



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Michael Thomeßen

Qualifizierung typischer metallischer Konstruktionswerkstoffe für das Laserstrahlschweißen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Michael Thomeßen

**Qualifizierung typischer metallischer
Konstruktionswerkstoffe für das
Laserstrahlschweißen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Wenzel Schweißtechnik OHG
Lentföhrdener Weg 21
22523 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Gerhard Biallas
Zweitprüfer: Prof. Dr. Friedrich Ohlendorf

Abgabedatum: 12.09.2022

Zusammenfassung

Michael Thomeßen

Thema der Bachelorthesis

Qualifizierung typischer metallischer Konstruktionswerkstoffe für das Laserstrahlschweißen

Stichworte

Laserstrahlschweißverfahren, 1.0038, 1.4301, 3.3535, Zerstörungsfreie Prüfung, Sichtprüfung, Farbeindringprüfung, Durchstrahlprüfung, Zerstörende Prüfung, metallographischer Schliff (geätzt), Härteprüfung

Kurzzusammenfassung

Das Laserstrahlschweißverfahren (Laserbeamwelding, LBW) ist ein weit verbreitetes Verfahren in diversen Herstellungsprozessen. Überwiegend findet es beim Fügen von komplexen Legierung, Schweißen von hoher Nahtqualität oder in der Endfertigung schon wärmebehandelter Bauteile Anwendung.

Ziel dieser Arbeit ist die Schweißbarkeit von typischen metallischen Konstruktionswerkstoffen für das Laserstrahlschweißen durch zerstörungsfreie und zerstörende Werkstoffprüfung zu beurteilen. Die Untersuchung umfasst drei unterschiedliche Metalle, welche in ihrem Bereich als Standardwerkstoff gelten.

In den Grundlagen dieser Arbeit wird das Schweißverfahren vorgestellt, auf die Eigenschaften und das Schweißen von Baustählen, austenitischen Stählen und Aluminium eingegangen, sowie die notwendigen Prüfverfahren erläutert.

Im Ergebnis wird festgestellt, dass das Fügen der untersuchten Materialien mittels Laserstrahlschweißen sehr wohl möglich ist, der Prozess hinsichtlich seiner Anfälligkeit gegenüber Einflüssen jedoch einige Problematiken mit sich bringt. Es gelingt, in Bezug auf die Sicht- und Farbeindringprüfung, gute Ergebnisse, welche jedoch bei der Durchstrahlungsprüfung alle Ungenzen aufweisen und auch nach der niedrigsten Güteklasse (D) nach ISO 13919 nicht den anerkannten Regeln der Technik entsprechen.

Die Härteverläufe aller Proben weisen keine Auffälligkeiten auf, so dass hinsichtlich der Metallurgie nichts zu beanstanden ist.

Die Arbeit zeigt, dass gängige Metalle mittels Laserstrahlschweißen gefügt werden können. Hinsichtlich der Durchführung gilt jedoch, dass der Prozess sehr fehleranfällig ist und weitaus genauer vorbereitet und durchgeführt werden muss, als es bei anderen Verfahren, z. B. MSG oder WIG, der Fall ist.

Michael Thomeßen

Title of the paper

Qualification of typical metallic construction materials for laser beam welding

Keywords

Laser beam welding, 1.0038, 1.4301, 3.3535, Non-Destructive Testing, Visual Testing, Penetrant Testing, Radiographic Testing, Destructiv Testing, Metallographic polish (Entched), Hardness Test

Abstract

Laser beam welding (LBW) is a widely used method in various manufacturing processes. It is mainly used in joining of complex alloys, welding of high seam quality or in finishing of already heat-treated components.

The aim of this work is to evaluate the weldability of typical metallic structural materials for laser beam welding by non-destructive and destructive material testing. The investigation covers three different metals, which are considered standard materials in their field.

In the basics of this paper, the welding process is introduced, the properties and welding of structural steels, austenitic steels and aluminum are discussed, and the necessary test procedures are explained.

As a result, it is concluded that the joining of the materials studied by means of laser beam welding is very possible, but the process presents some problems in terms of its susceptibility to influences. Good results are obtained in the visual and dye penetrant tests, but the radiographic tests all show imperfections and do not comply with the recognized rules of technology, even according to the lowest quality class (D) of ISO 13919.

The hardness curves of all specimens show no abnormalities, so that nothing can be objected to with regard to metallurgy.

The work shows that common metals can be joined by laser beam welding. However, with regard to the implementation, the process is very error-prone and must be prepared and carried out much more precisely than is the case with other processes, e.g. MSG or TIG.

Danksagung

Einige Menschen haben einen wertvollen Beitrag zur Vollendung dieser Arbeit geleistet, weshalb ihnen an dieser Stelle ein herzlicher Dank zukommen soll.

Zunächst sei Herrn Prof. Dr. Gerhard Biallas für die Begleitung, fachliche Unterstützung und Prüfung dieser Arbeit gedankt. Ebenfalls sei Herrn Prof. Dr. Friedrich Ohlendorf an dieser Stelle für die Prüfung dieser Arbeit gedankt.

Weiterhin geht ein besonderer Dank an Herrn Lukas Sommer für die Bereitstellung der Laserstrahlquelle und somit der Ermöglichung der Durchführung.

Ebenfalls gilt meine Dankbarkeit Herrn Björn Rosenburg für die tatkräftige Unterstützung bei der Sicht- und Farbeindringprüfung und der förderlichen Diskussion.

Außerdem gilt meine Dankbarkeit Herrn Andreas Thomeßen und Herrn Pascal Muszynski von der James Frames GbR für die hochaufgelösten Aufnahmen der VT- und PT-Prüfungen.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Andreas Schlüter und Hans-Günther Lange von der Deutschen Bahn AG für die Unterstützung bei der Herstellung der Makroschliffe und Felix Kröplin vom TÜV Nord EnSys GmbH & Co. KG für die Durchführung der Durchstrahlprüfung.

Meine Dankbarkeit gilt außerdem Frau Vera Liedtke-Scheffler und Frau Andrea Hasselmann für die tatkräftige Unterstützung bei der Metallografie und der damit verbundenen, förderlichen Diskussion.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Danksagung	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Abbildungsverzeichnis.....	XI
1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Einführung in das Wissensgebiet	2
2.1 Metallschweißen.....	2
2.2 Schmelzschweißen.....	3
2.3 Schutzgasschweißen	3
2.3.1 MSG-Schweißen.....	4
2.3.2 WIG-Schweißen.....	4
2.4 Laserstrahlschweißen	5
2.4.1 Vorteile.....	7
2.4.2 Nachteile	8
2.4.3 Besonderheiten	8
2.5 Schutzgase	9
3. Grundlegendes zu Metallen und deren Legierungen	11
3.1 Allgemeine Baustähle	11
3.1.1 Eigenschaften.....	11
3.1.2 Chemische Zusammensetzung	12
3.1.3 Technische Lieferbedingung 1.0038 - S235JR [8].....	12
3.2 Austenitische Stähle	13
3.2.1 Eigenschaften.....	13
3.2.2 Chemische Zusammensetzung	14
3.2.3 Technische Lieferbedingung 1.4301 - X5CrNi18-10 [10].....	14
3.3 Aluminiumlegierungen	14
3.3.1 Eigenschaften.....	15
3.3.2 Chemische Zusammensetzung	15
3.3.3 Technische Lieferbedingung 3.3535 - AlMg3 - AW 5754 [11]	16
3.4 Eigenschaften der Werkstoffe beim Schweißen.....	16
3.4.1 Schweißen von Baustählen	17
3.4.2 Schweißen von austenitischer Stähle.....	19
3.4.3 Schweißen von Aluminiumlegierungen.....	21
4. Prüfverfahren	22
4.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren.....	22
4.1.1 Sichtprüfung nach ISO 13919 (VT = Visual Testing)	23
4.1.2 Farbeindringprüfung nach ISO 3452-1 (PT = Penetrant Testing)	24
4.1.3 Durchstrahlprüfung nach ISO 17636 (RT = Radiografic Testing)	24
4.2 Zerstörende Prüfverfahren (metallurgische Untersuchungen)	25
4.2.1 Makroskopisches und Mikroskopisches Schlibbild	26

4.2.2	Härteprüfung	26
5.	Vorgaben und Zielsetzung	29
5.1	Grundwerkstoffe	29
5.1.1	Abmessungen der Proben	30
5.1.2	Schweißnahtvorbereitung	30
5.1.3	Anforderungen	32
5.2	Vorgaben aus geltenden Regelwerken	32
5.2.1	Schweißfehler (allgemein)	32
5.2.2	Poren	33
5.2.3	Aufhärtung und Risse	33
6.	Prozessparameter	34
6.1	Prozessanordnung	34
6.2	Prozesseinstellungen	34
6.3	Randbedingungen	34
7.	Versuchsanlage und Versuchsaufbau	35
7.1	Laserquelle	35
7.2	Knickarmroboter	36
7.3	Schutzgas und Wurzelschutz	36
7.4	Schweißzusatz	36
7.4.1	Massivdraht für Baustahl 1.0038 - S235JR	37
7.4.2	Massivdraht für austenitischen Stahl 1.4301 - X5CrNi18-10	37
7.4.3	Massivdraht für Aluminiumlegierung 3.3535 - AlMg3 - AW5754	38
7.5	Gasflasche mit Druckminderer	38
7.6	Positionierung der Werkstückproben	38
8.	Versuchsdurchführung	40
8.1	Defokussierung des Laserstrahls	40
8.2	Ermittlung der Schweißparameter während des Versuchs	41
8.3	Prinzipieller Ablauf beim Laserstrahlschweißen	42
8.3.1	Anfertigen der Prüfstücke	42
8.3.2	Nahtvorbereitung und Reinigen der Fügestelle	42
8.3.3	Änderung der Start- und Stopp-Punkte	43
8.3.4	Änderungen des Versuchsaufbaus	43
8.3.5	Bewertung / Untersuchung der Schweißnähte	44
8.3.6	Herstellung makroskopisches Schlibfbild	44
9.	Auswertung	45
9.1	Auswertung der Prüfungen	45
9.2	Prüfungen am Baustahl 1.0038 / S235JR	46
9.2.1	Sichtprüfung VT (ISO 13919-1)	46
9.2.2	Farbeindringprüfung PT (ISO 3452-1)	47
9.2.3	Durchstrahlprüfung RT (ISO 17636-2)	47
9.3	Metallografische Untersuchung des Baustahls	48
9.3.1	Makroskopischer Schliff / Nahtform	48
9.3.2	Vickers-Härteverlauf (ISO 22826)	48
9.4	Prüfungen am austenitischen Stahl 1.4301 / X5CrNi18-10	49
9.4.1	Sichtprüfung VT (ISO 13919-1)	49

9.4.2	Farbeindringprüfung PT (ISO 3452-1)	50
9.4.3	Durchstrahlprüfung RT (ISO 17636-2)	50
9.5	Metallografische Untersuchung des austenitischen Stahls	51
9.5.1	Makroskopischer Schliff / Nahtform.....	51
9.5.2	Vickers-Härteverlauf (ISO 22826)	51
9.6	Prüfungen an der Aluminiumlegierung 3.3535 / AlMg3 / AW 5754.....	52
9.6.1	Sichtprüfung VT (ISO 13919-2)	52
9.6.2	Farbeindringprüfung PT (ISO 3452-1)	53
9.6.3	Durchstrahlprüfung RT (ISO 17636-2)	54
9.7	Metallografische Untersuchung der Aluminiumlegierung	54
9.7.1	Makroskopischer Schliff / Nahtform.....	54
9.7.2	Vickers-Härteverlauf (ISO 22826)	55
9.8	Einflussfaktoren auf das Schweißergebnis	56
9.8.1	Nahtvorbereitung / Reinigung	56
9.8.2	Prozessparameter	56
10.	Fehleranalyse.....	57
10.1	Spritzer (602) auch Deck- und / oder Wurzellage	57
10.2	Decklagenüberhöhung (502) und Wurzelüberhöhung (504)	57
10.3	Schweißnahtgeometrie	58
10.4	Endkraterlunker (2024) und Wurzelbindefehler (4013)	59
10.5	Poren (2011) und Porenzeilen (2024)	59
10.6	Beenden der Versuche und Auswertung der Proben	64
11.	Zusammenfassung und Fazit	65
12.	Literaturverzeichnis	66
13.	Anhang	69

Symbolverzeichnis

λ	μm	Wellenlänge
a	mm	Prüfstückbreite
A	%	Bruchdehnung
A_{HV}	mm^2	Eindruckfläche
A_V	J	Kerbschlagarbeit
A_W	mm^2	Leistungsfläche des Laserstrahls
b	mm	Prüfstüklänge
CEV	%	Kohlenstoffäquivalent
d_1	mm	Diagonale 1
d_2	mm	Diagonale 2
d_V	mm	Eindruckdiagonallänge
E_V	lx	Beleuchtungsstärke
F	N	Kraft
h	mm	Einbrandtiefe
HV	N/mm^2	Vickershärte
I	W/cm^2	Leistungsdichte
\varnothing	mm	Durchmesser
P	W	Leistung
R_{eH}	MPa	Mindeststreckgrenze
R_m	MPa	Mindestzugfestigkeit
R_T	$^{\circ}\text{C}$	Raumtemperatur
t	mm	Dicke der Probe
T_m	$^{\circ}\text{C}$	Schmelzpunkt
W	mm	Eindruckabstand
η	1	Wirkungsgrad

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
Al ₃ O ₂	Aluminiumoxid
Ar	Argon (altgriechisch argós, 'untätig, träge')
As	Arsenid
AW	Wrought Alloy / Aluminiumknetlegierung
B	Bor
Bi	Bismut oder Wismut (historisch auch: Wismuth)
BPK	Bildgüteprüfkörper
C	Kohlenstoff (von urgerm. kul-a, kul-ō- 'Kohle,')
Co	Cobalt auch Kobalt (lat. cobaltum)
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom (altgriechisch chróma, deutsch 'Farbe')
Cu	Kupfer (lat. Cuprum)
ELC-Stahl	extra low carbon Steel
ET	Eddy current testing / Wirbelstromprüfung
Fe	Eisen (lat. ferrum)
Fe ₃ C	Eisencarbid / Zementit
FeS	Eisensulfid
Ga	Gallium
H	Wasserstoff
He	Helium (altgriechisch hélios, deutsch 'Sonne')
IIW	International Institute of Welding
In	Indenium
kfz	kubisch-flächenzentriert
La	Lanthan
MAG	Metall-Aktivgasschweißen
Mg	Magnesium (von altgriechisch μαγνησία λίθος in der Bedeutung 'Magnetstein')
MIG	Metall-Inertgasschweißen
Mn	Mangan
MnS	Mangansulfid
Mo	Molybdän [moly'p' de:n] (von griech. mólybdos für Blei)
MSG	Metall-Schutzgasschweißen
MT	Magnetic particle testing / Magnetpulverprüfung
N	Stickstoff (lateinisch Nitrogenium)
Nb	Niob ['nio:p] (auch Niobium)
Nd	Neodym
Ni	Nickel
O	Sauerstoff (hist. auch Oxygenium, kurz Oxygen, altgriech. oxýs 'scharf, spitz, sauer' und -gen, zusammen 'Säureerzeuger, Säurebildner')
O ₂	molekularer Sauerstoff in Form eines kovalenten Homodimers
P	Phosphor (von altgriechisch phōsphóros, deutsch 'lichttragend')
PA	Position A / Wannelage

Pb	Blei (lat. plumbum)
PE	Position E / Überkopflage
PF	Position F / Steignaht
PT	Penetrant testing / Farbeindringprüfung
RT	Radiographic testing / Durchstrahlprüfung
S	Schwefel (über mittelhochdeutsch swēbel von althochdeutsch swēbal; lat. sulphur)
SAP	Schweißaufsichtspersonal
Se	Selen (ze'le:n, griech. selēnē, 'Mond')
Si	Silicium, auch Silizium
Te	Tellur [tʰɛ'lu:ɐ] (lat. tellus 'Erde')
Ti	Titan
UT	Ultrasonic testing / Ultraschallprüfung
V	Vanadium (historisch auch Vanadin)
VT	Visual testing / Sichtprüfung
W	Wolfram ['vɔlfram] , engl./russ. Tungsten
WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen
WSG	Wolfram-Schutzgasschweißen
Y	Yttrium ['ʏtʁiʊm]
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung
Zn	Zink
ZP	Zerstörende Prüfverfahren
Zr	Zirconium auch Zirkonium

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 - Lasertypen zur Metallbearbeitung und deren Wellenlängen [3]	5
Tab. 2 - Grenze zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzanalyse) [7]	12
Tab. 3 - Chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse für 1.0038 [8]	12
Tab. 4 - Chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse für 1.4301 [10]	14
Tab. 5 - Überblick über das Bezeichnungssystem von Aluminiumknetlegierungen [11] [12]	15
Tab. 6 - Chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse für 3.3535	16
Tab. 7 - Zerstörungsfreie Prüfverfahren [3]	22
Tab. 8 - Schweißnahtvorbereitung von Stahl [28]	31
Tab. 9 - Schweißnahtvorbereitung von Aluminium [29]	31
Tab. 10 - Bezeichnung des verwendeten Schweißzusatzes für 1.0038	37
Tab. 11 - Bezeichnung des verwendeten Schweißzusatzes für 1.4301	37
Tab. 12 - Bezeichnung des verwendeten Schweißzusatzes für 3.3535	38
Tab. 13 - Leistungsdichte bei unterschiedlicher Defokussierung	41
Tab. 14 - Verwendete Symbole in den Prüfberichten	45

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 - Grafische Darstellung der Einteilung der Schutzgasschweißprozesse [2]	3
Abb. 2 - Wärmeleitungsschweißen (li) und Tiefschweißen (re) [4]	6
Abb. 3 - Verfahren, Leistungsdichte und Einwirkzeit von Laser [3]	7
Abb. 4 - Möglichkeiten der Gasaufnahme bei Laserstrahlschweißen	10
Abb. 5 - Einteilung der Werkstoffe in Gruppen [6]	11
Abb. 6 - Schematische Struktur einer Schmelzschweißverbindung [13]	16
Abb. 7 - Ausmaß der WEZ einer Einlagenschweißung an einem unlegierten Stahl [1]	18
Abb. 8 - Vergleich der WEZ von Stahl und umwandlungsfreien Werkstoffen [14]	20
Abb. 9 - Aufbau einer Aluminiumschweißnaht [3]	21
Abb. 10 - Vier-Skalen-Lehre	23
Abb. 11 - Prüfprinzip, Geometrie des Eindringkörpers und Eindrucksgrößen [27]	27
Abb. 12 - Lage der Eindrücke - Einbrandtiefe $h \leq 4$ mm [27]	28
Abb. 13 - Lage von zusätzlichen Eindrücken in der WEZ bei härtbaren Metallen [27]	28
Abb. 14 - Prüfstück für eine Längsstumpfnah	30
Abb. 15 - Wurzelfehler an Aluminiumschweißnähten	31
Abb. 16 - Ausrichtung I der Laserstrahlschweißpistole	35
Abb. 17 - Roboterarm KR 6 R900-2	36
Abb. 18 - Positionierung der Werkstückproben	39
Abb. 19 - Formiergaskammer (Ausschnitt A aus Abb. 18)	39
Abb. 20 - Defokussierung des Laserstrahls (Anstellwinkel 0°)	40
Abb. 21 - Defokussierung des Laserstrahls (Anstellwinkel 20°)	41
Abb. 22 - Schnittkanten der Materialproben	42
Abb. 23 - Ausrichtung II der Laserstrahlschweißpistole	43
Abb. 24 - Aufnahme der Decklage für die VT-Prüfung (1.0038)	46
Abb. 25 - Aufnahme der Wurzellage für die VT-Prüfung (1.0038)	46
Abb. 26 - Aufnahme der Decklage für die PT-Prüfung (1.0038)	47
Abb. 27 - Aufnahme der Wurzellage für die PT-Prüfung (1.0038)	47
Abb. 28 - Aufnahme für die RT-Prüfung (1.0038)	48
Abb. 29 - Makroskopischer Schliff des Schweißgutes (1.0038)	48
Abb. 30 - Härteverlauf des Schweißguts (1.0038)	49
Abb. 31 - Aufnahme der Decklage für die VT-Prüfung (1.4301)	49
Abb. 32 - Aufnahme der Wurzellage für die VT-Prüfung (1.4301)	50
Abb. 33 - Aufnahme der Decklage für die PT-Prüfung (1.4301)	50
Abb. 34 - Aufnahme der Wurzellage für die PT-Prüfung (1.4301)	50
Abb. 35 - Aufnahme für die RT-Prüfung (1.4301)	51
Abb. 36 - Makroskopischer Schliff des Schweißgutes (1.4301)	51
Abb. 37 - Härteverlauf des Schweißguts (1.4301)	52
Abb. 38 - Aufnahme der Decklage für die VT-Prüfung (1.4301)	52
Abb. 39 - Aufnahme der Wurzellage für die VT-Prüfung (1.4301)	53
Abb. 40 - Aufnahme der Decklage für die PT-Prüfung (3.3535)	53
Abb. 41 - Aufnahme der Wurzellage für die PT-Prüfung (3.3535)	53
Abb. 42 - Aufnahme für die RT-Prüfung (3.3535)	54
Abb. 43 - Makroskopischer Schliff des Schweißgutes (3.3535)	54

Abb. 44 - Schnitt durch das Schweißgut entlang der Naht (3.3535)	55
Abb. 45 - Härteverlauf des Schweißguts (3.3535)	55
Abb. 46 - Ausschnitt der Schweißsituation mit 20° Anstellungswinkel (schleppend)	61
Abb. 47 - Ausschnitt der Schweißsituation mit 20° Anstellungswinkel (stechend)	62
Abb. 48 - Ausschnitt der Schweißsituation mit 20° Anstellungswinkel (stechend v.2)	63

1. Einleitung und Zielsetzung

Schweißen ist ein stoffschlüssiges Fügeverfahren, welches in unzähligen Bereichen angewendet wird. Es ermöglicht das Fertigen komplexer geometrischer Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften bei verhältnismäßig niedrigen Kosten. Bei der Fertigung im Schiff-, Flugzeug-, Eisenbahn- und Fahrzeugbau findet es, wie auch im Stahl- und Kesselbau, sowie unzähligen anderen Fertigungsbereichen, Anwendung. Dabei werden mit steigendem Grad der Mechanisierung, bis hin zur Automatisierung, die Taktzeiten der Fertigung immer kürzer. Firmen, die Schmelzschweißverfahren einsetzen, welche die Fertigungszeiten deutlich reduzieren, bietet sich die Möglichkeit der Etablierung in vielen Bereichen der Wirtschaft, besonders bei Anwendung von Verfahren, die den Einsatzbereich erweitern, so dass von sehr dünnen bis sehr dicken Werkstoffen geschweißt werden kann.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Qualifizierung typischer metallischer Konstruktionswerkstoffe für das Laserstrahlschweißen, welche mit einer teilautomatisierten Laserstrahlquelle unter Kaltdrahtzufuhr an einem Knickgelenkroboter durchgeführt wird. Der Fokus liegt dabei auf der Herstellung einer normgerechten Stumpfnah nach den Regeln der gültigen Prüfkriterien. Grundsätzlich verfügen die Werkstoffe 1.0038 (Baustahl S235JR) und 1.4301 (austenitischer Cr-Ni-Stahl) aus schweißtechnischer Sicht über gute bis sehr gute Eigenschaften. Die Aluminiumlegierung 3.3535 (AlMg3) hingegen hat, wie jede Aluminiumlegierung, ihre Eigenheiten, was das schweißtechnische Fügen angeht. Zum einen leitet Aluminium die Wärme sehr gut und zum anderen verfügt es über eine sehr resistente Oxidschicht, welche das Schmelzschweißen erschwert. Beim Laserstrahlschweißen wird das Einkoppeln des Strahls, im Vergleich zu den beiden Stählen, durch die im hohen Maße reflektierende Oberfläche erschwert. Dennoch wird diese Legierung, wie die beiden zuvor genannten Metalle, bei einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, da es sich um, für die jeweilige Werkstoffgruppe, Standardwerkstoffe mit einem sehr breiten Einsatzbereich handelt.

