1,25
b) 135-010-4-III	0,93	1,38
Mittelwert	0,84	1,32

Abbildung H-0-14: Einbrandtiefenmessung Hauptversuch 135-010-4

Anhang I: Ergebnisse Bruchprüfung nach EN ISO 9017



Abbildung I-0-1: Bruchprüfung 111-012-1

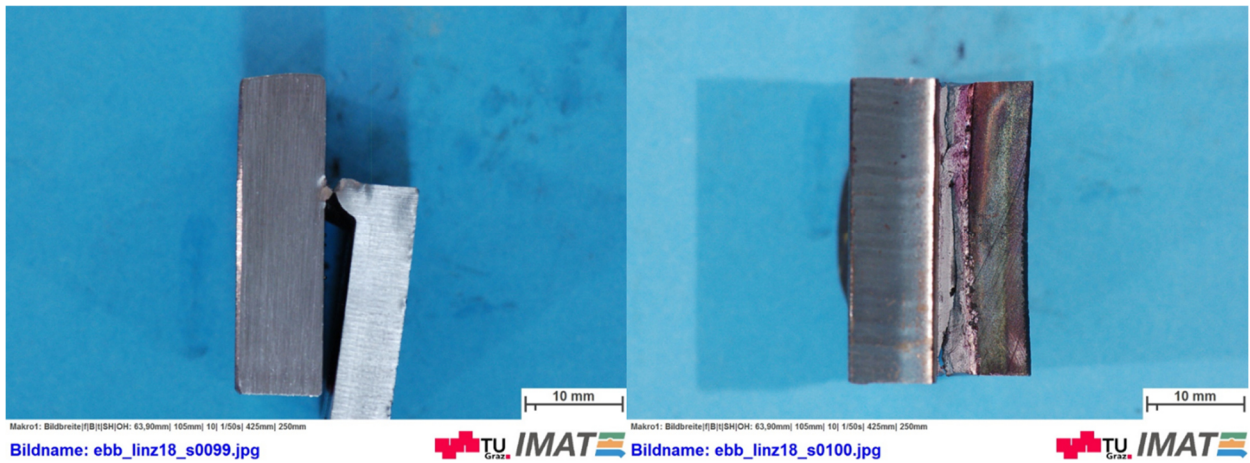