Diese Bachelorarbeit verfolgt das Ziel, die Prozesssicherheit des Laserstrahlschweißens mittels Handlaserpistole an Standardwerkstoffen der Industrie zu verifizieren. Durch eine geeignete Prozessauslegung soll ein im höchsten Maß reproduzierbares Schweißergebnis erzielt werden. Da das Laserstrahlschweißen allgemein als Sonderschweißverfahren unter den Schweißanwendungen zählt und in der Industrie generell Laserschweißanlagen an Robotern oder in statischen Aufbauten mit beweglicher Werkstückaufnahme verwendet werden, konnte für diese Arbeit keine Literatur gefunden werden, so dass vieles vom Metall- und Wolfram-Schutzgas-Schweißen und deren Richtlinien und Regelwerken hergeleitet werden musste.

Einleitend wird der Stand der Technik, neben dem MSG- und WSG-Verfahren, zum Laserstrahlschweißen aufgezeigt. Daraus werden die Zielsetzung der Arbeit, die Vorgehensweise bei den Versuchen und anzuwendenden Prüfungen abgeleitet. Maßstab der Bewertung des Prozesses sollen die geltenden Regelwerke (mit Einschränkungen) zur Schweißverfahrensprüfung sein.

2. Einführung in das Wissensgebiet

Die Bedeutung der Füge­technik in der Herstellung von Produkten nimmt stetig zu. Dabei muss zwischen zwei Effekten unterschieden werden: Zum einen handelt es sich um die Produktion von Gütern für die Füge­technik und zum anderen um die Produktion von Gütern mit der Füge­technik.

Die Gesamt-Wertschöpfung der Produktion und Dienstleistung für die Füge­technik belief sich 2007 in Europa auf 90,5 Milliarden € und wurde von 2,5 Millionen Beschäftigten generiert. Die Wertschöpfung in Europa belief sich für das gleiche Jahr auf 97 Milliarden € und beschäftigte mehr als 2,6 Millionen Menschen. Dabei kommt auf einen Mitarbeiter in der Herstellung von Füge­technik ein Beschäftigter in der Produktion von Zusatzgütern. Auf der Gegenseite kommen auf 2 Angestellte der Produktion 30 Beschäftigte, die sich mit der Anwendung befassen. [1]

Einsatz findet die Füge­technik in all ihren Variationen unter anderem in der Fahrzeug-, Luft-, und Raumfahrttechnik, dem Schiffs-, Metall- und Brückenbau, der Pharma- und Nahrungsmittelindustrie und der Elektrotechnik. Metallschweißen nimmt einen hohen Stellenwert innerhalb der Füge­technik ein, da es in nahezu allen Bereichen eingesetzt werden kann. Das Lichtbogenschmelzschweißen entwickelte sich, beginnend Ende des 18. Jahrhunderts, über 150 Jahre zu unterschiedlichen Verfahren, welche das Gasschweißen nach und nach ablösen. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelten sich unzählige neue Verfahren. Schweißen im festen Zustand, ohne oder mit geringer Wärmezufuhr, war ein neues Gebiet der Füge­technik. Eine Anderes nutzt hochfokussierte Energiequellen wie den Plasma-, Elektronen- oder Laserstrahl um den Wärmeeintrag beim Schweißen zu reduzieren, woraus sich weitere, auch kombinierte, Verfahren entwickelten. [1]

2.1 Metallschweißen

Schweißen ist ein Fügeprozess, bei dem zwei oder mehr Teile durch eine Kontinuität der Werkstoffe der zu verbindenden Teile unter Anwendung von Wärme und / oder Kraft mit / ohne Schweißzusatzwerkstoff verbunden werden. Geschweißte Verbindungen sind unlösbar. Die zu fügenden Teile werden lokal durch einen Energieträger erwärmt und vereinigen sich innerhalb der Schweißzone im flüssigen oder plastischen Zustand. Dieser lokale Wärmeeinfluss verursacht mit der einhergehenden, schnellen Abkühlung unterschiedliche Gefügestrukturen. Das Schweißen von Metallen lässt sich in die Hauptgruppen Pressschweißen und Schmelzschweißen unterteilen.

Zum Pressschweißen zählen alle Verfahren, die mechanischen Druck auf die Füge­stelle ausüben, wobei die notwendige Wärme extern, durch z. B. Flüssigkeiten, Gase, elektrische Entladungen und Strom, zugeführt werden kann.

2.2 Schmelzschweißen

Das Schmelzschweißen wird ohne Ausübung von Kräften durchgeführt und lässt sich nach den verwendeten Energieträgern unterteilen. Diese können, wie beim Pressschweißen, Flüssigkeiten, Gase, elektrische Entladungen und Strom sein. Zum Lichtbogenschweißen, als Untergruppe der elektrischen Gasentladung, zählt, neben den hier nicht weiter betrachteten Unterpulver- und Metalllichtbogenschweißen, Schutzgasschweißen. Darüber hinaus kann Schmelzschweißen mittels Strahlung in Form von Elektronen- und Laserstrahlschweißen durchgeführt werden, welches in der Regel durch sehr kostenintensive Maschinen automatisiert ausgeführt wird. [2]

2.3 Schutzgasschweißen

Schutzgasschweißen ist eine Untergruppe des Lichtbogenschweißens und hat die elektrische Gasentladung als Energieträger. Die Art der eingesetzten Elektrode sowie die Art des eingesetzten Schutzgases ermöglichen eine Einteilung der Verfahren, wie in Abb. 1 ersichtlich, in unterschiedliche Gruppen. Die Zahlen in den Klammern hinter den Prozessen geben die jeweiligen Prozessnummern an. [2]

Im weiteren Verlauf soll oberflächlich auf Metall-Inertgasschweißen (MIG) und Metall-Aktivgasschweißen (MAG) als Untergruppe des Metall-Schutzgasschweißens (MSG) sowie Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) als Untergruppe des Wolfram-Schutzgasschweißens (WSG) eingegangen werden, da diese Verfahren, wie das im späteren Versuch eingesetzte Laserstrahlschweißverfahren, von Hand ausgeführt werden können und einige Analogien bestehen.

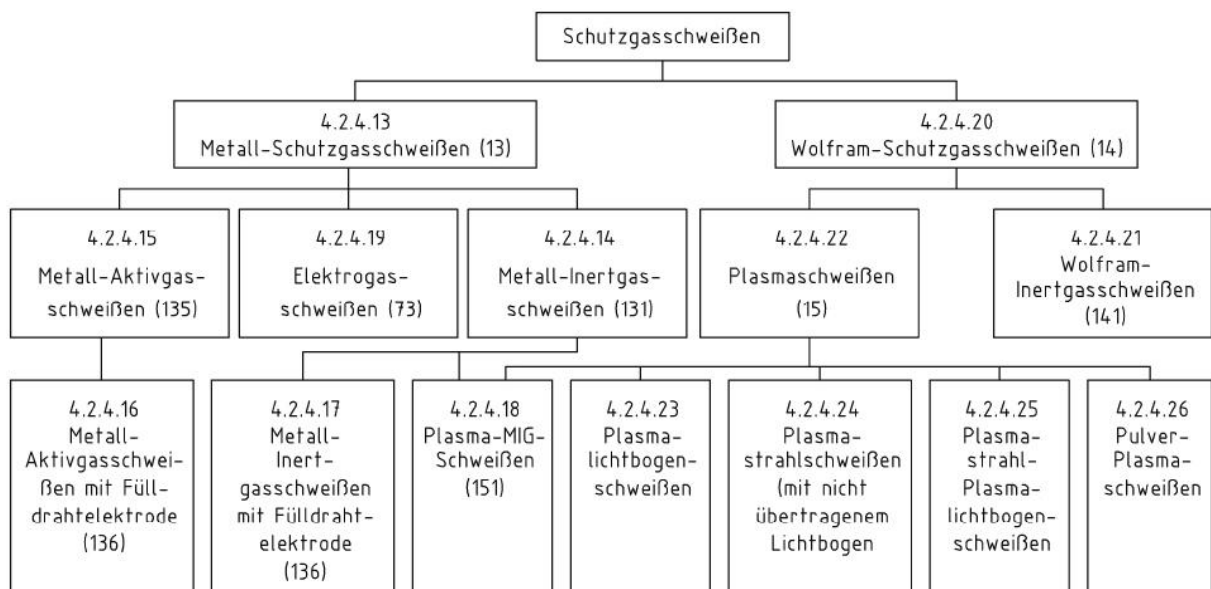


Abb. 1 - Grafische Darstellung der Einteilung der Schutzgasschweißprozesse [2]

2.3.1 MSG-Schweißen

Beim MSG-Schweißen werden abschmelzende Drahtelektroden als Schweißzusatzstoff eingesetzt. MIG- und MAG-Schweißen unterscheiden sich lediglich in der Verwendung des Schutzgases. Während beim MIG-Schweißen ein inertes Schutzgas zum Einsatz kommt, findet beim MAG-Schweißen ein Schutzgas mit aktivem Anteil Verwendung. Es können bei beiden Prozessen jeweils Massiv- oder Fülldrahtelektroden verwendet werden. Der Lichtbogen zum Schmelzen der Werkstoffe brennt konstant zwischen der Elektrode und dem Metall und wird, wie auch das Schmelzbad, durch die Art des Gases beeinflusst. Kennzeichen des MSG-Schweißen ist ein weiter Einstellbereich, woraus sich in Verbindung mit dem verwendeten Schutzgas verschiedene Formen des Tropfenübergangs von Elektrode zum Schmelzbad ergeben. Je nach Spannung und Drahtvorschub, die beiden Prozessparameter die beim MSG-Schweißen eingestellt werden, ergeben sich u. a. Kurzlicht-, Übergangs- und Langlichtlichtbogen. Diese Lichtbogenarten lassen sich in ihrem Bereich durch Modifizierung erweitern.

Die Schweißgeschwindigkeiten beim manuellen MAG-Schweißen liegen bei 0,3 – 0,5 m/min. Wird Roboterschweißen mit feststehendem Brenner angewendet, sind Geschwindigkeiten von 2,5 - 5 m/min möglich. [3]

2.3.2 WIG-Schweißen

Im Gegensatz zum MSG-Schweißen wird beim WIG-Schweißen eine nichtabschmelzende Wolframelektrode eingesetzt und der Zusatzwerkstoff muss, wenn erforderlich, getrennt von Hand oder automatisiert zugeführt werden. Wie auch beim MIG-Schweißen werden inerte Schutzgase ohne aktive oder reduzierende Anteile und Massiv- oder Füllschweißzusätze verwendet. Beim WIG-Schweißen ist, anders als beim MSG-Schweißen, eine Änderung der Polarität während des Schweißprozesses möglich. Dieses wird vorwiegend für die Leichtmetalle Aluminium (Al) und Magnesium (Mg) eingesetzt, da sie schwer schmelzbare Oxidschichten besitzen, welche durch Polaritätsumkehr entfernt werden. Da es eine geringe Abschmelzleistung besitzt, wird WIG-Schweißen immer dann eingesetzt, wenn die Qualität der Schweißverbindung oder die zu fügende Werkstückdicke kein anderes Verfahren zulässt. Darüber hinaus wird es für Wurzellagen eingesetzt, dessen Füll- und Decklagen mit MSG- oder anderen Schweißverfahren geschweißt werden.

Aufgrund der im Vergleich mit MSG-Schweißen geringen Abschmelzleistung sind die Einsatzmöglichkeiten begrenzt. Die vorteiligen Verfahrensmerkmale sind geringe Wärmeeinbringung, stabile Bogenentladung, getrennte Regelung von Abschmelzleistung (wegen der separaten Drahtzufuhr) und Wärmeeinbringung, sowie das Schweißen ohne Zusatzstoff. Dabei entstehen bei guter Nahtoberfläche keine Spritzer und es besteht während des Prozesses eine gute Spaltüberbrückbarkeit.

Die möglichen Schweißgeschwindigkeiten liegen bei 0,1 - 0,2 m/min in einem wirtschaftlich verschweißbaren Dickenebereich von 0,6 - 4 mm bei Aluminium, 0,4 bis 3 mm bei unlegiertem und 0,4 bis 4 mm bei legiertem Stahl. [4]

2.4 Laserstrahlschweißen

Bei einem Laser handelt es sich um einen Welle-Teilchen-Dualismus, der physikalisch aus Teilchen (Photonen = Lichtquanten) und Wellen gleichzeitig besteht. Photonen einer elektromagnetischen Welle entsprechen einer bestimmten Menge an Energie, woraus die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie erfolgt.

Der Grundmechanismus eines jeden Lasers ist die Energiezufuhr von außen, durch die atomare Systeme in höher angeregte Zustände überführt werden. Bei dessen Rückfall auf energetisch niedrigere Niveaus werden elektromagnetische Strahlungen ausgesendet. Jeder Lasertyp hat, abhängig vom Lasermedium, nur eine Wellenlänge (λ) und kann aufgrund seiner Leistung für spezielle Bearbeitungen eingesetzt werden (siehe Tab. 1).

Im Gegensatz zu einer Glühlampe mit polychromatischem Licht (unterschiedliche Wellenlänge), dessen Wellenzüge nicht phasengleich und diffus sind, ist Laserlicht monochromatisch (eine Wellenlänge), kohärent (Wellenzüge in gleicher Phase) und parallel (schwingen in einer Ebene), weshalb es sich exakt fokussieren lässt und somit eine Energiedichte $I > 10^6 \text{ W/cm}^2$ ermöglicht. [3]

Wirkt auf ein angeregtes atomares System ein äußeres Strahlungsfeld, führt dies zu einer induzierten Emission, welche kohärente Strahlung erzeugt. Ein weiteres Grundelement ist die Pumpe, welche dem aktiven Medium die Anregungsenergie zuführt. Es werden, je nach aktivem Medium, unterschiedliche Anregungsmechanismen benötigt. Das dritte grundlegende Element bildet der Resonator. Zur Erhöhung des Strahlungsfeldes durch Rückkopplung wird das aktive Medium zwischen zwei Spiegeln angeordnet. Einer der Spiegel ist vollständig reflektierend, während der andere teildurchlässig ist. Der Grad der Durchlässigkeit ist von der Art des Lasers abhängig. Darüber hinaus wird die spektrale Verteilung durch den Resonator eingeeengt, wodurch es zur Ausbildung von Eigenschwingungen kommt, welche die Laserstrahleigenschaften charakterisieren. [5]

Lasertyp	Aktives Medium	Zusammensetzung aktives Medium	λ [µm]	Typische Anwendung
Festkörperlaser	Kristalle oder dotierte Gläser	Nd:YAG (Neodym: Yttrium-Aluminium-Granulat)	1,064	schweißen von Metallen, Schneiden, Löten, Beschriften, Bohren, Abtragen
Gaslaser	Gase oder Gasgemische	CO ₂	10,6	Schweißen / Schneiden von Metallen, Härten, Beschriften
Diodenlaser	Halbleiter	GaNP (Gallium-Indenium-Phosphid) GaAs (Galliumarsenid)	0,68 0,78- 0,98	Löten, Härten, Wärmeleitungsschweißen

Tab. 1 - Lasertypen zur Metallbearbeitung und deren Wellenlängen [3]

Überwiegend werden für die Materialbearbeitung (insbesondere Schweißen) CO₂-, Neodym (Nd):Yttrium-Aluminium-Granulat (YAG)- und Diodenlaser eingesetzt, da sie die erforderliche Leistung im Dauerbetrieb erbringen können. Industrielle Standartwerte sind, je nach aktivem Lasermedium zur Strahlungserzeugung, Leistungen von 2-15 kW.

In Abhängigkeit des Werkstoffes und dessen Oberflächenbeschaffenheit wird ein Großteil des Laserlichtes reflektiert. Bei Stahlwerkstoffen können bis zu 95 % der Energie reflektiert werden. Ein weiterer Teil des Laserstrahls wird, in Abhängig seiner Wellenlänge und ebenfalls abhängig vom Werkstoff, im Werkstück absorbiert und in Wärme umgewandelt, so dass dieser für die Bearbeitung (Aufschmelzen des Werkstoffes) genutzt werden kann. Beim Wärmeleitungsschweißen, mit einer Leistungsdichte $I > 10^5 \text{ W/cm}^2$, wird nur die Werkstückoberfläche mit geringer Tiefenwirkung aufgeschmolzen. Steigt die Intensität des Laserstrahls, so kann die Wärme nicht schnell genug ins Werkstück geleitet werden. Dies führt dazu, dass ein Teil des Materials verdampft, wodurch die Einschweißtiefe steigt. Die Dampfkapillare, welche durch den Metaldampf entsteht, ist von Metallschmelze umgeben und bewegt sich mit dem Laserstrahl, hinter dem das aufgeschmolzene Material zur Naht erstarrt. Oberhalb der kritischen Leistungsdichte $I > 10^6 \text{ W/cm}^2$ (Materialabhängig) wird mit dem Bilden eines laserinduzierten Plasmas ein Tiefschweißeffekt herbeigeführt. In Abb. 2 ist einen Vergleich beider Arten im Querschnitt dargestellt.

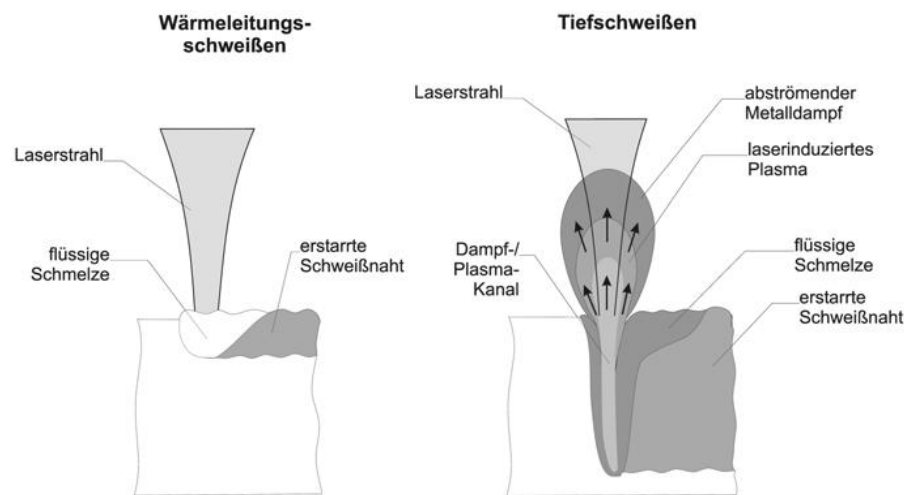


Abb. 2 - Wärmeleitungsschweißen (li) und Tiefschweißen (re) [4]

Anhand der Gleichung 2.1 lässt sich die Leistungsdichte des Laserstrahls berechnen.

$$I = \frac{P \cdot \eta_{\text{elektr.-opt.}}}{A_w} \quad (2.1)$$

Durch Umstellen nach Gleichung 2.2 ist es möglich die notwendige Leistung zum Erreichen des Tiefschweißeffekts bei bekannter wirksamer Fläche auf der Materialoberfläche zu berechnen.

$$P = \frac{I \cdot A_{\text{Laser}}}{\eta_{\text{elektr.-opt.}}} \quad (2.2)$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes bestimmt den Übergang vom Wärmeleitungsschweißen zum Tiefschweißeffekt. Der entstehende Metaldampf wirkt sich, auf Grund seiner Teilchen, negativ auf den Laserstrahl aus, weshalb er zwingend abgesaugt oder weggeblasen werden muss. [3]

Werden beim Laserstrahlschweißen Aktivgase (z. B. CO_2) als Prozessgase eingesetzt, kann bei hochreflektierenden Metallen, wie z. B. Aluminium, bei geringer Strahlungsintensität der Tiefschweißeffekt eingeleitet werden. Um ein optimales Schweißergebnis zu erzielen, sollte der Aktivanteil in Abhängigkeit der Wellenlänge und Energiedichte so bemessen werden, dass der Tiefschweißeffekt stabil erreicht, die Oxidation hingegen auf ein Minimum begrenzt wird. [5]

In Abhängigkeit der Leistungsdichte und der Einwirkzeit lassen sich mittels einer Laserquelle unterschiedliche Verfahren durchführen (Abb. 3)

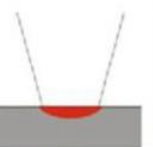
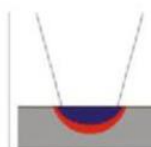
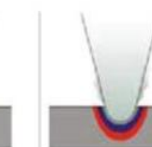
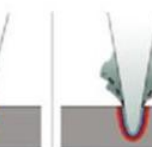
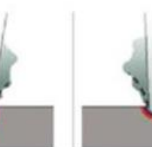
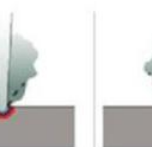
Grafik						
Verfahrensbeispiele	Härten, Löten	Wärmeleitungsschweißen	Tiefschweißen, Schneiden	Bohren	Abtragen, Gravieren	Strukturieren
Hauptwirkung	Erwärmen	Schmelzen	Schmelzen und Verdampfen	Verdampfen	Verdampfen und Ionisieren	Sublimieren
Leistungsdichte ab	30 W/mm ²	1 kW/mm ²	10 kW/mm ²	1 MW/mm ²	10 MW/mm ²	10 GW/mm ²
Einwirkzeit	Sekunden	Millisekunden	Millisekunden	Millisekunden	Nanosekunden	Pikosekunden

Abb. 3 - Verfahren, Leistungsdichte und Einwirkzeit von Laser [3]

2.4.1 Vorteile

Um schnell und somit wirtschaftlich schweißen zu können, werden Verfahren mit möglichst hoher Leistungsdichte benötigt, welche die Schmelztemperatur (T_m) des Werkstoffes innerhalb kürzester Zeit erreichen. Die Ausdehnung der Wärmeeinflusszone (WEZ) ist gering, da T_m erreicht wird bevor die Energie ins Werkstück geleitet und somit ein großes Werkstückvolumen aufgeheizt wird. Das aufgeheizte Volumen ist, in Bezug auf den Verzug, eine wichtige Größe. Allgemein führt ein kleines aufgeheiztes Volumen zu wenig Verzug.

Bei zu großer Leistungsdichte verdampft das Material statt zu schmelzen. Im Gegenzug fließt die Wärme zu schnell ins Werkstück und erreicht keine Aufschmelzung, wenn die Leistungsdichte zu gering ist.

Die höchste Leistungsdichte bietet das Elektronenstrahlschweißen, edoch bedingt dieses Verfahren eine Vakuumkammer. Direkt danach folgt das Laserstrahlschweißen, welches, je nach Energiedichte, zwei unterschiedliche Arten des Schweißens bietet [vgl. 2.4].

Somit ist die Leistungsdichte ein entscheidendes Kriterium der Schweißverfahren, welche die Schweißgeschwindigkeit, die Ausdehnung der WEZ und den Verzug bestimmt. [6]

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, fertig bearbeitete Bauteile und Kunststoffe schweißen zu können. Da der Laser kontaktfrei arbeitet und Zusatz nicht zwingend notwendig ist, kann an schwer zugänglichen Stellen geschweißt werden. Ebenfalls kann der Laser in vielen Bereichen der Metallbearbeitung (Härten, Löten, Bohren, Schneiden, Abtragen, ...) eingesetzt werden, wodurch er ein deutlich größeres Anwendungsspektrum hat, als beispielsweise MSG- oder WSG-Verfahren.

2.4.2 Nachteile

Aufgrund der hohen Reflexion (bis zu 95%) der Laserstrahlen an Metallen liegt der Wirkungsgrad der Laser meist unter 20%. Hinzu kommt die aufwändige Nahtvorbereitung um Bauteile spalt- und somit schweißzusatzfrei fügen zu können und die Notwendigkeit der exakten Positionierung, da der Durchmesser des Laserstrahls wenige zehntel Millimeter beträgt. Um die Nahtvorbereitung zu reduzieren, kann mit Zusatz geschweißt werden, wodurch sich allerdings das erhitzte Volumen vergrößert und mehr Wärme ins Material gebracht wird. Metallurgisch betrachtet führt die geringe Wärmeeinbringung und die damit verbundene hohe Abkühlgeschwindigkeit bei Stählen zu deutlich höheren Härtewerten (> 400 HV), sofern der Grundwerkstoff dick genug ist, um eine Selbstabschreckung zu ermöglichen. Die schnelle Abkühlgeschwindigkeit sorgt ebenfalls für schlechte Entgasungsmöglichkeiten der Schmelze, was Poren begünstigt. Auch zu langsames Schweißen kann zu Poren führen, wenn über die Wurzel Gase aufgenommen werden können. [4]

Ein weiterer, schwerwiegender Nachteil ist der notwendige Schutz vor Laserstrahlung, welcher deutlich kostenintensiver als der UV-Schutz beim MSG- und WSG-Schweißen ist. Ab der Klasse 3R (alt IIIa / 3a) ist, zusätzlich zum Schweißaufsichtspersonal (SAP), ein Laserschutzbeauftragter notwendig. [5]

2.4.3 Besonderheiten

Eine Besonderheit des Laserstrahlschweißens stellt die Modifikation des Laserstrahls dar. Während der Lichtbogen beim Schutzgasschweißen durch die Wahl des Schutzgases beeinflusst werden kann, lässt sich der Laserstrahl in seiner Frequenz (f) regeln und in seiner Leistung takten. Die Frequenz gibt an, wie viele Laserpulse pro Sekunde die Laserquelle verlassen, Takten ermöglicht einen Wechsel zwischen heizen und abkühlen in Sekundenbruchteilen. Darüber hinaus lässt sich durch Bewegen des Spiegels der Arbeitsmodus beeinflussen. Bei handgeführten Schmelzschweißverfahren liegt es an der Handfertigkeit des Bedieners, wie der Lichtbogen geführt wird. Dieses kann z. B. eine Pendel- oder kontinuierliche Dreiecksbewegung, überlagert von einer linearen Bewegung bei steigenden Nähten sein. Beim Laserstrahlschweißen wird der Laserstrahl durch Spiegel ausgelenkt, während das Gerät linear bewegt wird. Zusätzlich ist es möglich die Geschwindigkeit der Auslenkungen und die Spurbreite zu beeinflussen, was wiederum Einfluss auf die Schweißgeschwindigkeit und die Nahtgeometrie hat. Somit sind, auch im Handbetrieb, komplexere Schweißnähte bei einfacher Handhabung zu realisieren, wobei lediglich auf konstante Fortbewegung geachtet werden muss.

2.5 Schutzgase

Zum Schutz der Schweißstelle vor der Oxidationswirkung der Atmosphäre wird bei vielen Prozessen des Schmelzschweißens ein Gas zugeführt.

Alle Edelgase sind aufgrund ihrer gesättigten Elektronenschalen inaktiv und gehen keine unerwünschten Reaktionen mit den zu verschweißenden Metallen ein. Aus Kostengründen werden lediglich Argon (Ar) und Helium (He) eingesetzt. Ar ist zu 0,9 % in der Atmosphäre enthalten und wird aus verflüssigter Luft bei dessen Zerlegung gewonnen. Helium muss in Europa, z. B. aus den USA, importiert werden, wo es im Erdgas vorkommt. Der geringen Dichte wegen (leichter als Luft) ist beim Schweißen eine größere Durchflussmenge als vom Argon notwendig, weshalb der Einsatz sehr kostenintensiv ist.

Aktivgase begünstigen dagegen die chemischen Reaktionen an der Schweißstelle, deren Auswirkungen sowohl positiv als auch negativ sein können. Kohlendioxid (CO_2) wird in wenigen Anwendungsfällen als reines Aktivgas eingesetzt. Es kommt, neben Sauerstoff (O), als aktiver Anteil in Mischgasen zum Einsatz. [4]

Neben dem Schutz des Schweißguts haben die Schutzgase Einfluss auf den Zündvorgang, den Lichtbogen, den Werkstoffübergang, das Nahtaussehen, den Einbrand, die Löslichkeit der Gase in der Schmelze (mgl. klein), der Schlackebildung (mgl. gering), u. v. m.

Sie sollen die mechanisch-technologischen Güterwerte der Werkstoffe nicht verschlechtern und die Korrosionsbeständigkeit nichtrostender Stähle erhalten. [3]

Beim Laserstrahlschweißen dient das Prozessgas (Schutzgas mit prozessbeeinflussenden Eigenschaften) neben der Schutzfunktion, der Energieeinkopplung der Laserstrahlung durch Beeinflussung des Plasmas. Durch Rekombination von Elektronen und Ionen wird die Elektronendichte im Plasma reduziert. Die Rekombinationsrate im Plasma kann durch leichte Gase mit hoher Ionisierungsenergie, wie z. B. Helium, gesteigert werden, wodurch die Abschirmung der Laserstrahlung reduziert wird. Bei sehr hohen Streckenenergien treten sehr hohe Plasmadichten und Verdampfungsraten auf, welche zwingend Prozessgase benötigen, um einen stabilen Schweißprozess zu erzielen. [5]

Gase werden auf der Seite des Wärmeeintrages als Schutzgas und, wenn nötig, als Formiergas auf der Gegenseite zum Schutz der sich ausbildenden Wurzel eingesetzt, wobei es sich um ein und dasselbe Gas handeln kann.

Bei falscher Schutzgasführung kann es während des Schweißens zur Injektorwirkung kommen, so dass Luft durch den Massenstrom des Gases mitgerissen wird und zur Schweißstelle gelangt. Ebenfalls kann es durch anhaftende Spritzer in der Schutzgasdüse, durch die Wärme der Schweißraupe und durch zu große / zu kleine Schutzgasmenge zur Verwirbelung des Gases kommen (vgl. Abb. 4). Die Folge kann eine ungenügende Schutzgasglocke sein, woraus wiederum Poren in der Schweißnaht resultieren.

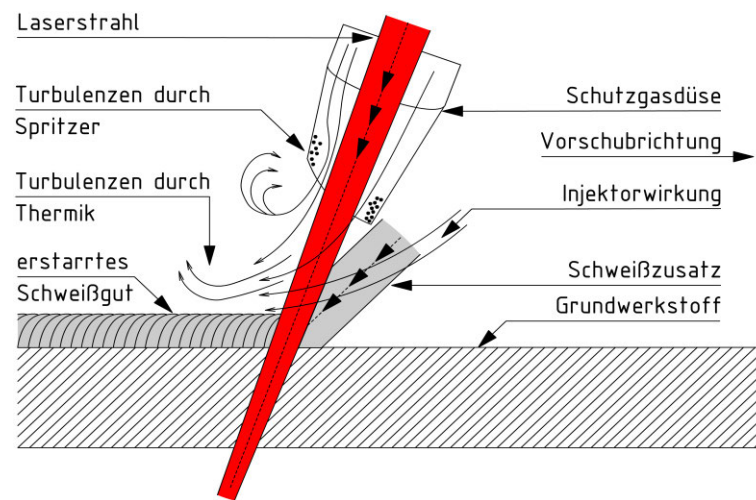


Abb. 4 - Möglichkeiten der Gasaufnahme bei Laserstrahlschweißen

3. Grundlegendes zu Metallen und deren Legierungen

Werkstoffe lassen sich schematisch nach stofflicher Zusammensetzung und kristallinem Aufbau in Werkstoffgruppen unterteilen. Die Abb. 5 zeigt eine solche Einteilung der Werkstoffe.

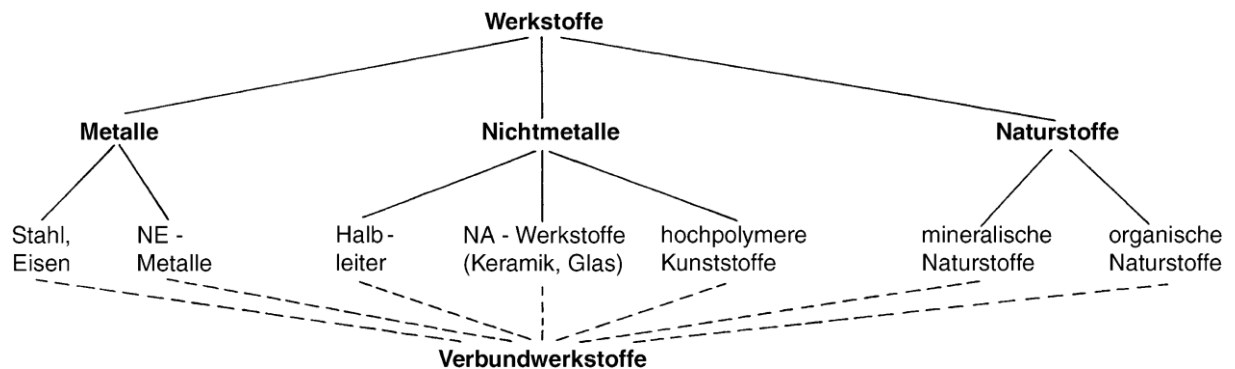


Abb. 5 - Einteilung der Werkstoffe in Gruppen [6]

Die Schweißignung des Werkstoffs wird durch seine chemische Zusammensetzung wie auch von seinen metallurgischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt.

3.1 Allgemeine Baustähle

Als Stahl werden Eisen(Fe)-Kohlenstoff(C)-Legierungen mit maximal 2,06 % C bezeichnet, darüber hinaus als Gusseisenwerkstoffe. Diese Stähle können nach unterschiedlichen Klassifizierungen, wie z. B. mechanische bzw. physikalische Eigenschaften, chemische Zusammensetzung oder deren Anwendungszweck eingeteilt werden. Im Folgenden werden Baustähle als unlegierte Qualitätsstähle behandelt. [7]

Für diese bestehen im Allgemeinen festgelegte Anforderungen, wie z.B. an die Zähigkeit, Korngröße und / oder Umformbarkeit. Unter allen Stahlsorten entfällt auf die allgemeinen Baustähle die größte Erzeugnismenge. Die einzelnen Werkstoffe dieser Gruppe unterscheiden sich hauptsächlich durch ihren unterschiedlichen C-Gehalt. [6]

3.1.1 Eigenschaften

Allgemeine Baustähle sind generell unlegiert und nicht für die Wärmebehandlung vorgesehen. Erzeugnisse werden in der Regel im normalgeglühten Zustand mit ferritisch-perlitischem Gefüge ausgeliefert. Ein steigender C-Anteil führt zu einer Zunahme der Perlitmenge. Die Perlitkörner haben einen hohen Widerstand gegen plastische Verformung, da sich Versetzungen an den Lamellengrenzen aufstauen, was zu einer Festigkeitszunahme führt. Baustähle finden Verwendung im Anlagen-, Fahrzeug-, Maschinen- und Stahlbau sowie in der Produktion von Bauteilen für den allgemeinen Maschinenbau, sofern höhere Anforderungen nicht zum Einsatz spezieller Materialien zwingen. [6]

Die Mindeststreckgrenze (R_{eH}) liegt zwischen 195 - 450 MPa und die Mindestzugfestigkeit (R_m) liegt zwischen 350 - 750 MPa. Beide Werte werden jedoch nur von Dicken < 100 mm erreicht und nehmen mit zunehmender Werkstückdicke weiter ab. [8]

3.1.2 Chemische Zusammensetzung

Unlegierte Stähle sind Stahlsorten bei denen, nach der Definition, der Gehalt nach Tab. 2, keiner der Grenzwerte erreicht wird. Überschreitet ein Element den Grenzwert zählt der Stahl zu den niedrig legierten Stählen.

Während der Erstarrung reichert sich Phosphor (P) in der Restschmelze an und verdrängt bei der γ - α -Umwandlung den Kohlenstoff, weshalb sich Ferritzeilen in C-armen und P-Zeilen in C-reichen Gebieten bilden in dessen Folge sich die Zähigkeit herabsetzt bzw. die Anlasssprödigkeit gefördert wird.

Schwefel als Stahlbegleiter bildet an Korngrenzen spröde Sulfide, wie z.B. Eisensulfid (FeS). Diese schmelzen bei Temperaturen $> 1200^{\circ}\text{C}$, so dass es zu Heißrissen kommen kann, weshalb der Schwefelgehalt begrenzt oder über Mn zu Mangansulfid (MnS) abgebunden wird.

Durch Hemmung der Versetzungsbewegung fördert Stickstoff (N) die Alterung, was besonders bei kaltverformten (versetzungsreichen) Stählen bei Temperaturen um 300°C als Blausprödigkeit in Erscheinung tritt, weshalb er im Allgemeinen mit Al abgebunden wird. [9]

Festgelegtes Element	Grenzwert Masseanteil in %	Festgelegtes Element	Grenzwert Masseanteil in %
Al	0,30	B	0,0008
Bi	0,10	Co	0,30
Cr	0,30	Cu	0,40
La	0,10	Mn	1,65
Mo	0,08	Nb	0,06
Ni	0,30	Pb	0,40
Se	0,10	Si	0,60
Te	0,10	Ti	0,05
V	0,10	W	0,30
Zr	0,50	Sonstige (außer C, P, S, N)	0,10

Tab. 2 - Grenze zwischen unlegierten und legierten Stählen (Schmelzanalyse) [7]

3.1.3 Technische Lieferbedingung 1.0038 - S235JR [8]

Aus dem Kurznamen S235JR (siehe Tab. 3) geht hervor, dass es sich um einen allgemeinen Baustahl (S) mit einer Mindeststreckgrenze von 235 N/mm^2 handelt. JR steht für die Gütegruppe, in diesem Falle eine Mindestkerbschlagbiegearbeit von 27 Joule (J) bei Raumtemperatur (R).

Bezeichnung		Desoxidationsart	C in % max. für Erzeugnisenndicken in mm			Si % max.	Mn % max.	P % max.	S % max.	N % max.	Cu % max.	Sonstige % max.
			≤ 16	$> 16 \leq 40$	> 40							
Kurzname	Werkstoffnummer											
S235JR	1.0038	FN	0,17	0,17	0,20	-	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55	-

Tab. 3 - Chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse für 1.0038 [8]

Die Desoxidationsart FN gibt an, dass der Stahl einfach beruhigt vergossen wurde, was bedeutet, dass er weniger Restsauerstoff enthält. Erreicht wird dies durch das Hinzufügen von Si oder Al zum flüssigen Stahl, welches mit dem vorhandenen Sauerstoff reagiert und verschlackt. Wird der Schmelze Si und Al hinzugefügt, spricht man von doppelt beruhigt [6]

3.2 Austenitische Stähle

Nichtrostende Stähle sind nach EN 10020 in ihrer chemischen Zusammensetzung mit mind. 10,5 % Cr-Massenanteil und maximal 1,2 % C definiert und werden weiterhin nach dem Ni-Gehalt ($< 2,5 \%$ oder $\geq 2,5 \%$) und ihren Haupteigenschaften in korrosionsbeständig, hitzebeständig und warmfest unterteilt. Austenitische Stähle werden im Folgenden als Untergruppe der nichtrostenden Stähle nach EN 10088-1 behandelt. Weitere Untergruppen sind, nach deren vorherrschenden Hauptgefügebestandteil bei Raumtemperatur (R_T) unterteilt, austenitisch-ferritisch, martensitische und ferritische nichtrostende Stähle und deren Abwandlungen.

Die austenitischen CrNi-Stähle haben unter den nichtrostenden Stählen die größte Bedeutung, da sie eine gute Kombination aus mechanischen Eigenschaften, Schweißignung und besonderer Beständigkeit gegen Korrosion durch wässrige Lösungen aufweisen. Haupteinsatzgebiete sind Großanlagen der chemischen Industrie, der Lebensmittel- und Meerestechnik, Medizintechnik und Anwendungen im Außenbereich. [3]

3.2.1 Eigenschaften

Auf der Oberfläche entsteht durch den hohen Cr-Gehalt eine passivierend wirkende Chromoxidschicht, dessen chemische Beständigkeit mit zunehmendem Anteil erhöht wird. Da zur Bildung dieser Passivierungsschicht freies, ungebundenes Cr notwendig ist, werden diese Werkstoffe üblicherweise im lösungsgeglühten und abgeschreckten Zustand ausgeliefert.

Austenite bieten eine ausgezeichnete Zähigkeit und Duktilität über einen sehr weiten Temperaturbereich bis hin zu tiefen Temperaturen von bis zu $-270 \text{ }^\circ\text{C}$, das heißt, bei tiefsten Temperaturen besitzen sie hohe Kerbschlagarbeitswerte. Desweiteren sind austenitische Stähle wegen ihrer kfz-Kristallstruktur nicht härtbar, da eine Gefügeumwandlung fehlt, gut Kaltverformbar mit einhergehender Kaltverfestigung und haben in der Regel eine niedrige Streckgrenze, hohe Zugfestigkeit und entsprechend hohe Bruchdehnungen. Mit entsprechenden Legierungselementen lassen sich Werkstoffe für Beanspruchungen bei sehr hohen Temperaturen $\geq 500 \text{ }^\circ\text{C}$ realisieren, da die Elemente in der kfz-Struktur des Austenits deutlich geringere Diffusionskoeffizienten haben. [6]

3.2.2 Chemische Zusammensetzung

Wie eingangs erwähnt sind nichtrostende Stähle in ihrer chemischen Zusammensetzung definiert und weisen mind. 10,5 % Cr-Massenanteil und maximal 1,2 % C auf, wobei Cr ein Hauptlegierungselement von austenitischen Stählen darstellt. Unter extremen Bedingungen, wie der Einwirkung von Säuren oder chloridhaltigen Medien wie Seewasser, kann die natürliche Oxidschicht destabilisiert werden. Um dieser Destabilisierung entgegenzuwirken kann der Chromanteil erhöht werden, so dass Legierungen typischer Weise zwischen 14 % - 28 % Cr enthalten. Das zweite Hauptlegierungselement ist Ni mit einem Anteil von 3 % - 35 %, welches den Austenit stabilisiert und ein Herabsenken des Austenitgebiets in dessen Zustandsdiagramm bewirkt, so dass bei Abkühlung eine Umwandlung des Austenits in Ferrit bzw. Perlit verhindert wird.

Die Ausscheidung von Chromcarbiden nach einer Wärmebehandlung und / oder einem Schweißprozess wird mittels Stabilisierung durch Zugabe von Titan (Ti), Niob (Nb) und Zirkonium verhindert. Schwefel (S) als Begleitelement wirkt sich nachteilig auf die Zähigkeit aus und reduziert die Korrosionsbeständigkeit. Mangan (Mn) wird als Austenit-Bildner hinzugegeben und erhöht die Löslichkeit von Stickstoff (N), welcher ein starker Austenit-Bildner ist und Festigkeit und Beständigkeit gegen Lochfraßkorrosion steigert. [10]

3.2.3 Technische Lieferbedingung 1.4301 - X5CrNi18-10 [10]

Aus dem Kurznamen X5CrNi18-10 (siehe Tab. 4) geht hervor, dass es sich um einen hochlegierten Stahl (X) handelt, da der Massegehalt von mind. einem Legierungselement > 5% ist, welcher ungefähr 0,05% C enthält. Enthalten sind die Legierungselemente Cr und Ni mit 18 % bzw. 10 %.