Abbildung I-0-2: Bruchprüfung 111-012-2

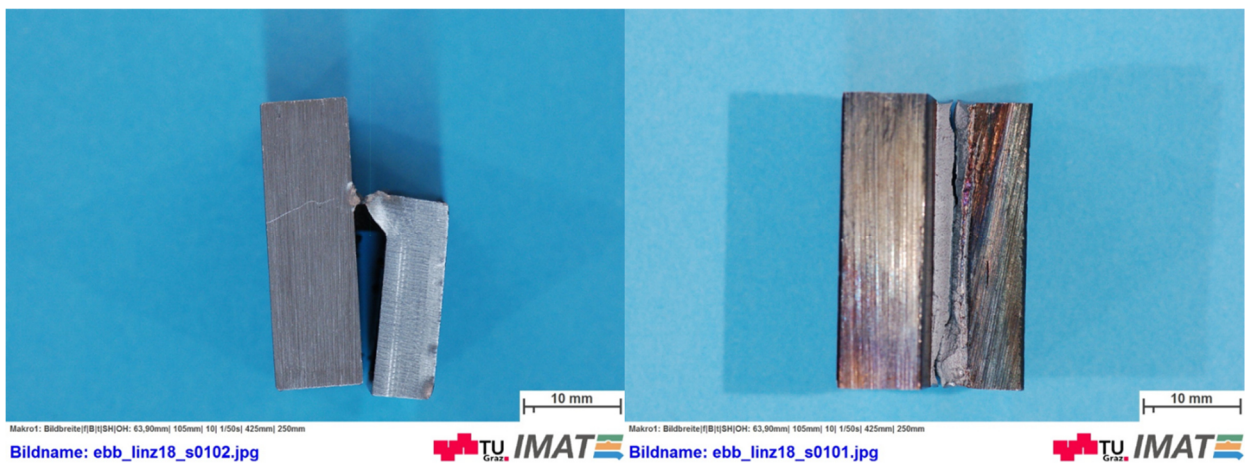


Abbildung I-0-3: Bruchprüfung 111-012-3

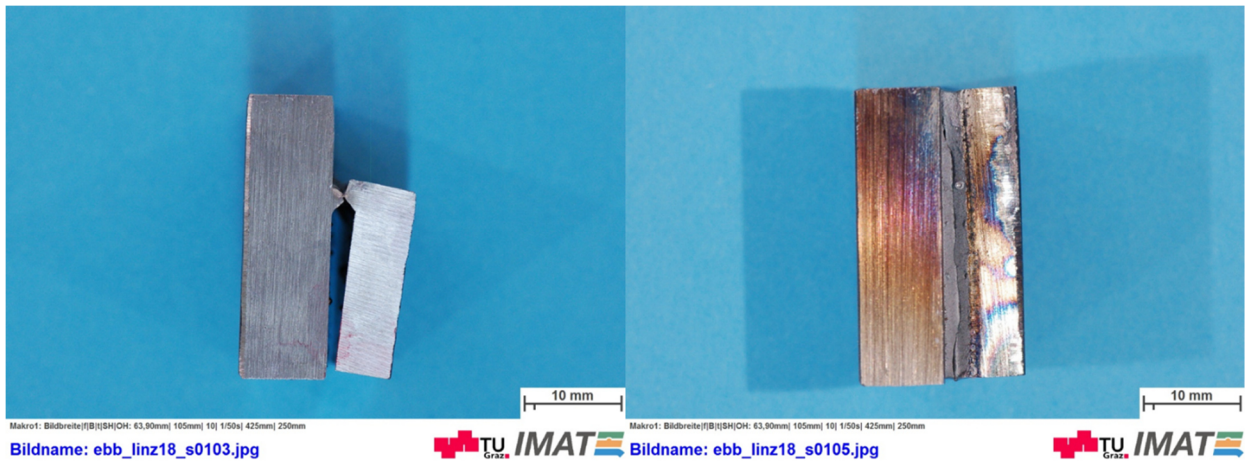


Abbildung I-0-4: Bruchprüfung 111-012-4

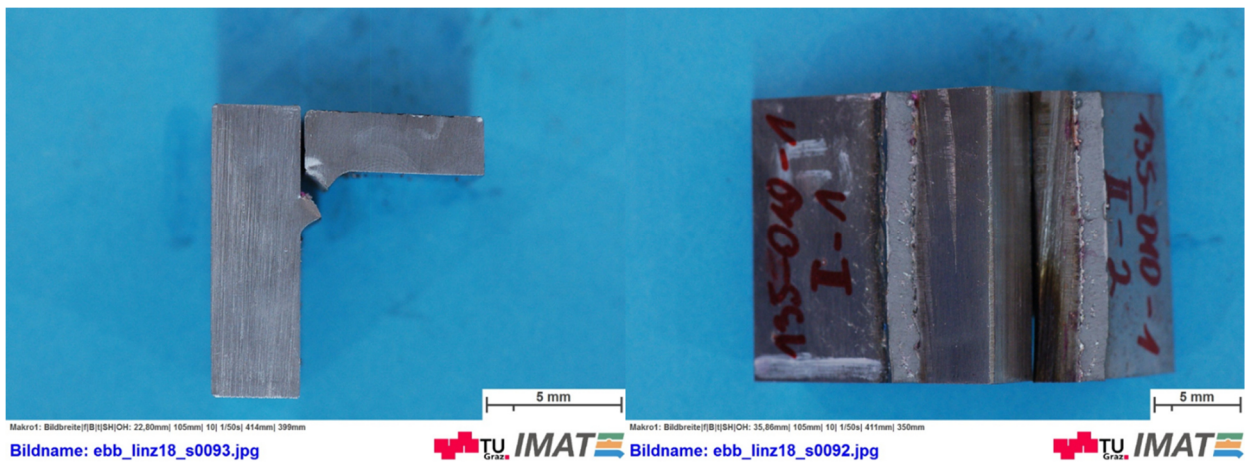