Stahlbezeichnung		Massenanteil in %										
Kurzname	Werkstoffnummer	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N	Cu	Sonstige
X5CrNi18-10	1.4301	0,07	1,00	2,00	0,045	0,015	17,5-19,5	-	8,0-10,5	0,10	-	-

Tab. 4 - Chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse für 1.4301 [10]

3.3 Aluminiumlegierungen

Aluminiumwerkstoffe sind Aluminiumbasislegierungen, denen bestimmte Legierungselemente beigefügt werden um ihre mechanischen bzw. physikalischen Eigenschaften zu beeinflussen. Es wird zwischen Knet- und Gusslegierungen unterschieden.

Die meisten Aluminiumwerkstoffe sind gut bis sehr gut schweißbar, wobei einige Legierungen mit Cu-Anteil nur bedingt bis ausreichend schweißbar sind. Unter anderem hängt die Schweißbarkeit von der chemischen Zusammensetzung, dem Lieferzustand und dem verwendeten Schweißzusatz und dessen chemischer Zusammensetzung ab.

3.3.1 Eigenschaften

Wegen seiner geringen Dichte gehört Aluminium zu den Leichtmetallen. Es ist in seiner reinen Form weich, hat eine geringe Festigkeit und eine hohe chemische Beständigkeit, da es, wie austenitische korrosionsbeständige Stähle, eine Oxidschicht bildet. Aluminiumwerkstoffe werden im Flugzeug-, und Fahrzeugbau, Behälter- und Apparatebau, in der Elektroindustrie und vielen anderen Industriezweigen eingesetzt. [3]

3.3.2 Chemische Zusammensetzung

Werden Reinaluminium Elemente wie Mn, Cu, Magnesium (Mg) und Zink (Zn) als Legierungselemente zugesetzt, verbessern sich Verarbeitbarkeit und mechanische Werte.

Si verringert den Schmelzpunkt und verbessert den Metallfluss wohingegen Mn, wie auch Mg, die Aushärtung beschleunigt und die Festigkeit steigert. Kupfer als Legierungselement steigert ebenfalls die Festigkeit, reduziert hingegen aber die Korrosionsbeständigkeit und die Schweißbarkeit. Mit Zn lassen sich die höchsten Festigkeiten einer Al-Legierung erzielen.

Knetlegierungen werden nach ihrem Hauptlegierungselement in die Gruppen 1xxx - 8xxx unterteilt. Tab. 5 zeigt einen Überblick über das Bezeichnungssystem der Knetlegierungen nach EN 573-3 und EN 573-4.

Gruppe	Hauptlegierungselement	Härtbarkeit	Bemerkung
1xxx	mind. 99 % Al	nicht aushärtbar	schweißbar sehr korrosionsbeständig
2xxx	Cu	aushärtbar	meist schwer / nicht schweißbar korrosionsanfällig hohe Festigkeit
3xxx	Mn	nicht aushärtbar	sehr gut schweißbar hohe Korrosionsbeständigkeit, geringe Festigkeit
4xxx	Si	beides	sehr gut schweißbar
5xxx	Mg (ohne Si)	nicht aushärtbar	schweißbar mittlere / hohe Festigkeit
6xxx	Mg & Si	aushärtbar	schweißbar nicht ohne Zusatz schweißen
7xxx	Zn	aushärtbar	schlecht schweißbar hohe/ sehr hohe Festigkeit manche Legierungen nicht mit Lichtbogen schweißbar
8xxx	andere Elemente	beides	

Tab. 5 - Überblick über das Bezeichnungssystem von Aluminiumknetlegierungen [11] [12]

3.3.3 Technische Lieferbedingung 3.3535 - AlMg3 - AW 5754 [11]

Aus der Bezeichnung EN AW AlMg3 (siehe Tab. 6) geht hervor, dass es sich nach der Euronorm (EN) um eine Aluminium-(A)-Knetlegierung(W) handelt. Hauptlegierungselement ist ca. 3% Mg, weshalb sie zur fünften Gruppe gehört und damit nicht aushärtbar ist.

Bezeichnung der Legierung		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Bemerkungen	Andere		Alumi- nium min.
Numerisch	Chemische Symbole													Ein- zeln	Insge- samt	
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	0,40	0,40	0,10	0,50	2,6-3,6	0,30	-	0,20	0,15	-	-	0,10-0,6 Mn + Cr	0,05	0,15	Rest

Tab. 6 - Chemische Zusammensetzung nach der Schmelzanalyse für 3.3535

3.4 Eigenschaften der Werkstoffe beim Schweißen

Die Energiedichte der Wärmequelle (vom Schweißprozess und dessen Parametern bestimmt) und die Wärmeleitung des Bauteils (beeinflusst durch Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der zu schweißenden Materialien, Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils sowie Schweißzonen- und Umgebungstemperatur) haben Einfluss auf die Größe und Geschwindigkeit, mit der sich Temperaturfelder ausdehnen. Diese beim Schweißen auftretenden örtlich und zeitlich veränderlichen Temperaturfelder sind die Hauptursache für:

- Entstehung von dreiachsigen Eigenspannungssystemen in den thermisch gefügten Bauteilen, deren negativen Auswirkungen Risse oder Versprödungseffekte bei Schrumpfungsbehinderung dickwandiger Bauteile
- Verzug (Längs-, Quer- und Winkelschrumpfung sowie Verwerfung)
- gravierende Gefügeänderung in der WEZ neben dem Schweißgut mit Einfluss auf die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften (unabhängig von der Blechdicke)

In Abb. 6 sind die unterschiedlichen Zonen einer Schweißverbindung, bestehend aus Grundwerkstoff, WEZ und Schweißgut, dargestellt, in denen, abhängig vom jeweiligen Grundwerkstoff, unterschiedliche Gefügeänderungen während des Schweißens und des darauffolgenden Abkühlens auftreten.

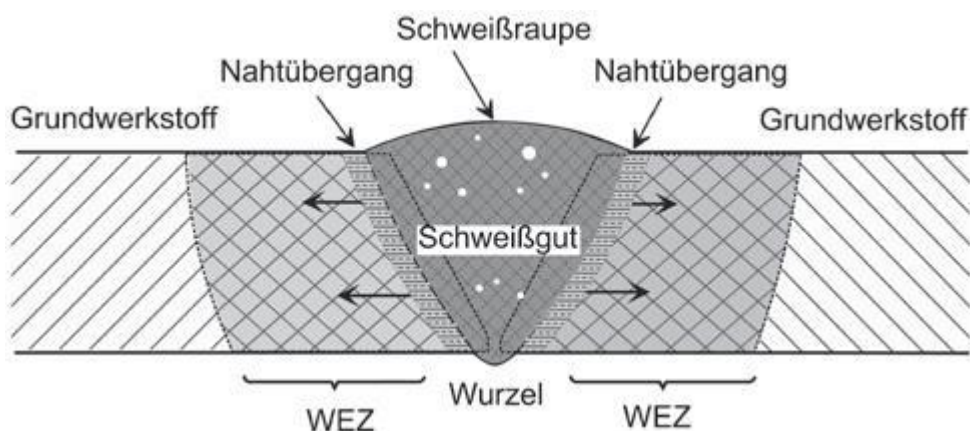


Abb. 6 - Schematische Struktur einer Schmelzschweißverbindung [13]

Das Ausmaß der entstehenden Gefügeänderung und der damit einhergehenden Eigenschaftsänderungen im schmelznahen Bereich der WEZ ist im Wesentlichen abhängig von:

- Temperatur-Zeit-Verlauf des Bereiches, d. h. Werkstückdicke, gewähltes Schweißverfahren und dessen Parametern (Schweißstrom und -spannung, Vorschubgeschwindigkeit) und Höhe der Vorwärmtemperatur
- Art des Nahtaufbaus (ein- oder mehrlagig, Pendelraupe, Zugraupen) [1]

3.4.1 Schweißen von Baustählen

Grundsätzlich hängt die Schweißseignung wesentlich von der chemischen Zusammensetzung, der Desoxidationsart und dem Wärmebehandlungszustand (Lieferzustand) ab. Ausgehend von der chemischen Zusammensetzung nimmt die Schweißseignung mit sinkendem C-Gehalt zu, was eine geringere Aufhärtungsgefahr durch Martensitbildung mit sich bringt. Die Einhärtungsgefahr durch Mn und Si sinkt durch Reduzierung dieser Stahlbegleiter und die Zähigkeit verbessert sich mit niedrigerem Gehalt an P und S. Durch die Desoxidationsart verringert sich die

- Seigerungsneigung (gleichmäßigeren chemischen Zusammensetzung)
- Kornwachstumsneigung durch kornfeinende Teilchen
- Altersanfälligkeit durch Abbinden des Stickstoffs
- Sprödbruchneigung

aus dessen Folge sich die Schweißseignung ebenfalls verbessert.

Allgemein weisen Baustähle bis zu einem maximalen C-Gehalt von 0,21 % (im Falle von Erzeugnisdicken > 40 mm aus S275J2) eine eingeschränkte bis gute Schweißseignung auf und können ohne Vorwärmen gefügt werden. Baustähle mit einem C-Gehalt über 0,21% (Erzeugnisse ab S355JR aufwärts) müssen, in Abhängigkeit ihres Kohlenstoffäquivalents (CEV) und ihrer Verarbeitungsdicke, vorgewärmt werden um Kalt- und Härterisse zu vermeiden. Der CEV berechnet sich nach Gleichung 3.1 des International Institut of Welding (IIW):

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (3.1)$$

Aus der EN 10025-2 geht hervor, dass S355JR mit einer Erzeugnisdicke über 30 mm den kritischen CEV-Grenzwert von 0,45 % überschreitet, ab welchem Vorwärmen notwendig ist. Liegt der Wert über 0,65 % ist das Fügen nur mit erhöhtem Aufwand möglich, was jedoch bei allgemeinen Baustählen aufgrund ihres unlegierten Zustandes nicht vorkommt. Für einen S235JR berechnet sich der CEV nach Formel 3.2 mit den aus der Norm zulässigen Stahlbegleitern wie folgt:

$$CEV = 0,16 + \frac{1,40}{6} + \frac{0+0+0}{5} + \frac{0+0,55}{15} = 0,44\% \quad (3.2)$$

Die EN 10025-2 legt jedoch fest, dass für spezielle Sorten die Höchstwerte des Kohlenstoffäquivalents nach der Schmelzanalyse aus der Norm gelten, welche ihn für den oben genannten Werkstoff auf 0,35% für Erzeugnisnennedicken ≤ 30 mm beziffern. Somit lässt sich S235JR mit Einschränkungen als schweißgeeignet einstufen, was jedoch in den wenigsten Fällen tatsächlich zu signifikanten Problemen führt, da die in der Norm angegebenen Maximalwerte in der Realität nicht erreicht werden. Darüber hinaus ist ein Stahl mit dem maximal zulässigen Gehalt von 0,55 Cu nicht mehr schweißbar.

Ausgehend von der rasch eingebrachten und anschließend wesentlich längeren, exponentiell abklingenden Temperatur beim thermischen Fügen ergeben sich in der Wärmeeinflusszone, je nach Entfernung zur Schweißraupe, Bereiche mit unterschiedlichen Maximaltemperaturen und Abkühlbedingungen, deren Auswirkungen auf das Gefüge durch die jeweilige Maximaltemperatur, Temperatureinwirkzeit und Abkühlgeschwindigkeit bestimmt sind. Diese unterscheiden sich von einer technischen Wärmebehandlung zur gezielten Einstellung von Werkstoffeigenschaften gravierend durch wesentlich höhere Aufheizraten, höhere Maximaltemperaturen und ebenfalls höhere Abkühlgeschwindigkeiten. Die unterschiedlichen Bereiche der WEZ und die damit einhergehenden Gefügeveränderungen sind in Abb. 7 dargestellt.

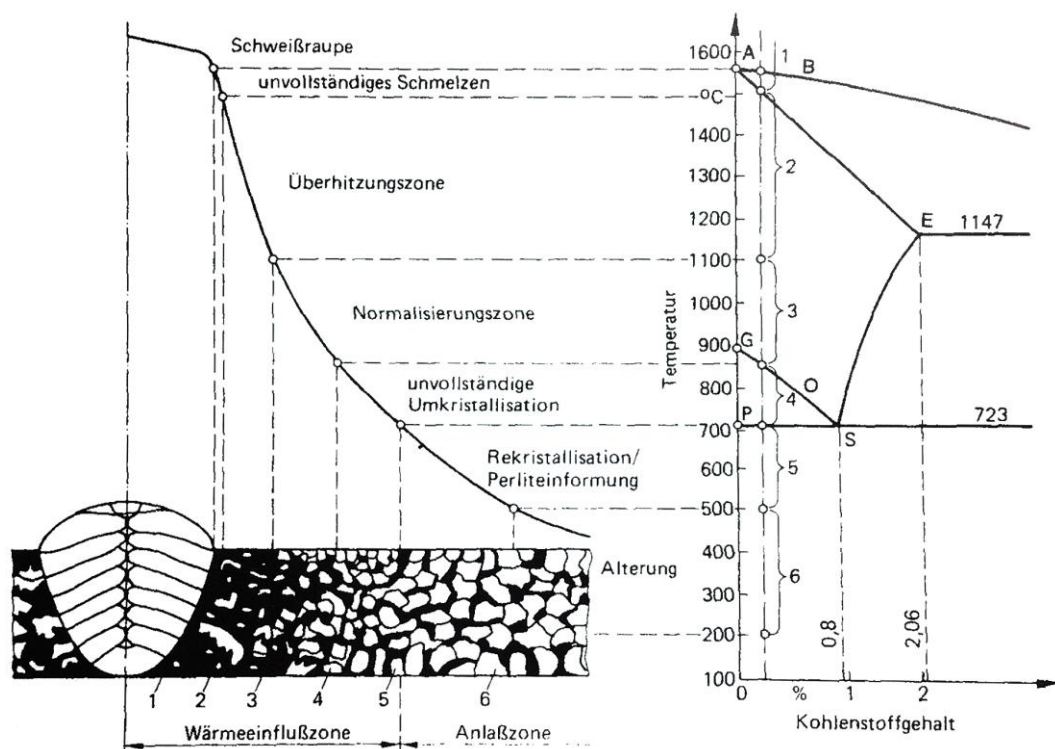


Abb. 7 - Ausmaß der WEZ einer Einlagenschweißung an einem unlegierten Stahl [1]

In der Schweißnaht werden Grund- und Zusatzwerkstoff vollständig aufgeschmolzen und bilden beim Erstarren ein Gussgefüge mit Dendriten, die von der Schmelzlinie aus entgegen der Richtung der größten Wärmeableitung wachsen. In der Regel ist dieses quer zur Naht.

Die Schmelztemperatur wird in der Zone des unvollständigen Schmelzens nicht vollständig erreicht, weshalb bei Maximaltemperatur ein teigiger Zustand vorliegt, der sich aus Schmelze und δ -Mischkristallen zusammensetzt. Das Ausmaß dieser Zone ist recht schmal.

In der Überhitzungs- und Grobkornzone daneben treten während des Schweißens Temperaturen weit über A_3 (GOS-Linie) auf, weshalb sich das Gefüge in Austenit umwandelt, dessen Korngröße rasch zunimmt. In Abhängigkeit der darauf folgenden Abkühlgeschwindigkeit kann sich in diesem Bereich ein martensitisches Gefüge, dessen Folge der Verlust an Zähigkeit ist, oder ein ferritisch-perlitisches Gefüge bilden. Die Abkühlgeschwindigkeit hängt unter anderem von der Wärmeableitung in kalte Bereiche und der Schweißgeschwindigkeiten ab.

In der Feinkorn- oder Normalisierungszone wandelt sich das Gefüge kurz oberhalb der A_3 in Austenit um und kühlt anschließend langsamer ab, so dass kaum Martensit entsteht. Da die GOS-Linie schnell wieder unterschritten wird, bildet sich ein feinkörniges Gefüge mit guten Festigkeits- und Zähigkeitswerten aus. Bei unteutektoiden Stählen wandelt sich im Bereich der unvollständigen Umkristallisation zwischen A_1 (723 °C) und A_3 in der Perlitfallzone bei Temperaturen im α - γ Zweiphasengebiet nicht der gesamte Perlit in Austenit um, so dass sich die streifenförmigen Zementitlamellen (Fe_3C / Eisencarbid) beim abkühlen kugelig einformen. Unterhalb der A_1 bis 680 °C können Zonen, sofern ihr Ausgangszustand im ausreichenden Maße kaltverformt war, rekristallisieren. Bei vorheriger kritischer Umformung entsteht ein besonders grobes Korn mit schlechten Festigkeits- und Zähigkeitswerten. In der darunterliegenden Erholungszone werden Vorverfestigungen beseitigt.

Die anschließende Alterungszone bis hinunter auf 200 °C führt bei N-haltigen (unberuhigten, werden nicht mehr produziert) Stählen durch Nitrid-Ausscheidungen (Reckalterung) zur Versprödung. [1]

3.4.2 Schweißen von austenitischer Stähle

Im Allgemeinen gelten austenitische Stähle als sehr gut schweißbar und können mit allen gängigen Verfahren gefügt werden. Aufgrund ihrer geringeren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu unlegierten Stählen kühlt die Schweißverbindung langsamer ab, was bei zu großer Streckenenergie zum Wärmestau führen kann. Durch den größeren Ausdehnungskoeffizient neigen Bauteile zu stärkerem Verzug. Allgemein ist darauf zu achten, dass:

- artgleich geschweißt und ein Schweißzusatz mit einem höheren Anteil an Legierungszusätzen verwendet wird.
- mit kurzem Lichtbogen geschweißt wird um der Stickstoffaufnahme aus der Atmosphäre entgegenzuwirken.
- Ni-Legierte Werkstoffe eine zäheres Schmelzbad haben, woraus eine schlechtere Benetzbarkeit resultiert was ausschlaggebend für Bindefehler sein kann. Durch Verwendung von Mischgasen aus Ar und geringen Mengen von O_2 kann die Eigenschaft des Schmelzbades verbessert werden, da O_2 die Oberflächenspannung herabsetzt und das Bad verflüssigt.
- beim Schweißen entstehende, farbige Oxidschichten die Ausbildung der Passivierungsschicht beeinträchtigen und daher mechanisch oder chemisch zu entfernen sind um den Korrosionsschutz zu gewährleisten.

Austenite neigen beim Schweißen zur Bildung von Heißrissen, dessen Hauptursache niedrigschmelzende Phasen sind. Deren Löslichkeit liegt im Austenit deutlich unter der von Ferrit. Diese Phasen sind während des Erstarrungsprozesses des Grundwerkstoffes an den Korngrenzen flüssig, während die erstarrten Körner noch schrumpfen, wodurch Risse zwischen den Körnern entstehen, da die Schrumpfspannungen nicht aufgenommen werden können. Um der Heißrissbildung entgegenzuwirken muss die Streckenergie klein sein, damit die Korngröße der primären Austenite, durch den geringen Einfluss von Wärme, klein ausfällt. Grundsätzlich wird, je nach Entstehung, zwischen zwei Arten von Heißrissen unterschieden. Erstarrungsrisse bilden sich in der Mitte des Schweißgutes aus der Schmelze heraus, während sich Wiederaufschmelzrisse in der WEZ oder zwischen aufeinanderfolgenden Schweißlagen bilden, da bereits erstarrte niedrigschmelzende Phasen durch die Wärmeeinbringung des Prozesses wieder aufgeschmolzen werden. Saubere Nahtvorbereitung und Verwendung von Schweißzusatz mit einem geringen Ferritanteil bis 10 % wirken dem entgegen, da aus der Schmelze heraus primäre Ferrit-Kristalle eine feinkörnige Erstarrung begünstigen, so dass sich die niedrigschmelzenden Phasen auf eine wesentlich größere Korngrenzenfläche verteilen.

Ein weiteres Problem beim Schweißen ist die Anfälligkeit gegenüber interkristalliner Korrosion, welche entweder in Form von Messerlinienkorrosion in einem sehr schmalen Bereich neben der WEZ (bei Vollaustenit) oder als Schweißnahtzerfall flächig in der WEZ (bei metastabilen Austeniten) auftritt. Beim Erwärmen bindet sich das im Werkstoff enthaltene Cr mit dem C zu Chromkarbid an den Korngrenzen und steht somit nicht mehr zum Korrosionsschutz im erwärmten Bereich zur Verfügung. Während des Schweißens tritt dieser Vorgang bei Temperaturen zwischen 600 °C und 850 °C in der WEZ auf. Geringe Abkühlgeschwindigkeiten bieten dem Kohlenstoff genügend Zeit für die Diffusion. Die in Folge der Carbidbildung verarmten Korngrenzen werden bevorzugt von korrosiven Medien angegriffen. Entgegenwirken lässt sich der Bildung von Chromkarbiden durch Verwendung von extra low carbon-Stählen (ELC-Stählen mit $C \leq 0,03 \%$) oder durch Stabilisierung durch Niob und Titan, welche stärkere Carbidbildner als Cr sind. [3]

In Abb. 8 ist der Vergleich der WEZ von Stahl und umwandlungsfreien Werkstoffen abgebildet aus dem hervorgeht, dass bei umwandlungsfreien Werkstoffen mit einer Grobkornbildung und eventueller Ausscheidungen zu rechnen ist. Aufgrund der fehlenden Umwandlung ist die Entstehung von Martensit und einer damit einhergehenden Aufhärtung unmöglich.

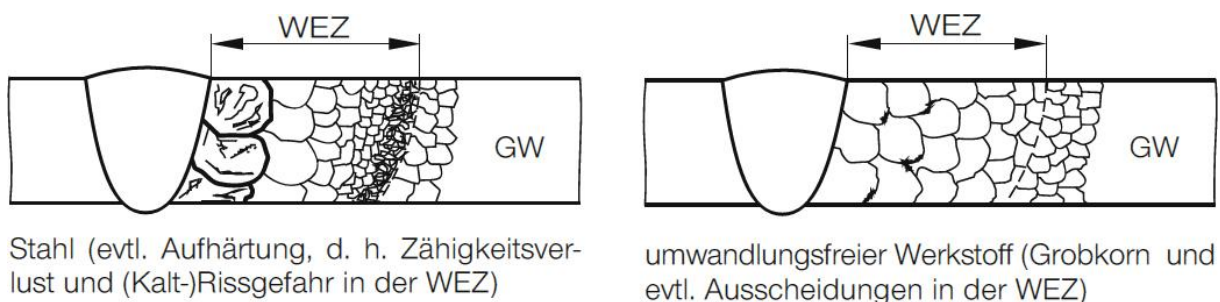


Abb. 8 - Vergleich der WEZ von Stahl und umwandlungsfreien Werkstoffen [14]

3.4.3 Schweißen von Aluminiumlegierungen

Die meisten Aluminiumwerkstoffe weisen eine gute bis sehr gute Schweißbarkeit auf. Liegt der Cu-Gehalt der Aluminiumlegierung zwischen 0,3 % und 6 %, gilt die Legierung als nicht oder sehr schwer schweißbar. Liegt der Cu-Gehalt oberhalb, kann wieder geschweißt werden. Die allgemeine Schweißbarkeit hängt u. a. vom Grundwerkstoff (chemischen Zusammensetzung und Lieferzustand), Schweißzusatz (chemischen Zusammensetzung und Lieferzustand) und verwendetem Schweißprozess und Art und Reinheit der Schutzgase ab.

Bei Temperaturen um 660 °C unterliegt Aluminium, im Gegensatz zum Stahl, einem großen Sprung der Wasserstofflöslichkeit. Im festen Zustand ist die Löslichkeit sehr gering, steigt jedoch oberhalb dieser Temperatur sprunghaft an. Kühlt das Aluminium zu schnell ab, kann der Wasserstoff eingeschlossen werden, was zu Poren führt. Ein kleiner Erstarrungsintervall führt zu einer unvollständigen Entgasung, so dass es wahrscheinlicher zur Porenbildung kommt. Ein größerer Erstarrungsintervall hingegen reduziert die Gefahr der Porenbildung. [3]

Aluminiumlegierungen werden nach ihrem festigkeitssteigernden Mechanismus in aushärtende (Ausscheidungshärtung) und nicht aushärtende Legierungen eingeteilt. Bei nichtaushärtenden und weichgeglühten Werkstoffen wird der Grundwerkstoff in der WEZ kaum beeinflusst, so dass praktisch keine Änderungen der mechanischen Eigenschaften auftreten. Bei kaltverfestigten Zuständen tritt durch Erholungs- und Rekristallisationsprozesse eine Erweichung auf (siehe Abb. 9), während aushärtende Werkstoffe durch Auflösung oder Überalterungsprozesse in Folge der Wärmeeinwirkung eine Erweichung in eben diesem Bereich erfahren.

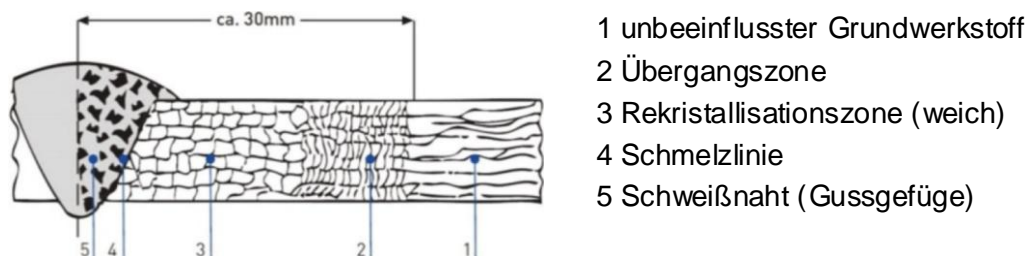


Abb. 9 - Aufbau einer Aluminiumschweißnaht [3]

Die Schweißbarkeit von Aluminium unterscheidet sich von Stählen durch:

- niedrigeren Schmelzpunkt von Aluminium (660 °C << Eisen 1536 °C)
- deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit (etwa drei Mal so hoch)
- zweimal höherer thermischer Ausdehnungskoeffizient
- Affinität zu Sauerstoff (Bildung einer Oxidschicht (Al_2O_3) mit $T_m = 2050$ °C)

Da die Schmelztemperatur der Oxidschicht beim Schweißen nicht erreicht wird, muss sie aufgebrochen werden. Dieses wird beim Schutzgasschweißen durch negative Polung des Werkstückes erreicht. Da die Elektrode bei der Nutzung des Reinigungseffektes beim WIG-Schweißen überhitzen würde, wird üblicherweise mit Wechselstrom gearbeitet, so dass eine Halbwelle reinigend wirkt, während die andere die Elektrode kühlt. [1]

4. Prüfverfahren

Im Konstruktionsprozess sind Schweißnähte ein wesentlicher Bestandteil. Fehlerhafte Schweißverbindungen können vor allem unter technisch anspruchsvollen Bedingungen oder bei sicherheitsrelevanten Bauteilen fatale Folgen für Anlagen, Personal und Umwelt haben, weshalb durch geeignete Prüfverfahren die Qualität der Schweißnähte gewährleistet werden muss. Prinzipiell wird bei der Schweißnahtprüfung zwischen zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfverfahren unterschieden. Aus den Regelwerken kann, je nach geforderter Art und Bewertung der Prüfung, der Umfang für die Prüfung von Schweißnähten entnommen werden.

4.1 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) nimmt den weitaus größeren Anteil ein, da sie an fertigen Bauteilen ohne deren Beeinträchtigung oder Zerstörung durchgeführt werden kann. Tab. 7 erläutert, welche Fehler durch welches Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung festgestellt werden können. [3]

Verfahren		Feststellbare Fehler
VT	Sichtprüfung	oberflächige Fehler, Risse, Einschlüsse, geometrische Unregelmäßigkeiten, Form und Maße der Schweißnaht
PT	Farbeindringprüfung	Risse, die zur Werkstückoberfläche hin offen sind (klaffend)
MT	Magnetpulverprüfung	Risse, die sich 1 bis 2 mm unterhalb der Werkstückoberfläche befinden und zur Anzeige nicht klaffen müssen
ET	Wirbelstromprüfung	oberflächennahe, rissartige Unregelmäßigkeiten
UT	Ultraschallprüfung	Wurzelfehler, Bindefehler, Poren, Risse, Dopplungen, allgemein Ungängen im Werkstoff, Kontaktflächenfehler beim Löten
RT	Durchstrahlprüfung (Röntgen)	Wurzelfehler, Bindefehler, Poren, Ungängen im Werkstoff, Risse

Tab. 7 - Zerstörungsfreie Prüfverfahren [3]

Bei der ZfP kommen u. a. folgende Normen für Unregelmäßigkeiten zum Tragen:

- ISO 5817 für Schmelzschweißverbindungen Stahl, Ni, Ti und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen)
- ISO 10042 für Lichtbogenschweißverbindungen für Al und seine Legierungen
- ISO 13919-1 für Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen - Teil 1: Stahl, Ni, Ti und deren Legierungen
- ISO 13919-2 Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen - Teil 2: Al und seine Legierungen

Darin sind alle Arten der möglichen Fehler, wie z. B.

- Oberflächenunregelmäßigkeiten (Risse, Poren, Lunken, Bindefehler, Wurzelrückfall, Naht- und Wurzelüberhöhung, ...)

- innere Unregelmäßigkeiten (Risse, Hohlräume, Poren, Bindefehler, ungenügende Durchschweißung, Spikebildung, ...)
- Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie (Kanten- und Winkelversatz, ...)

beschrieben und nach Bewertungsgruppen unterteilt, wobei für jede Gruppe Werte für die Abmessungen von Unregelmäßigkeiten definiert werden. Die Anforderungen sind von niedrig (Bewertungsgruppe D) bis hoch (Bewertungsgruppe B) unterteilt. Eine Bewertungsgruppe A existiert nicht in den Regelwerken, es kann allerdings auch die Bewertungsgruppe B+ oder A angewendet werden, sofern die Ansprüche höher als gefordert angesetzt werden. [15] [16] [17] [18]

4.1.1 Sichtprüfung nach ISO 13919 (VT = Visual Testing)

Die Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen von Laserstrahlschweißnähten wird in der Norm geregelt. Dort werden Prüfbedingungen (Mindestbeleuchtungsstärke E_V von 350 Lux (lx), Betrachtungsabstand (max. 600 mm) und -winkel $> 30^\circ$ zur Werkstückoberfläche), sowie die Prüfgeräte (Messschieber, Lineal, Fühler-, Radiuslehren, Schweißnahtlehren, ...) und die Qualifizierung der Personen (VT Stufe 1 - 3 nach DIN EN ISO 9712) festgelegt. Die jeweils gültigen Kriterien für Unregelmäßigkeiten werden der unter 4.1 zutreffenden Norm entnommen. [19]

Die Sichtprüfung umfasst:

- Schweißnahtvorbereitung (Form, Maße, Fugenflanken und Oberfläche)
- Sichtprüfung während des Schweißens (Unregelmäßigkeiten zwischen den Lagen, Übergänge zwischen den Raupen, Tiefe und Form des Ausfuges)
- Prüfung nach Fertigstellung (Säubern, Form, Maße, Oberflächen, Unregelmäßigkeiten)

Aufgrund der, im Vergleich zu anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren, einfachen Durchführung und Hilfsmittel kann diese Prüfung im kleinen Umfang vom Schweißpersonal während der Fertigung durchgeführt werden und gewährleistet somit eine Grundsicherung der Qualität. Dieses ersetzt jedoch kein geschultes Fachpersonal für Sichtprüfung. Die Abb. 10 zeigt eine Vier-Skalen-Lehre, welche bei der Sichtprüfung verwendet wird.



Abb. 10 - Vier-Skalen-Lehre

4.1.2 Farbeindringprüfung nach ISO 3452-1 (PT = Penetrant Testing)

Bei der Farbeindringprüfung handelt es sich um ein Verfahren zum Auffinden von Fehlern, wie z. B. Rissen, Poren und Bindefehlern, die zur Oberfläche des zu prüfenden Werkstücks offen sind. Vorwiegend wird es bei metallischen Werkstoffen eingesetzt, kann jedoch auch bei anderen Werkstoffen angewandt werden.

Die zu prüfende Fläche muss vor der Prüfung restlos gereinigt und von eventuellen Farb- und Oxidationschichten befreit und getrocknet werden. Anschließend werden geeignete Eindringmittel, sogenannte Penetrieröle mit sehr niedriger Viskosität (Oberflächenspannung), auf die Prüffläche aufgebracht. Aufgrund der Kapillarwirkung dringt das Öl in die zur Oberfläche hin offenen Fehler ein. Nach der vom Hersteller der Flüssigkeit angegebenen Einwirkdauer wird das überschüssige Öl mit dem dafür vorgesehenem Zwischenreiniger entfernt und der Entwickler wird aufgetragen. Dieses saugfähige Kontrastmittel nimmt einen Teil des in den Fehler verbliebenen farbigen Eindringmittels auf und kann so eine deutlich sichtbare verstärkte Anzeige des Fehlers ergeben. Der Ort des Fehlers lässt sich so sehr gut erkennen, seine Größe im inneren des Werkstücks kann, mit genügend Erfahrung, allerhöchstens erahnt werden. [20]

4.1.3 Durchstrahlprüfung nach ISO 17636 (RT = Radiographic Testing)

Eine weitere zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten stellt die Durchstrahlprüfung mit Röntgen- oder Isotopenstrahlung (Gammastrahlen) dar. Wie auch bei den anderen Prüfverfahren kommen viele Normen zur Anwendung, u. a.:

- ISO 5579 Durchstrahlungsprüfung von metallischen Werkstoffen mit Film und Röntgen- oder Gammastrahlen – Grundlagen
- ISO 17636-1 Durchstrahlprüfung - Teil 1: Röntgen- und Gammastrahlungstechnik mit Filmen
- ISO 17636-1 Durchstrahlprüfung - Teil 2: Röntgen- und Gammastrahlungstechnik mit digitalen Detektoren
- ISO 19232 Zerstörungsfreie Prüfung – Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen; Teil 1 bis 5: Bildgütezahlen, Bildgüteklassen, Bildgütetabellen, Bildgütekörper

Die Durchstrahlungsprüfung ist ein Volumenverfahren, bei dem das Innere einer Schweißnaht und deren Unregelmäßigkeiten abgebildet werden. Bei einer Schweißnaht wird eine hohe Bildqualität erreicht, indem eine möglichst kleine Energie, neben kleinem Brennfleck und feinkörnigen Film, gewählt wird. Diese Strahlung wird, je nach Dichte und durchstrahlter Strecke, unterschiedlich geschwächt, wobei Fehlstellen eine geringere Schwächung bedeuten. Der Rest wird von einem hinter dem Prüfling befindlichen Film als Grauwert erfasst. Unterschiede in der Helligkeit lassen so auf Fehlstellen, Risse und abweichende Materialstärken im Inneren und an der Oberfläche des Objekts schließen. Ausgewertet werden die Röntgenfilme durch Sicht oder automatisch als Bildverarbeitungssystem.

Volumenfehler (Poren, Schlackeneinschlüsse) oder Wurzelfehler lassen sich sehr gut auf dem belichteten Film erkennen. Flächenfehler, wie Risse oder Bindefehler, werden nur dann auf dem Film sichtbar, wenn sie in Durchstrahlungsrichtung liegen, da sie quer eine deutlich geringere Schwächung der Strahlung bedeuten. Zur Durchstrahlungsrichtung schräg verlaufende Fehler, wie z. B. Flankenbindefehler oder Risse in der WEZ, ergeben nur undeutliche Abbildungen. Da das zu prüfende Werkstück durchstrahlt wird, kann zwar das Ausmaß einer Unregelmäßigkeit aufgrund stärkerer Belichtung mit einem Durchgang, nicht jedoch seine exakte Lage, erfasst werden. Dazu ist eine zweite Prüfung, quer zur ersten oder mit einem anderen Verfahren, notwendig. [3]

Für die Bildgüte der Aufnahmen werden üblicherweise Bildgüteprüfkörper (BPK) mit jeweils 7 Drähten unterschiedlichen Durchmessers verwendet. Auf der Seite des dicksten Drahtes sind diese mit der Kennzahl des Drahtes (Bsp.: Drahtnummer 13 für Nenndurchmesser 0,20 mm) versehen, gefolgt von dem Kurzzeichen des Drahtwerkstoffes (Cu, Fe, Ti oder Al), der je nach zu prüfendem Werkstoff ausgewählt werden muss. Eine vollständige Kennzeichnung des Prüfkörpers im Feld für die Kennzeichnung sieht wie folgt aus:

13 FE ISO

Diese Prüfkörper werden auf der filmfernen Seite aufgelegt und müssen auf dem Film erkennbar sein, wobei der kleinste noch zu erkennende Drahtdurchmesser gleichzeitig der kleinsten erkennbaren Anzeige entspricht, welches ein Maß für die Güte der Aufnahme ist. Aus der geforderten Bildgüteklasse A (mittlere oder geringe Beanspruchung) oder B (höchste Beanspruchung) lässt sich die geforderte Bildgütezahl in Abhängigkeit der Durchstrahlungsart und der Nenndicke ermitteln. Bei einwandiger Durchstrahlung sind z. B. nach Bildgüteklasse A bei einer Nenndicke über 2 bis 3,5 mm die Bildgütezahl W 16 und nach Bildgüteklasse B bei einer Nenndicke über 2 bis 4 mm die Bildgütezahl W 17 erforderlich. [21] [22]

4.2 Zerstörende Prüfverfahren (metallurgische Untersuchungen)

Zerstörende Prüfverfahren (ZP) sind notwendig um relevante Werkstoffkennwerte von Bauteilen zu ermitteln und Sicherheitsanalysen durchzuführen. Darunter fallen unter anderem Streckgrenzen aus dem Zugversuch, welcher dem Festigkeits- und Verformbarkeitsnachweis dient und unter quasistatischer Beanspruchung durchgeführt wird, Kerbschlagbiegearbeit aus dem Kerbschlagbiegeversuch, welcher zur Zähigkeitsprüfung dient und Härtewerte aus der Härteprüfung. Da grundsätzlich zerstörend geprüft wird, findet diese Art der Prüfung sehr selten Einsatz am fertigen Bauteil. Eine Härteprüfung kann an der Schweißnaht eines fertigen Bauteils durchgeführt werden, solange durch den entstehenden Prüfdruck keine Gefahr von Langzeitschäden ausgeht. Ein Zugversuch hingegen kann beispielsweise an einem Blech einer Charge zur Überprüfung der Zugfestigkeit oder Streckgrenze eingesetzt werden, welches in der Fertigung zwingend die gestellten Anforderungen erfüllen muss.

In der Prüfung von Schweißverbindungen in der Schweißverfahrensprüfung sind Zugversuche an Zugproben, Biegeversuche an Biegeproben und Kerbschlagbiegeversuche an Kerbschlagbiegeproben notwendig und darüber hinaus eine metallographische Probe / Härteprüfung, falls gefordert, vorgesehen. [23]

4.2.1 Makroskopisches und Mikroskopisches Schliffbild

Makroskopische Untersuchungen einer Probe werden durch das bloße Auge oder durch Anwendung einer geringen Vergrößerung (üblicherweise < 50-fach) mit oder ohne Ätzen durchgeführt. Untersuchungen mit einem Mikroskop bei einer Vergrößerung von 50- bis 500-fach mit oder ohne Ätzen sind Bestandteil der mikroskopischen Untersuchung.

Die makroskopischen und mikroskopischen Untersuchungen dienen zum Erkennen makroskopischer und mikroskopischer Merkmale in einer Schweißverbindung und werden im Normalfall durch Prüfen der Querschnittsfläche mittels Sichtprüfung und / oder optischer Untersuchungen vor oder nach dem Ätzen der entsprechend vorbereiteten Oberflächen durchgeführt. Unabhängig und / oder in Bezug auf verschiedenartige Risse und Hohlräume ist die Bewertung der Strukturen (einschließlich Kornstruktur, Morphologie und Ausrichtung, Ausscheidungsprodukte und Einschlüsse) Zweck dieser Untersuchungen. Die Prüfung wird im Allgemeinen für Proben angewendet, die senkrecht zur Schweißnahtachse entnommen werden und das Schweißgut und die Wärmeeinflusszonen zu beiden Seiten der Schweißnaht einschließen. [24]

4.2.2 Härteprüfung

Die Härteprüfung gehört zu den am häufigsten eingesetzten Verfahren der mechanischen Werkstoffprüfung, da die Ermittlung der Härte relativ unkompliziert ist und sich ohne größeren Aufwand durchführen lässt. Aus den ermittelten Härtewerten lassen sich Beziehungen zu anderen Eigenschaften herstellen, wobei es sich lediglich um Vergleichsmessungen handelt. Es können so Aussagen über die Verschleißfestigkeit der Oberfläche, die Festig- oder Zähigkeit und die richtige Wärmeführung beim Schweißen gemacht werden.

Härte wird als Widerstand bezeichnet, den ein Körper dem Eindringen eines anderen, härteren, entgegensetzt. In der Werkstoffprüfung wird ein Prüfkörper, mit der für das angewendete Verfahren typischen Geometrie, senkrecht durch eine definierte Kraft in die vorbereitete Oberfläche gedrückt. Am Häufigsten finden die Verfahren nach Brinell, Rockwell und Vickers Anwendung, welche sich hauptsächlich in ihrer Geometrie und der damit verbundenen Auswertung unterscheiden und zu den statischen Prüfverfahren zählen. Dies bedeutet, dass die Prüfkraft stoßfrei aufgebracht wird und über einen definierten Zeitraum ruhend wirkt, weshalb die Eindringgeschwindigkeit keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Härte des Werkstoffes kann anschließend aus der projizierten Abdruckoberfläche oder bleibenden Eindringtiefe mittels Formeln für das jeweils angewandte Verfahren berechnet werden oder wird direkt am Prüfgerät angezeigt. [25]

In der Schweißnahtprüfung wird die Härteprüfung für den Grundwerkstoff, für die WEZ und für das Schweißgut nach Vickers oder Knoop durchgeführt, welche sich nur in der Geometrie des Prüfkörpers und der damit verbundenen Formel zur Auswertung unterscheiden.

Die Härteprüfung nach Vickers verwendet als Eindringkörper eine Diamantpyramide mit quadratischem Grundriss und kann, je nach gewählter Prüfkraft (F) in

- Mikrohärtprüfung ($0,009807 \leq F < 1,961$)
- Härteprüfung im Kleinkraftbereich ($1,961 \leq F < 49,06$)
- Härteprüfung ($F \geq 49,09$)

unterteilt werden. Bei der Mikrohärtprüfung ist wegen der geringen Prüflast und des damit verbundenen kleinen Abdruckes eine metallisch blanke und möglichst glatte Oberfläche notwendig.