Abbildung I-0-5: Bruchprüfung 135-010-1



Abbildung I-0-6: Bruchprüfung 135-010-2

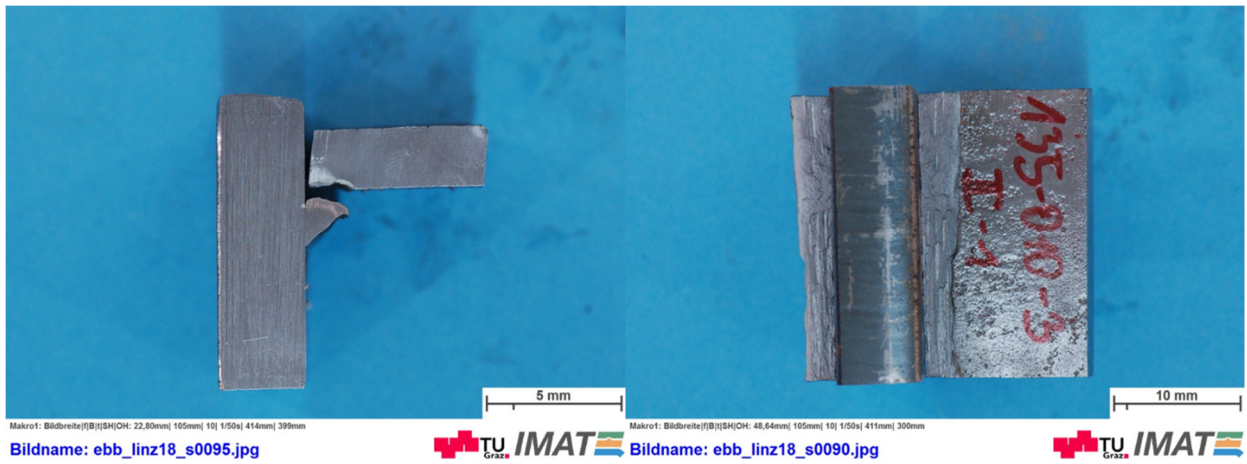


Abbildung I-0-7: Bruchprüfung 135-010-3

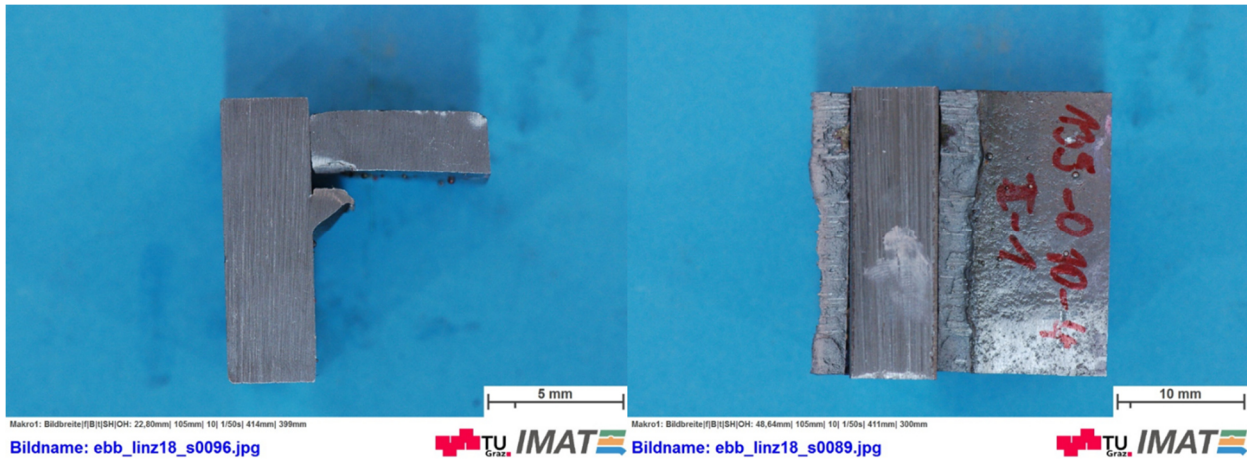


Abbildung I-0-8: Bruchprüfung 135-010-4