Die nach Rücknahme der Prüfkraft entstehenden Diagonalen d_1 und d_2 (siehe Abb. 11) des Eindrucks werden optisch gemessen und aus deren Mittelwert die Eindruckfläche A_{HV} bestimmt. Die Härte berechnet sich mit der gemessenen Prüfkraft nach Gleichung 4.1:

$$HV \approx 0,1891 \cdot \frac{F}{A_{HV}} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d_1 \cdot d_2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4.1)$$

Die Härteprüfung bietet bei der Prüfung von Schweißverbindungen eine einfache und schnelle Methode, die verschiedenen Gefüge hinsichtlich ihrer Härte und somit auch ihrer Festigkeit zu vergleichen, da diese beiden korrelieren. [26]

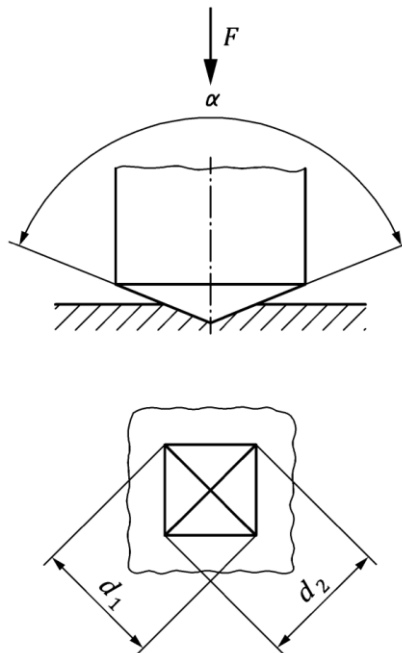


Abb. 11 - Prüfprinzip, Geometrie des Eindringkörpers und Eindrucksgrößen [27]

Dies kann sowohl durch einzelne Eindrücke (Prüftyp E) als auch durch eine Reihe von Eindrücken (Prüftyp R) geschehen und sollte bei $(23 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt werden. Hierfür müssen die Proben entsprechend der Regeln vorbereitet werden. Der zu prüfende Querschnitt muss mechanisch herausgetrennt werden, wobei, wie auch bei allen folgenden Arbeitsschritten, darauf zu achten ist, dass keine Erwärmung auf eine Temperatur erfolgt, die eine Veränderung des Gefüges zur Folge hat. Anschließend muss die zu prüfende Oberfläche vorbereitet und einwandfrei geätzt werden, so dass die Abdrücke in den verschiedenen Bereichen der Schweißnaht genau gemessen werden können.

Für die Prüfung nach Typ R (Reihe) und Typ E (Einzelmessung) müssen die Eindrücke, hier am Beispiel einer Laserstrahlschweißnaht am Stumpfstoß, so ausgeführt werden, dass sie Abb. 12 entsprechen. Ist die Dicke (t) des Grundwerkstoffes oder die Einbrandtiefe (h) $\leq 4 \text{ mm}$, müssen die Eindrücke im Schweißgut und der WEZ auf einer mittig liegenden Linie bei $t/2$ oder im Mittelpunkt der Einbrandtiefe bei $h/2$ liegen.

Dabei sind die um einen Punkt herum angeordneten Eindrücke nach Typ E, da die Härteprüfung an mindestens 3 Punkten: in der Mitte, im oberen sowie unteren Bereich und / oder auf der linken sowie rechten Seite, durchgeführt werden muss. Die jeweiligen Punkte in der Mitte gelten auch für eine Prüfung nach Typ R.

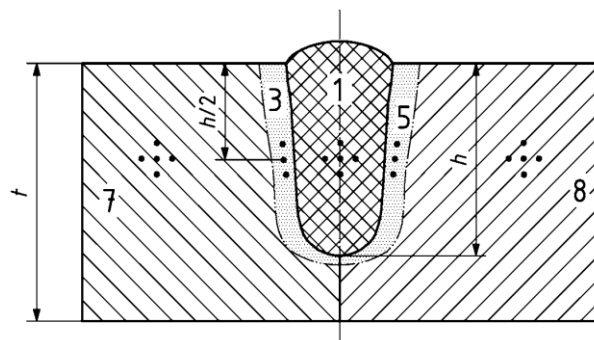


Abb. 12 - Lage der Eindrücke - Einbrandtiefe $h \leq 4 \text{ mm}$ [27]

Härtet ein Werkstoff in der WEZ als Folge der Wärmeeinwirkung des Schweißens auf, müssen zwei zusätzliche Eindrücke in der WEZ in einem Abstand W von $d_V/2 \leq W \leq d_V$ bei der Vickers-Härte, wie Abb. 13 zeigt, gemacht werden. [27]

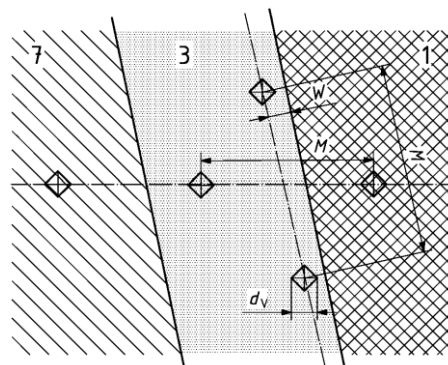


Abb. 13 - Lage von zusätzlichen Eindrücken in der WEZ bei härtbaren Metallen [27]

5. Vorgaben und Zielsetzung

Ziel der in Kapitel 7 beschriebenen Versuche ist es, typische metallische Konstruktionswerkstoffe, wie sie z. B. in der Automobilindustrie und dem Anlagenbau verwendet werden, durch die Wahl der korrekten Prozessparameter für das Laserstrahlschweißen zu qualifizieren. Dazu werden auf Grundlage von Vorgaben des Laserquellenherstellers Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen an ausgewählten Werkstoffen durchgeführt, so dass diese Werte anschließend evaluiert oder, entsprechend fehlgeschlagener Versuche, korrigiert werden. Erfolgreich durchgeführte Schweißungen sollen mittels zerstörungsfreier und zerstörender Prüfung untersucht und nach gängigen Regelwerken ausgewertet werden. Um konstante Prozessparameter während der Fügung zu gewährleisten wird ein Roboterarm eingesetzt.

Zunächst wird anhand einiger Versuche überprüft, ob die mögliche Schweißnahtvorbereitung eine Schweißung ohne Zusatz ermöglicht oder ob, zum Überbrücken des eventuell vorhandenen Spaltes, Zusatz notwendig ist. Im weiteren Verlauf wird der Fokusabstand des Laserstrahls zur Werkstückoberfläche geprüft und anschließend bei weiteren Versuchen der eventuell notwendige Drahtvorschub und die Schweißgeschwindigkeit ermittelt, so dass ein gleichmäßiges Nahtergebnis erreicht wird.

Unter Durchführung diverser Schweißversuche, bei denen unterschiedliche Prozessparameter geändert werden, wird das Schweißergebnis mittels einer vorläufigen Sichtprüfung ausgewertet. Tritt dabei eine wie auch immer geartete Unregelmäßigkeit auf, so dass die Schweißnaht in ihrer Ausführung nicht den anerkannten Regeln der Technik entspricht, gilt diese Zusammenstellung der Prozessparameter als nicht praktikabel.

Aufbauend auf dieser Arbeit können in weiteren Versuchen die gefundenen Parameter optimiert und somit die optimalen Einstellungen für das gewünschte Ergebnis vorgenommen werden. Auch sind weitere Versuche denkbar um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu verifizieren, so dass von einer gleichbleibenden Prozessqualität ausgegangen werden kann um somit den hohen Ansprüchen der Nahtprüfung gerecht zu werden.

5.1 Grundwerkstoffe

Bei den zu fügenden Werkstoffen handelt es sich um Baustahl 1.0038 (vgl. 3.1.3), austenitischen Stahl 1.4301 (vgl. 3.2.3) und die Aluminiumlegierung 3.3535 (vgl. 3.3.3). Diese Werkstoffe sind gängige Metalle der Industrie, welche in unzähligen Anwendungen zum Einsatz kommen, weshalb man sie als Standardwerkstoffe titulieren kann.

Neben den in den entsprechenden Kapiteln zu findenden Informationen liefern die Normen EN 10025-2 für Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustahl (1.0038), EN 10088-1 für nichtrostende Stähle (1.4301) und die EN 573-3 für Aluminium und Aluminiumlegierungen (3.3535) weitere Informationen zu deren Eigenschaften und Anforderungen.

5.1.1 Abmessungen der Proben

Da im weiteren Verlauf auf Querkzugprüfung und Quer- und Längsbiegeprüfungen verzichtet wird, sind die Versuche nur an die Schweißverfahrensprüfung für Elektronen- und Laserstrahl angelehnt und weichen in ihren Maßen von den Vorgaben ab. Die Maße für die Prüfstücke der Längsstumpfnah (Abb. 14) werden dabei reduziert, so dass aus einer Kleinformattafel von 1000 x 2000 mm mehr Prüfstücke ohne Verschnitt gefertigt werden können.

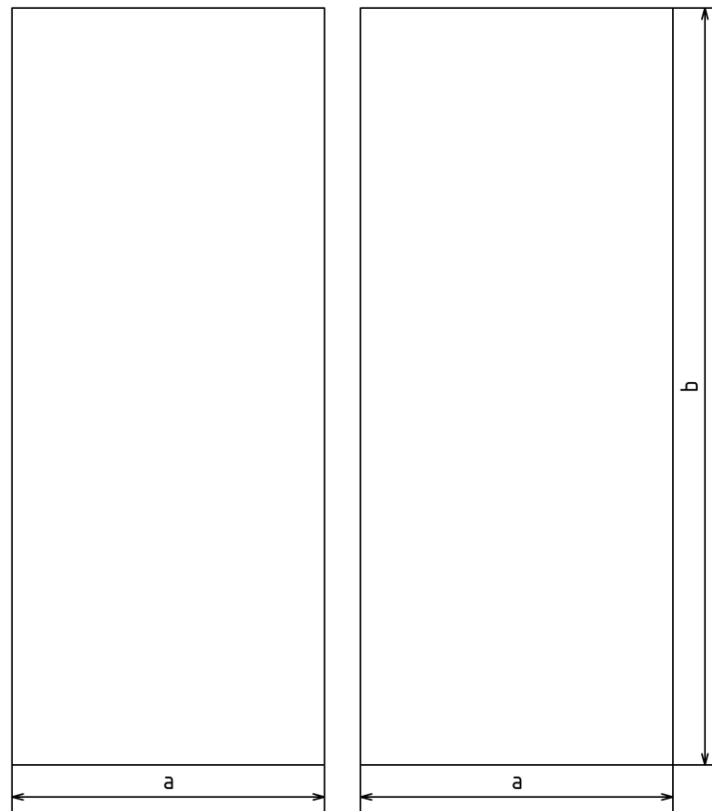


Abb. 14 - Prüfstück für eine Längsstumpfnah

Bei den verwendeten Prüfstücken handelt es sich um Blechabschnitte von $t = 2\text{ mm}$ mit einer Kantenlänge von $a \approx 142,85\text{ mm}$ und $b = 250\text{ mm}$, woraus sich 56 Bleche für 28 Versuche ergeben. Da die Materialstärke $t \leq 25\text{ mm}$ ist, sind die ersten und letzten 25 mm des Bleches Ein- und Auslauf und werden laut Norm als Abfall bezeichnet. Diese werden nicht geprüft. [23]

5.1.2 Schweißnahtvorbereitung

Die Norm für die Schweißnahtvorbereitung umfasst in Abhängigkeit der Werkstückdicke und der vorgesehenen Art der Schweißnahtvorbereitung die Maße sowie den, nach ISO 4063, empfohlenen Schweißprozess.

Bei allen Arten von Stahl ergibt sich bei Werkstückdicken von 2 mm bei einer I-Fuge (Kennzahl Nr. 1.2.2 unten) für den Laserstrahlschweißprozess ein Spaltmaß $b \leq 1\text{ mm}$ bei Verwendung von Schweißzusatz und $b = 0\text{ mm}$ beim Fügen ohne Zusatz (vgl. Tab. 8).

Kennzahl Nr	Werkstückdicke t mm	Art der Schweißnahtvorbereitung	Symbol (nach ISO 2553 [1])	Schnitt	Winkel ^a α, β	Maße			Empfohlener Schweißprozess (nach ISO 4063 [2])	Darstellung der Schweißnaht	Bemerkungen
						Spalt ^b b mm	Steghöhe c mm	Flankenhöhe h mm			
1.2.1	≤ 4	I-Fuge			-	$\approx t$	-	-	3		-
1.2.2	$3 < t \leq 8$					$6 \leq b \leq 8$			111		
	≤ 15					$\approx t$ $\leq 1^d$ 0			13 141 52		

^d Mit Schweißzusatz.

Tab. 8 - Schweißnahtvorbereitung von Stahl [28]

Die ISO 9692 hat keine Vorgaben für die Schweißnahtvorbereitung von Aluminium für das Laserstrahlschweißen, so dass auf die Schweißnahtvorbereitung für das MIG- und WIG-Schweißen zurückgegriffen wird. Aus Tab. 9 ergeben sich für das Schweißen von Werkstückdicken ab 2 mm die gleichen Vorbereitungen wie beim Laserstrahlschweißen mit Drahtzusatzwerkstoff, jedoch wird für Aluminium der Prozess 141 (WIG-Schweißen mit Massivdraht- oder -Massivstabzusatz) empfohlen.

Ref. Nr. ^a	Schweißnaht				Arten der Schweißnahtvorbereitung					Empfohlener Schweißprozess ^c	Bemerkungen
	Werkstückdicke t	Benennung	Symbol ^b	Darstellung	Schnitt	Öffnungswinkel Flankenwinkel α, β	Stegabstand b	Steghöhe c	Andere Maße		
1.1	$t \leq 4$	I-Naht				-	$b \leq 1$	-	-	141	Brechung an der Wurzelseite wird empfohlen
	$2 \leq t \leq 4$	I-Naht mit entfernbarem (MR) oder verbleibendem (M) Schweißbadsicherung	MR M			-	$b \leq 1,5$	-	-	131	-

Tab. 9 - Schweißnahtvorbereitung von Aluminium [29]

Lediglich ist auf das Brechen der Wurzelseite zu achten, da Aluminium sonst ein falsches Nahtprofil aufweist und das Risiko von Rissen zunimmt. Die Abb. 15 zeigt die Auswirkung einer fehlenden Brechung an der Wurzelseite. Bei der verwendeten Werkstückdicke von 2 mm ist jedoch Vorsicht bei der Vorbereitung geboten, da der Kantenbruch sonst zu groß wird. [1]

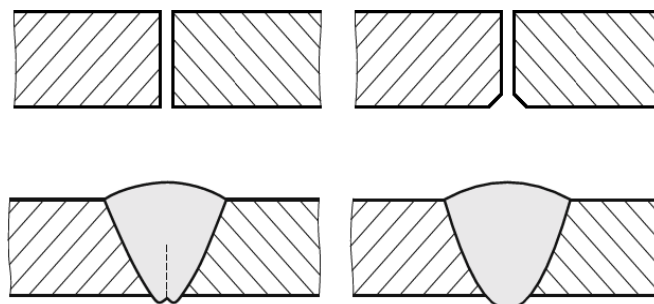


Abb. 15 - Wurzelfehler an Aluminiumschweißnähten

5.1.3 Anforderungen

Da es sich bei den verwendeten Materialien um Standardwerkstoffe handelt, die immer dann zum Einsatz kommen, wenn keine besonderen Anforderungen, außer den grundlegenden wie der Korrosionsbeständigkeit beim Austenit oder der geringe Dichte beim Aluminium, an das Material gestellt werden, kann auf die kostspielige Erstellung eines 3.1-Materialzeugnisses nach EN 10204 verzichtet werden, da sie in weiten Teilen ebenso Anwendung ohne Prüfbescheinigung finden. Darüber hinaus soll die Qualifizierung dieser Werkstoffe auf gleicher Basis wie deren Einsatz erfolgen. Werden spezielle Anforderungen an das verwendete Material gestellt, befindet man sich mit der Qualität außerhalb der Standardwerkstoffe.

5.2 Vorgaben aus geltenden Regelwerken

Um das vorhandene Schweißergebnis bewerten zu können, finden bei der zerstörungsfreien Prüfung ausschließlich gültige Regelwerke nach ISO 17635 Anwendung. [30]

Allgemein anerkannte Verfahren für den Nachweis von zugänglichen Oberflächeninhomogenitäten:

- Sichtprüfung (VT) DIN EN ISO 17637
- Farbeindringprüfung (PT) DIN EN ISO 3542-1

Allgemein anerkanntes Verfahren für den Nachweis von inneren Inhomogenitäten bei voller Durchschweißung:

- Durchstrahlprüfung (RT) DIN EN ISO 17636-2

Bei allen drei zerstörungsfreien Prüfverfahren gelten die Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen:

- Schweißnahtunregelmäßigkeiten DIN EN ISO 13919-1 (Stahl)
- Schweißnahtunregelmäßigkeiten DIN EN ISO 13919-2 (Aluminium)

Bei der zerstörenden Prüfung von Schweißungen an metallischen Werkstoffen:

- Vickers-Härteprüfung DIN EN ISO 22826

5.2.1 Schweißfehler (allgemein)

Während des Laserstrahlschweißprozesses kann es, wie bei allen anderen Schweißverfahren, zu einer Vielzahl von Fehlern kommen. Die ISO 6520-1 teilt die geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen beim Schmelzschweißen in sechs Hauptgruppen ein und weist Fehlern, ihrer Hauptgruppe entsprechend, dreistellige (in den Klammern nach der Hauptgruppe) und, wenn notwendig, vierstellige Ordnungsnummern für Untergruppen zu:

- Risse (Referenz Nr. 100)
- Hohlräume (Referenz Nr. 200)
- feste Einschlüsse (Referenz Nr. 300)
- Bindefehler und ungenügende Durchschweißung (Referenz Nr. 400)
- Form- und Maßabweichungen (Referenz Nr. 500)
- Sonstige Unregelmäßigkeiten (Referenz Nr. 600)

Die ISO 13919-1 als Richtlinie für Bewertungen von Unregelmäßigkeiten bei Stahl und die ISO 13919-2 als Richtlinie für Bewertungen von Unregelmäßigkeiten bei schweißgeeigneten Aluminiumlegierung verweisen auf einen Teil der zu prüfenden Unregelmäßigkeiten aus der ISO 6520-1.

5.2.2 Poren

Als Poren werden Hohlräume bezeichnet, die teilweise oder ganz in der Schweißnaht eingeschlossen sind. Dabei wird zwischen zwei Arten der Entstehung unterschieden.

Werden Spalte unter Einsatz von Gasen überschweißt, so können die sich durch die Wärmeeinwirkung ausdehnenden Gase nicht vollständig entweichen. Ebenso können technische Gase in die Schweißnaht gedrückt werden und entgasen nicht vollständig, wenn das Schweißgut zu schnell erstarrt. Weiterhin kann z. B. durch ungünstige Schutzgasströmung, zu hoher Schutzgasdurchflussmenge oder turbulenter Schutzgasströmung durch Spritzer in der Schutzgasdüse über Injektorwirkung Umgebungsluft in die Schweißnaht gelangen. In allen Fällen spricht man von mechanischer Porenbildung.

Bei der metallurgischen Porenbildung spricht man von Porenbildung durch gelöste Gase in der Schmelze (siehe 3.4.3), wobei es sich oftmals um Wasserstoff (H), Stickstoff (N) und Kohlenmonoxid (CO) handelt. Ist die benötigte Zeit zum Entgasen größer als die Erstarrungsphase, kommt es zu Gaseinschlüssen in der Schweißnaht. Bei un- und niedriglegierten Stahl führt in erster Linie Stickstoff (N), bei Aluminium und austenitischem Cr-Ni-Stahl in der Regel Wasserstoff (H) zur metallurgischen Porenbildung. [31]

Im Vergleich zu anderen Schweißverfahren tritt beim Laserstrahlschweißen der Einschluss von Gasblasen häufiger auf (vgl. 2.4.2). [5]

5.2.3 Aufhärtung und Risse

Die hohe Abkühlgeschwindigkeit, resultierend aus der geringen Wärmeeinbringung beim Laserstrahlschweißen, führt, im Vergleich zu anderen Schweißverfahren, zu deutlich höheren Härtewerten durch Martensitbildung (bis über 400 HV). Insbesondere bei mehrachsigen Spannungszuständen können diese hohen Werte kritisch sein. [4]

Die Schrumpfspannung des Gefüges kann in Verbindung mit dem, durch sehr schnelle Abkühlung entstandenen, Martensit zu einer örtlich begrenzten Materialtrennung führen. Ob und in welchem Ausmaß sich Risse bilden, ist abhängig von der Duktilität des umgebenen Materials.

6. Prozessparameter

Um ein konstantes Ergebnis und somit die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten, ist eine gleichbleibende Prozessanordnung und Einstellung der Prozessparameter notwendig. Für einen Schweißprozess sind diese Parameter festgelegt und haben wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Schweißnaht. Sie unterscheiden sich, je nach zu schweißendem Material, in mehreren Parametern, wie z. B. notwendige Leistung, Vorschub und Fokusabstand.

Wird ein optisch gutes Ergebnis erzielt, gelten die verwendeten Parameter (vorläufig) als anwendbar. Ein optisch gutes Ergebnis bedeutet, nach der Versuchsdurchführung durchgehende, gleichmäßige, geschlossene Schweißnaht ohne Ungängen, welche mit dem bloßen Auge zu erkennen sind.

6.1 Prozessanordnung

Da es sich bei dem verwendeten Laser um ein Handgerät handelt, lässt dessen Bauart, wie auch MSG-Brenner, keine unterschiedliche Positionierung des Zusatzes zu, so dass in der Prozessanordnung lediglich die Ausrichtung und der Fokusabstand zum Werkstück beeinflusst werden kann. Die Laserpistole wird am Roboterarm mit einer Halterung in eben der Position fixiert, in der sie im manuellen Betrieb geführt wird (vgl. Abb. 16).

Die zu verschweißenden Bleche sollen, im Rahmen der vorhandenen Möglichkeiten, punktgenau und starr fixiert werden, so dass möglicher Verzug durch eingebrachte Wärme vermieden und eine möglichst gleichbleibende Anordnung ermöglicht wird.

6.2 Prozesseinstellungen

Diese setzen sich für den durchzuführenden Versuch zu Beginn aus den Prozessvorgaben für Schweißdrahtdurchmesser (wire diameter), Fokusabstand (defocus of welding head), Leistung (power), Einschaltdauer (duty cycle), Schweißkopftaumelfrequenz (welding head wobble frequency) und Spurbreite (line width) zusammen (siehe Anhang A). Der Laserstrahl wird zu Beginn, entgegen der Vorgaben von 20° zur Lotrechten für den Strahl, orthogonal ausgerichtet, da dieses dem anerkannten Stand der Technik entspricht.

Im weiteren Verlauf wird, sofern kein positives Ergebnis zustande kommt, eine Änderung einzelner Parameter vorgenommen, so dass letzten Endes ein optisch gutes Ergebnis erzielt wird, welches nach den unter 5.2 aufgeführten Normen ausgewertet werden kann.

6.3 Randbedingungen

Einen indirekten Einfluss auf das Schweißergebnis haben die sekundären Prozessparameter. Im vorliegenden Fall betrifft dies die Nahtvorbereitung an den zu fügenden Blechen, welche, wie unter 5.1.2 beschrieben, durchgeführt wird. Da es sich beim 1.0038 um einen gebeizten und anschließend geölten Werkstoff handelt, muss die Schweißstelle gründlich entfettet werden. 1.4301 und 3.3535 müssen zwischen der Nahtvorbereitung und vor dem Schweißen mit einer scharfen, korrosionsbeständigen Drahtbürste (z. B. CrNi-Stahl-Bürste) von ihrer Oxidschicht befreit werden. [32] [33]

7. Versuchsanlage und Versuchsaufbau

Um zu gewährleisten, dass während des Schweißens konstante Bedingungen wie Abstand und Vorschubgeschwindigkeit vorliegen, wird die Ausführung der Schweißung von einem Knickgelenkroboterarm durchgeführt. Bei dem verwendeten Schutzgas und Schweißzusatz kommen gängige Produkte der Industrie zum Einsatz. Die Durchführung findet in einer Roboterschweißzelle statt, welche den Roboterarm umgibt.

7.1 Laserquelle

Versorgt wird der Laser mittels Netzspannung (Einphasig mit 230 V-AC). Das Schutzgas wird am Hauptgerät eingespeist und über das Schlauchpaket zur Laserschweißpistole geleitet, wo es parallel zum Laserstrahl durch die Düse austritt. Das Handelement verfügt über eine separate Drahtzufuhr für den Schweißzusatz, welcher durch eine spezielle Schutzgasdüse zum Fokus geführt wird. Die Spezifikationen des Gerätes sind im Anhang B zu finden.

Der Laserstrahl wird normal zur Oberfläche ausgerichtet. Anschließend wird der Fokus durch vertikale Bewegung des Roboterarmes gesucht und defokussiert. Die Abb. 16 zeigt die Ausrichtung der Schweißpistole. Entgegen aller gängigen Literatur ist die Vorgabe eine Defokussierung von 5 - 10 mm (siehe Anhang A).

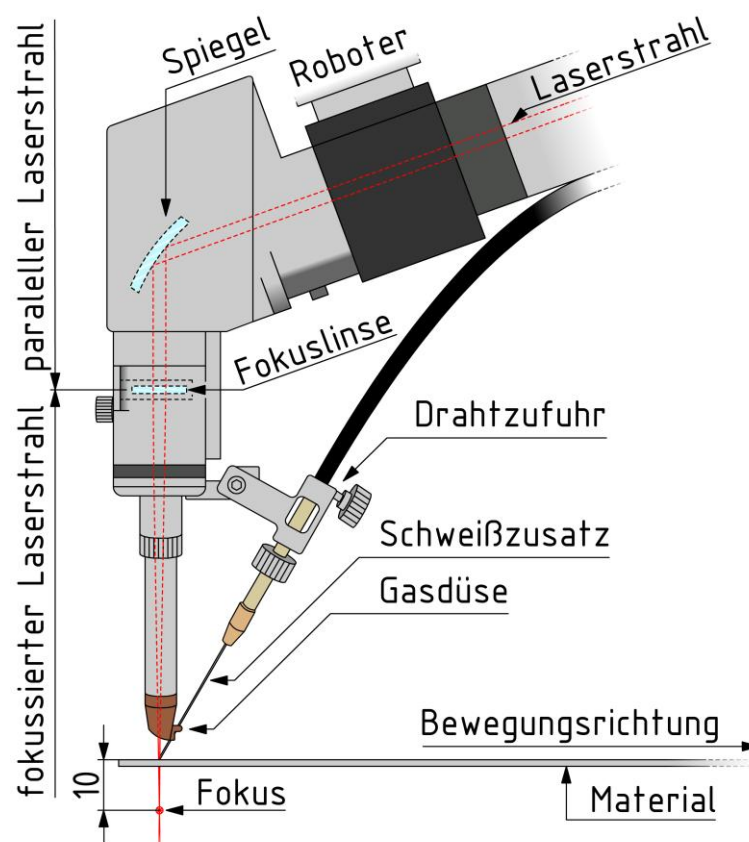


Abb. 16 - Ausrichtung I der Laserstrahlschweißpistole

7.2 Knickarmroboter

Zum Einsatz kommt ein 6-Achs-Roboter (Abb. 17) mit einer maximalen Nutzlast von 6,7 kg und einer Wiederholbarkeit der Pose (nach ISO 9283) von $\pm 0,02$ mm. Ausgelegt ist der KR 6 R900-2 für eine Nennlast von 3 kg bei 900 mm Reichweite. Das Datenblatt des Roboters ist in Anhang C zu finden.

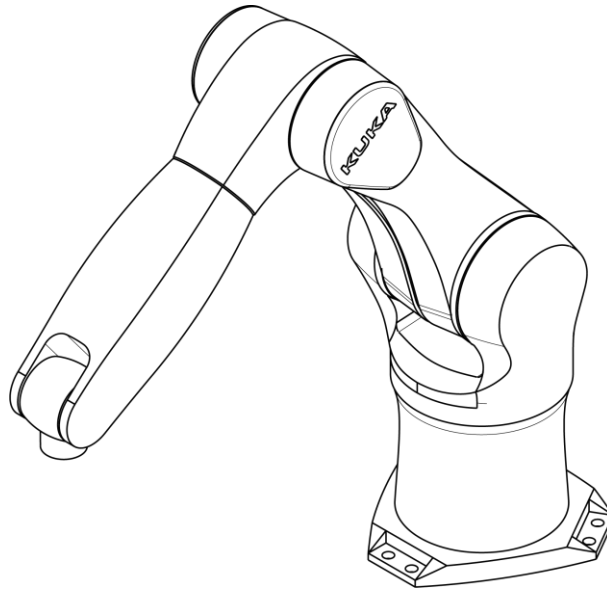


Abb. 17 - Roboterarm KR 6 R900-2

7.3 Schutzgas und Wurzelschutz

Bei der Versuchsdurchführung wird bei allen drei Metallen das gleiche, inerte Gas Argon 4.8 (Normbezeichnung ISO 14175 - 11) mit einer Reinheit $\geq 99,998$ % als Schutzgas und Wurzelschutz verwendet. Das Produktdatenblatt des Schutzgases befindet sich in Anhang D. Das Formiergas zum Wurzelschutz ist nicht mit dem Lasersystem verbunden und muss daher manuell vor dem Versuch geöffnet und nach der Schweißdurchführung geschlossen werden. Der Volumenstrom wird auf konstante 9 l/min eingestellt.

Trotz des Widerspruchs mit der einschlägigen Literatur und der sonst üblichen Handhabung beim Schweißen mit MIG / MAG und WIG wird vom Hersteller des Lasers als Schutzgas für alle Anwendungen, auch mit Schweißzusatz, Argon (11) empfohlen. [34]

7.4 Schweißzusatz

Es wird zu Beginn einer Versuchsreihe für jedes Material versucht, ohne Zusatz zu schweißen. Die Anzahl der Versuche wird dabei auf fünf begrenzt. Alle darauf folgenden Versuche sind mit Schweißdraht ($\varnothing 1$ mm) durchgeführt, da sich dünnere Zusätze nicht sicher mit dem Drahtkoffer zuführen lassen.

Da es sich bei den im Versuch verwendeten Metallen um drei unterschiedliche Arten handelt, wird jeweils mit dem für das Material vorgesehenen Zusatz geschweißt. Dabei kommen Drähte zum Einsatz, die üblicherweise für das MIG- / MAG-Schweißen verwendet werden, da diese, laut dem Hersteller der Strahlenquelle, zuverlässig eingesetzt werden können. [34]

7.4.1 Massivdraht für Baustahl 1.0038 - S235JR

Die verwendete Drahtelektrode für das Schweißen der Baustahlproben ist eine universell einsetzbare, verkupferte Allposition-Drahtelektrode (Schweißposition PA - PE + PF) für Verbindungsschweißungen an allgemeinen un- und niedriglegierten Stählen. Die nachfolgende Tab. 10 listet die Bezeichnung der verwendeten Elektrode auf. Weitere Informationen sind im Anhang E zu finden.

Werkstoff	Norm / Schweißzusatz	Norm: Ausgabedatum
1.0038	ISO 14341-A-G 42 3 M21 3Si1	ISO 14341:2020-08
Dabei ist:	A: Die Nummer der Norm - Einteilung nach Streckgrenze und Kerbschlagbiegearbeit von 47 J; Europäischer Raum G: Drahtelektrode 42: Festigkeit und Bruchdehnung (Mindeststreckgrenze: 420 MPa; Zugfestigkeit: 500 - 640 MPa; Mindestbruchdehnung 20 %) 3: -30 °C für die Mindestkerbschlagarbeit A_V von 47 J M21: oxidierendes Mischgas mit $15\% < CO_2 < 25\%$ nach ISO 14175 3Si1: Chemische Zusammensetzung der Drahtelektrode mit bis zu 1 % Si - Der Rest setzt sich nach der chemische Zusammensetzung innerhalb der Grenzen für die Legierung in Tabelle 3A der Norm zusammen	

Tab. 10 - Bezeichnung des verwendeten Schweißzusatzes für 1.0038

7.4.2 Massivdraht für austenitischen Stahl 1.4301 - X5CrNi18-10

Die verwendete Allposition-Drahtelektrode (Schweißposition PA - PE + PF) für das Schweißen der austenitischen Stahlproben ist für artähnliche, stabilisierte und nicht stabilisierte CrNi- und CrNiMo-Stähle, insbesondere im Chemieanlagenbau, geeignet. Das Schweißgut ist bis 800 °C hitze- und zunderbeständig und bei Nasskorrosion bis 400 °C einsetzbar. Die nachfolgende Tab. 11 listet die Bezeichnung der verwendeten Elektrode auf. Weitere Informationen sind im Anhang F zu finden.

Werkstoff	Norm / Schweißzusatz	Norm: Ausgabedatum
1.4301	ISO 14343-A - G 19 12 3 L Si	ISO 14343:2017-08
Dabei ist:	A: Nennzusammensetzung nach der Norm; Europäischer Raum G: Drahtelektrode 19: Cr-Anteil in % zwischen 18,0 und 20,0 12: Ni-Anteil in % zwischen 11,0 und 14,0 3: Mo-Anteil in % zwischen 2,0 und 3,0 L: low carbon Si: Si-Anteil in % von 0,65 bis 1,2 - Der Rest setzt sich nach der chemische Zusammensetzung innerhalb der Grenzen für die Legierung in Tabelle 1 der Norm zusammen	

Tab. 11 - Bezeichnung des verwendeten Schweißzusatzes für 1.4301

7.4.3 Massivdraht für Aluminiumlegierung 3.3535 - AlMg3 - AW5754

Die verwendete Drahtelektrode für das Schweißen der Aluminiumproben ist geeignet für AlMg- und AlMgMn-Legierungen. Das Magnesium wirkt festigkeitssteigernd und der Mangananteil verbessert die Stabilität bei höheren Temperaturen. Das entstehende Schweißgut ist seewasserbeständig und wird bevorzugt im Schiffsbau eingesetzt. Die Elektrode ist für Konstruktionen hoher Festigkeit, jedoch nicht bei erhöhter Temperatur, einsetzbar. Die Nachfolgende Tab. 12 listet die Bezeichnung der verwendeten Elektrode auf. Weitere Informationen sind im Anhang G zu finden.

Werkstoff	Norm / Schweißzusatz	Norm: Ausgabedatum
3.3535	ISO 18273 - S Al 5183 (AlMg4,5Mn0,7 (A))	ISO 18273:2016-05
Dabei ist: S: Massivdraht Al 5183: Numerisches Legierungskurzzeichen der chemische Zusammensetzung des Schweißzusatzes Al: Aluminiumlegierung Mg4,5: Mg-Anteil in % zwischen 4,3 und 5,2 Mn0,7: Mn-Anteil in % Zwischen 0,50 und 1,0 - Der Rest setzt sich nach der chemische Zusammensetzung innerhalb der Grenzen für die Legierung in Tabelle 1 der Norm zusammen (A) Europäischer Raum		

Tab. 12 - Bezeichnung des verwendeten Schweißzusatzes für 3.3535

7.5 Gasflasche mit Druckminderer

Das Schutzgas wird aus Flaschen (300 bar) mit integriertem, zweistufigen Druckminderer mit dem Hauptgerät verbunden und von dort aus über die Laserstrahlschweißpistole zur Schweißstelle geleitet. Ebenfalls aus einer 300 bar-Flasche mit integriertem Druckminderer stammend, wird das Formiergas über einen an der Schnellkupplung angeschlossenen Gasschlauch zur Wurzelseite geleitet. Die verwendeten Schläuche entsprechen der DIN 20018-1

7.6 Positionierung der Werkstückproben

Um einen konstanten Versuchsablauf zu gewährleisten, werden in der Schweißzelle Anschläge, wie in Abb. 18, positioniert, so dass die Materialproben immer gleich liegen und ein aufwändiges Einmessen entfällt. Darüber hinaus müssen so lediglich notwendige Änderungen der Start- und Stopp-Punkte in der X-Y-Ebene (Materialebene) vorgenommen werden (siehe 8.3.3), da sich der Stoß durch Fertigungstoleranzen um wenige 1/10-mm in der Ebene verschiebt.

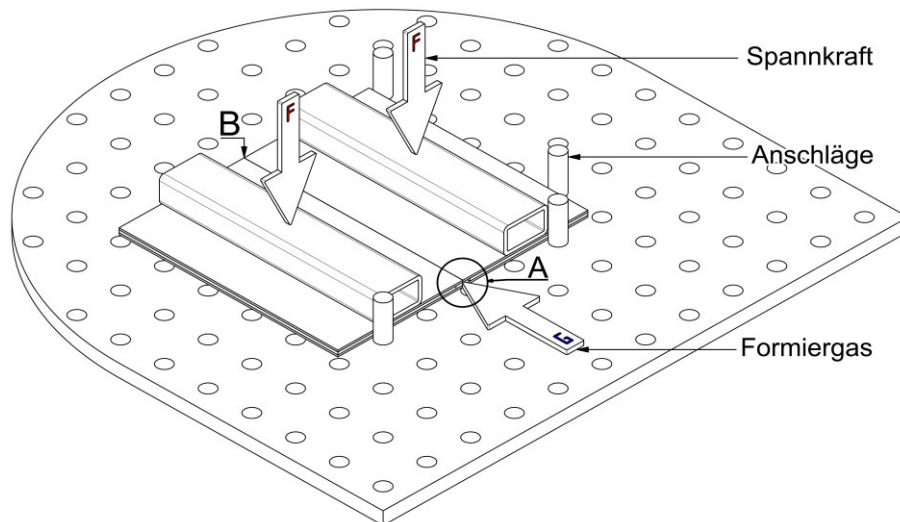


Abb. 18 - Positionierung der Werkstückproben

Auf der Lochrasterplatte der Zelle liegt eine Schutzplatte, um den Tisch vor Beschädigungen bei Fehlversuchen zu schützen, da die Vorgaben einen Fokus von 5 - 10 mm unterhalb der Oberkante des zu schweißenden Materials vorsehen. Auf der Schutzplatte werden zwei Distanzstücke positioniert, so dass die Materialproben nicht an der Schutzplatte festgeschweißt werden. Ein weiterer Sinn der Distanzstücke liegt im Bilden einer Formiergaskammer um die Wurzel vor Oxidation zu schützen (siehe Abb. 19). Auf den Distanzstücken werden die Materialproben stumpf aneinander positioniert. Die zwei vertikalen Pfeile (F) in Abb. 18 zeigen die Punkte, an denen die Spannzangen das Material im Versuch fixieren. Die zwei Quadratrohre verteilen die Spannkraft auf die gesamte Länge der Probe. Schweißrichtung und Formiergasstrom zeigt der horizontale Pfeil (G) des Bildes.

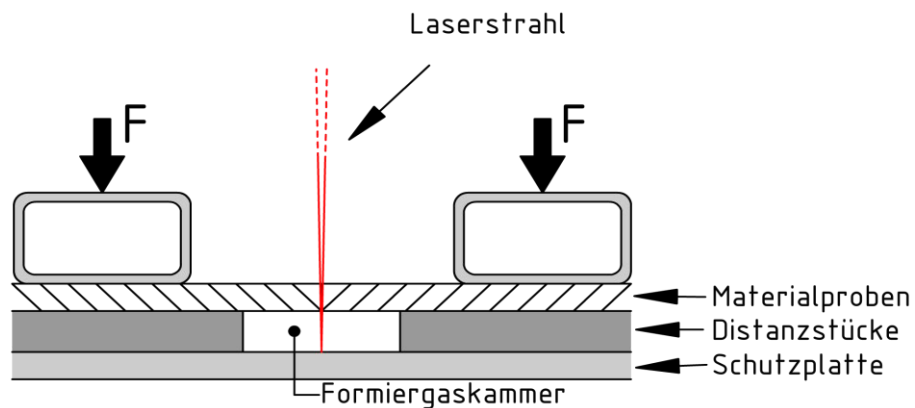


Abb. 19 - Formiergaskammer (Ausschnitt A aus Abb. 18)

8. Versuchsdurchführung

Im folgenden Versuch sollen Stumpfnähte an drei unterschiedlichen Materialien hergestellt werden, welche den gängigen Regelwerken entsprechen müssen. Da es sich bei der verwendeten Quelle um ein Neugerät handelt und bisher keine Erfahrungswerte damit gesammelt werden konnten, müssen die vorgegebenen Parameter überprüft und notfalls angepasst werden, sofern dies möglich ist. Dies geschieht im laufenden Versuch und nicht separat im Vorfeld. Der Prozess soll durchgehend protokolliert werden.

8.1 Defokussierung des Laserstrahls

Um das Material im manuellen Betrieb punktuell nicht durchzubrennen, wird der Laser defokussiert. Die Brennweite des Laserstrahls ist zur Laserpistole konstant, daher wird das Verschieben des Fokus in der Tiefe durch einen geänderten Abstand der Pistole zum Grundmaterial erreicht. Dazu wird die Gasdüse (Abb. 23) tiefer in den Handlaser geschraubt. In Abb. 20 wird eine Defokussierung von 7,5 mm mit einem Anstellwinkel von 0° dargestellt, worauf hin sich eine kreisförmige Wirkfläche A_W auf der Oberseite des Materials ergibt.

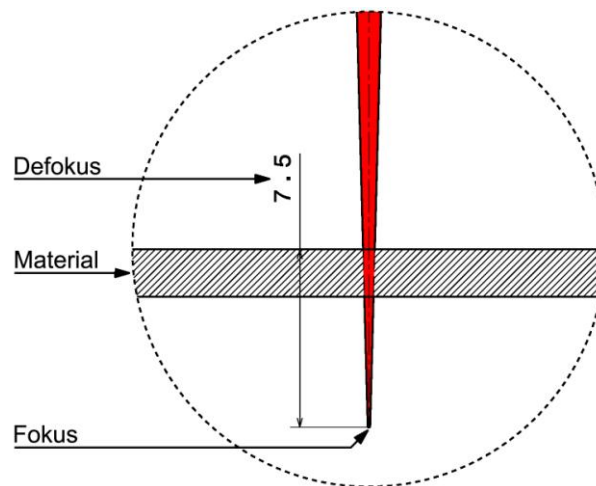


Abb. 20 - Defokussierung des Laserstrahls (Anstellwinkel 0°)

Aus der Defokussierung des Laserstrahls um 7,5 mm ergibt sich eine wirksame Fläche A_W von $0,0019244 \text{ cm}^2$ auf der Oberfläche des Werkstücks (siehe Tab. 13).

Bei einem, vom Hersteller geforderten, Anstellwinkel von 20° wird die wirksame Fläche auf der Oberfläche des Werkstücks eine Ellipse, so dass sich, im direkten Vergleich mit einem Anstellwinkel von 0° bei gleicher Defokussierung, eine Reduzierung der Energiedichte ergibt, da die Fläche zunimmt. In Abb. 21 wird die gleiche Defokussierung (vgl. Abb. 20) bei einem Anstellwinkel von 20° dargestellt.

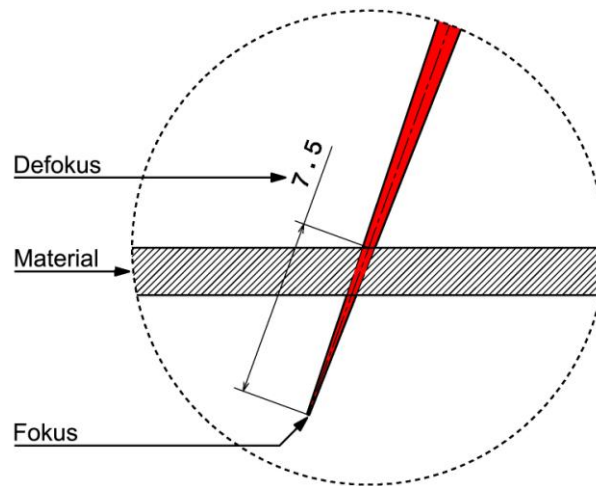


Abb. 21 - Defokussierung des Laserstrahls (Anstellwinkel 20°)

Aus der Defokussierung des Laserstrahls um 7,5 mm ergibt sich eine wirksame Fläche A_W von 0,0020482 cm² auf der Oberfläche des Werkstücks. Darüber hinaus sind in Tab. 13 die berechneten Flächen des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche und die theoretischen Leistungsdichten in Abhängigkeit der Defokussierung aufgelistet. Berechnet wurde die Leistungsdichte I nach Gleichung 2.1

Fläche A		ΔA	Defokus	Leistung P	Wirkungsgrad η	Energiedichte I		ΔI
Anstellwinkel 0° (kreisrund)	Anstellwinkel 20° (eliptisch)	$A_{20^\circ} - A_{0^\circ}$			elektrisch-optisch	Anstellwinkel 0° (kreisrund)	Anstellwinkel 20° (eliptisch)	$I_{20^\circ} - I_{0^\circ}$
[cm ²]		[cm ²]	[mm]	[W]	[%]	[W/cm ²]		[W/cm ²]
0,0010368	0,0011035	0,0000667	5,0	1000	28%	270062	253738	-16323,6
0,0013592	0,0014466	8,74E-05	6,0	1000	28%	206004	193557	-12446,2
0,0017251	0,0018361	0,000111	7,0	1000	28%	162309	152497	-9812,3
0,0019244	0,0020482	0,0001238	7,5	1000	28%	145500	136705	-8794,5
0,0021346	0,0022719	0,0001373	8,0	1000	28%	131172	123245	-7927,3
0,0025877	0,0027542	0,0001665	9,0	1000	28%	108204	101663	-6541,3
0,0030843	0,0032827	0,0001984	10,0	1000	28%	90782	85296	-5486,7

Tab. 13 - Leistungsdichte bei unterschiedlicher Defokussierung

8.2 Ermittlung der Schweißparameter während des Versuchs

Während der Herstellung einer Schweißnaht wird dessen Entstehung beobachtet. Bildet sich kein zufriedenstellendes Ergebnis, müssen die Einstellungen geändert werden. Damit letzten Endes die Auswirkung jedes einzelnen Parameters erkennbar ist, wird immer nur einer geändert und dann dessen Auswirkung bei der Entstehung der Schweißung begutachtet. Bringt die Änderung keine erkennbare Wirkung mit sich, wird der Parameter entweder weiter verändert, bis ein Einfluss erkennbar ist oder er wird wieder auf seinen Grundwert gestellt und ein anderer Parameter wird an seiner Stelle verändert.

Einzigste Ausnahme bildet ein zu schlechtes Ergebnis. Da die Anzahl der Versuche durch das verfügbare Material begrenzt ist, können bei extrem ungenügender Nahtausführung auch mehrere Parameter gleichzeitig geändert werden.

Die vollständige Auflistung der Schweißparameter während der Versuche sind im Anhang H für 1.0038, Anhang I für 1.4301 und Anhang J für 3.3535 zu finden.

8.3 Prinzipieller Ablauf beim Laserstrahlschweißen

Grundsätzlicher Ablauf des Prozesses ist das Positionieren und Einspannen der zuvor vorbereiteten Proben in der Roboterzelle. Anschließend wird der Laser durch den Roboter am Startpunkt A positioniert. Sobald der Laser mit dem Schweißen beginnt, setzt sich der Roboterarm in Bewegung und fährt mit konstantem Vorschub bis zum Endpunkt B. Während einer Durchführung kann auf keinen Parameter Einfluss genommen werden, es sei denn, der Prozess wird unterbrochen.

8.3.1 Anfertigen der Prüfstücke

Die Kleinformattafeln werden mit einer Tafelschere auf Maß geschnitten. Da es für die Vorbereitung (z. B. fräsen) zum spaltlosen Fügen ohne Schweißzusatz an den dafür notwendigen Maschinen mangelt, werden die Bleche, so wie sie geschnitten werden, mit Drahtzusatz verschweißt, nachdem durch 5 Versuche sichergestellt ist, dass sie nicht ohne Draht zu fügen sind. In Abb. 22 links ist eine Fügestelle mit kaltverformten Schnittkanten (Winkel $< 90^\circ$ zur Grundfläche) dargestellt, wie sie im Versuch gefügt werden. Auf der rechten Seite ist eine, durch z. B. fräsen, nachbearbeitete Fügestelle, die ohne Schweißzusatz geschweißt werden kann. Da die verwendete Laserquelle generell in einfachen Werkstätten zum Einsatz kommt, in denen Bleche ohne größere Vorbereitung verschweißt werden, stellt das Fügen von kaltverformten Schnittkanten mit Schweißzusatz kein Hindernis dar.



kaltverformte Schnittkanten

nachgearbeitete Schnittkanten

Abb. 22 - Schnittkanten der Materialproben

Da die Tafelschere das Blech schneidet, also von einer Seite ausgehend zur anderen hin trennt, verformt sich das Blech minimal in Schnittrichtung. Im Normalfall ist das Richten solcher Blechzuschnitte zu kostenintensiv, weshalb die Abschnitte für den Versuch bündig auf ein Distanzblech gespannt werden. Somit kann sich eine vorhandene Verformung nur noch auf den freien Bereich zwischen den Spannflächen in Form von Kanten- und Winkelversatz auswirken.

8.3.2 Nahtvorbereitung und Reinigen der Fügestelle

Wie unter 8.3.1 bereits aufgeführt, muss auf eine weitere mechanische Schweißnahtvorbereitung verzichtet werden. Somit besteht die Nahtvorbereitung aus Entfetten mittels Aceton und Entfernen der Oxidschicht durch eine Cr-Ni-Drahtbürste beim austenitischen Stahl und beim Aluminium direkt vor dem Schweißen.

8.3.3 Änderung der Start- und Stopp-Punkte

Da die Materialproben mit einer Tafelschere hergestellt und danach nicht weiter bearbeitet werden, sind deren Maße nicht durchgehend gleich, weshalb der Start- und Stopp-Punkt der Schweißversuche jedes Mal neu eingestellt werden muss. Dies beschränkt sich allerdings auf das Verschieben um maximal 1 mm innerhalb der X-Y-Ebene (Materialebene). Dabei wird der Roboterarm in der Ebene verfahren, bis der rot eingefärbte Laserstrahl mittig auf der Fügestelle positioniert ist und anschließend neu geteached. Dabei kann festgestellt werden, dass Spalte, die für das bloße Auge kaum sichtbar sind, große Auswirkungen haben, da der Laser durch kleinste Spalte strahlt und auf der Schutzplatte zu sehen ist.

8.3.4 Änderungen des Versuchsaufbaus

Während des Versuchs kommt es zur starken Funkenbildung, was während des Laserstrahlschweißens normal ist. Diese Funken haben die Eigenschaft, sich rechtwinklig zur Oberfläche zu bewegen, so dass sie durch die Gasdüse auf die Fokusslinse in der Laserschweißpistole treffen und diese, durch Einbrennen, zerstören. Der Laserstrahl kann nicht mehr passieren, sondern wirkt an den eingebrennten Teilchen in der Linse. Im Versuch tritt dieses bei S#12 auf.

Die Bauart der Laserstrahlschweißpistole lässt keine Änderung der Brennweite zu, so dass die Ausrichtung, wie in Abb. 23 ersichtlich, auf einen Anstellwinkel von 20° geändert werden muss, wie es der Gerätehersteller vorsieht.

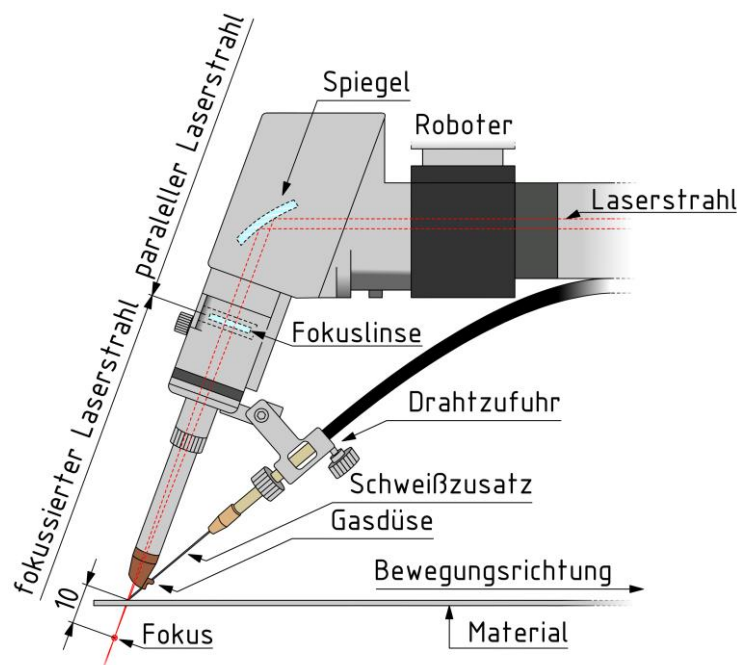


Abb. 23 - Ausrichtung II der Laserstrahlschweißpistole

8.3.5 Bewertung / Untersuchung der Schweißnähte

Während der Versuche kann teilweise schon festgestellt werden, dass die Nahtausführung nicht korrekt ist. Diese Proben werden direkt als ungültig gewertet. Sieht die Ausführung korrekt aus, wird nach den unter 4.1 aufgelisteten Methoden geprüft. Es wird mit einer VT-Prüfung begonnen. Sind keine massiven Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht der Probe, wird die Untersuchung mit der PT-Prüfung fortgesetzt. Diese beiden Prüfungen können eigenständig durchgeführt und mit Hilfe einer entsprechenden Fachperson bewertet werden. Wenn die beiden, relativ einfachen Prüfungen ohne (starke) Unregelmäßigkeiten sind, wird die RT-Prüfung vorgenommen, da sie der aufwendigen Technik wegen, sehr kostspielig ist. Die Durchstrahlprüfung wird extern bei einer akkreditierten Stelle durchgeführt und steht für diese Arbeit nur in einem sehr begrenzten Umfang zur Verfügung.

8.3.6 Herstellung makroskopisches Schliffbild

Um die Proben nicht durch Wärmeeinwirkung zu verändern, werden die zu prüfenden Abschnitte der Schweißnaht unter fließendem Kühlmittel herausgetrennt. Anschließend werden diese mit Körnungen von P180, P320, P600, P1200 und P2400 (nur bei 3.3535) mit Wasser geschliffen und mit Ethanol (99,9%) gereinigt.

Danach werden 1.0038 und 1.4301 mit Ätzmittel nach Adler und 3.3535 mit Natronlauge (15%) geätzt. Nach anschließender Neutralisation der Säuren und Reinigung der Proben können diese unter einem Mikroskop betrachtet werden. Die Auflösung reicht dabei nicht aus um Einzelheiten des Gefüges zu erkennen, jedoch lassen sich diese in manchen Fällen erahnen. Grundsätzlich wird das Schliffbild in diesem Versuch angewendet, um den Nahtaufbau zu untersuchen und so eventuell Rückschlüsse auf das Verfahren zu ermöglichen.

9. Auswertung






Im folgenden Kapitel werden die Auswertungen der Versuche aufgeführt, die nach Sicht- und Farbeindringprüfung als gültig gewertet wurden. Die RT-Prüfung erfolgte nach Abschluss der Versuche bei einer akkreditierten Stelle. Dabei wurde zu jeder Zeit nach den unter 5.2 aufgelisteten, gültigen Regelwerken bewertet.

Die Fehleranalysen zu den Prüfungen sind im anschließendem Kapitel 10 aufgeführt.

9.1 Auswertung der Prüfungen

Es werden die Prüfverfahren der Reihenfolge nach angewendet, wie es in der Praxis üblich ist. Dabei wird mit der visuellen Prüfung begonnen, da diese mit einfachen Mitteln vor Ort durchgeführt werden kann und grobe Anzeigen auch mit bloßem Auge ersichtlich sind. Für die Farbeindringprüfung werden speziellen Testmittel benötigt, die Durchführung ist jedoch ebenfalls vor Ort in der Werkstatt möglich. Die anschließende Röntgenstrahlprüfung bedarf der Unterstützung einer akkreditierten Stelle, so dass diese gesondert und nach Abschluss der Versuche, durchgeführt wird.

Es wird ausschließlich nach Bewertungsgruppe B der ISO 13191-1 (für 1.0038 und 1.4301) und ISO 13919-2 (für 3.3535) geprüft. Sind im folgenden Text geometrische Unregelmäßigkeiten nach ISO 6520-1 genannt, steht dahinter in Klammern die Referenznummer. In Tab. 14 sind die Symbole und dessen Bedeutung aufgelistet, wie sie auf den Abbildungen der Prüfungen verwendet werden. Deren Lage ist, in Richtung der Schweißnahtachse, 25 mm von der Außenkante entfernt.

Symbol	Bedeutung
	Ansicht der Decklage mit Schweißrichtung; Wirkseite des Laserstrahls
	Ansicht der Wurzellage mit Schweißrichtung; Gegenseite des Laserstrahls
	Begrenzung mit Schweißrichtung; Wirkseite des Laserstrahls
	Begrenzung mit Schweißrichtung; Gegenseite des Laserstrahls
	Begrenzung des zu prüfenden Bereichs

Tab. 14 - Verwendete Symbole in den Prüfberichten

9.2 Prüfungen am Baustahl 1.0038 / S235JR

Als Referenz wird der häufig verwendete Baustahl S235JR untersucht. Dabei werden zerstörungsfreie und zerstörende Prüfung voneinander getrennt aufgeführt. Bei der untersuchten Probe handelt es sich um den Versuch S#25 (grün gekennzeichnet im Anhang H). Der vollständige Prüfbericht mit allen Angaben nach Norm ist im Anhang K zu finden

9.2.1 Sichtprüfung VT (ISO 13919-1)

Bei der Betrachtung der Schweißnaht mit bloßem Auge sind keine Auffälligkeiten festzustellen (siehe Abb. 24 und Abb. 25), die zum Ausschluss führen. Die im Anschluss mit der Vier-Skalen-Lehre gemessenen Naht- (502) und Wurzelüberhöhungen (504) sind, wie der Kanten- (507) und Winkelversatz (508), innerhalb der Toleranzen.

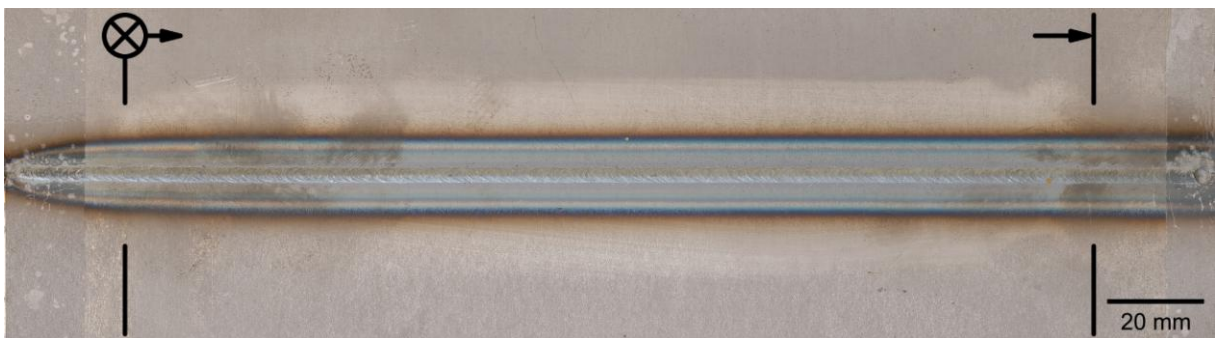


Abb. 24 - Aufnahme der Decklage für die VT-Prüfung (1.0038)

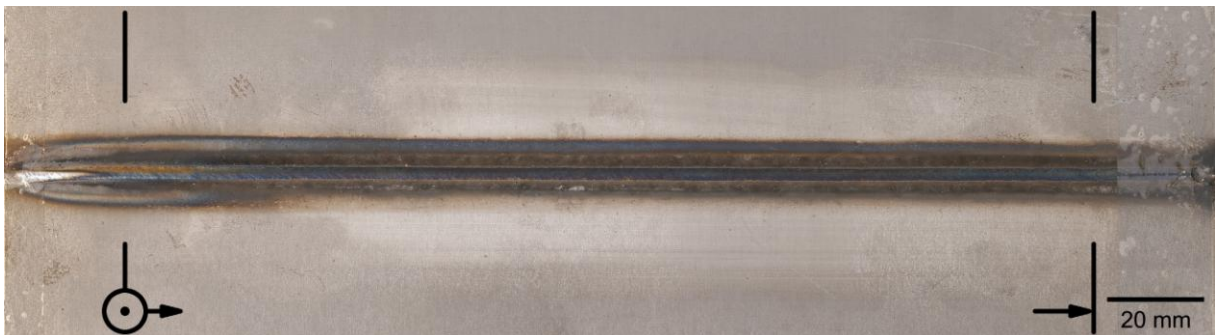


Abb. 25 - Aufnahme der Wurzellage für die VT-Prüfung (1.0038)

Die in Abb. 25 und Abb. 26 ersichtlichen Anlauffarben (610) werden bei technischer Anwendung im Nachgang, z. B. der Vorbereitung zum Feuerverzinken, entfernt und sind daher kein Ausschlusskriterium. Sie entstehen während des Versuchs durch ungenügende Schutzgasabdeckung, welche sich auf der Decklagenseite nicht vermeiden lässt, da die Schutzgasglocke unterhalb der Laserpistole aufgebaut wird. Auf der Wurzellagenseite lässt sich zum Zeitpunkt des Versuchs keine bessere Formierung bewerkstelligen, so dass auch dieses nicht bewertet wird. In Abb. 25 ist durch die unterschiedliche Farbgebung der Wärmeeinwirkung festzustellen, dass die eingebrachte Energie zum größeren Teil in das obere Blech abgeführt wurde. Dies liegt an der geringen Verformung durch die Tafelschere. Zwar wird vor Versuchsbeginn Kraft auf die vorstehende Kante ausgeübt, so dass sie durch Klemmung in Position bleibt, jedoch geht das Blech ab Wärmeeinwirkung in seine Ursprungsposition zurück. Daraus resultieren Kanten- (507) und Winkelversatz (508).

9.2.2 Farbeindringprüfung PT (ISO 3452-1)

Die Betrachtung der Schweißnaht mit der Farbeindringprüfung ergibt keine Anzeigen im zu prüfenden Bereich (siehe Abb. 26 und Abb. 27), somit gilt der Versuch auch an dieser Stelle als bestanden.

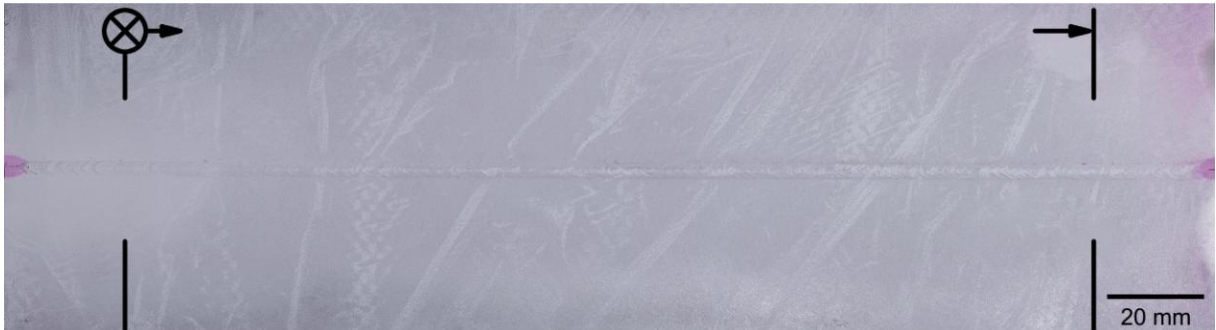


Abb. 26 - Aufnahme der Decklage für die PT-Prüfung (1.0038)



Abb. 27 - Aufnahme der Wurzellage für die PT-Prüfung (1.0038)

In beiden Abbildungen ist vor und nach der Schweißnaht eine Farbgebung durch das Eindringmittel zu sehen. Da das Blech an der Stelle ohne Verschweißen stumpf aneinander sitzt, ist dort Penetriermittel eingedrungen und wird durch den Entwickler an die Oberfläche gezogen, was die ordentliche Durchführung des Versuchs belegt. Die Bewertung erfolgt strikt nach den Vorgaben der Norm. Die Fotos sind nicht im direkten Anschluss aufgenommen, sondern einen Tag später und dienen lediglich der Dokumentation. Die Muster auf den weißen Flächen stammen vom Transportschutz. Gleiches gilt für die Abbildungen in 9.4.2 und 9.6.2.

9.2.3 Durchstrahlprüfung RT (ISO 17636-2)

Bei der Durchstrahlprüfung der Baustahlprobe (Abb. 28) wird sichtbar, dass an diversen Stellen innere Ungenzen vorhanden sind. Diese treten in Form von Porenzeile (2024) mit geringem Porendurchmesser und als einzelne Poren (2011) mit $\varnothing > 0,6$ mm auf, was zum generellen Ausschluss der Probe führt.

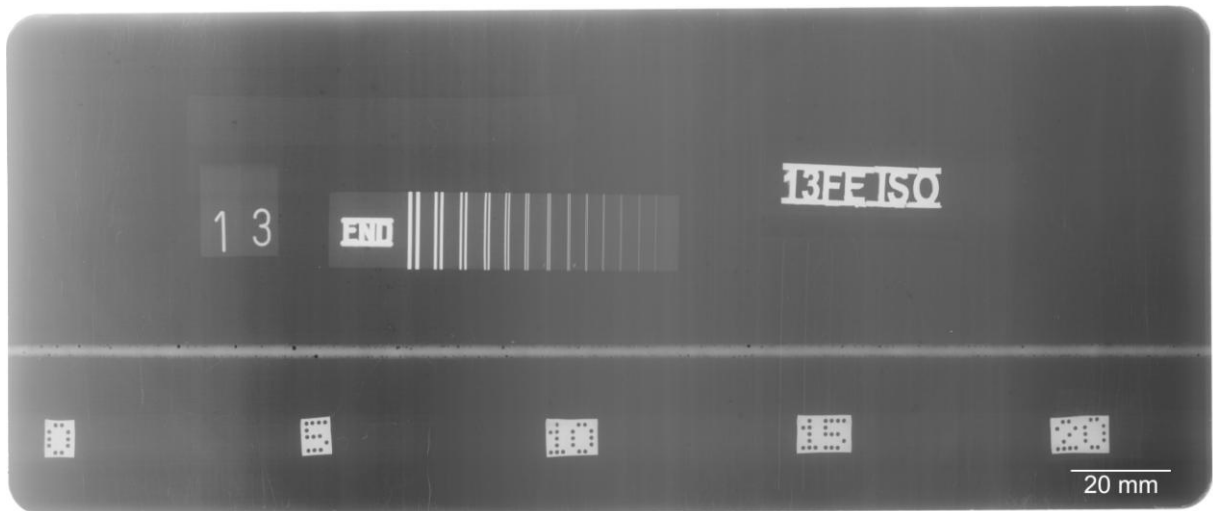


Abb. 28 - Aufnahme für die RT-Prüfung (1.0038)

9.3 Metallografische Untersuchung des Baustahls

Anders als die zerstörungsfreien Prüfungen aus Kapitel 9.2 sind die Untersuchungen dieses Kapitels mit der Zerstörung der Probe verbunden.

9.3.1 Makroskopischer Schliff / Nahtform

Der Kanten- (507) und Winkelversatz (508) lässt sich, wie auch eine Pore (2011), sehr gut in Abb. 29 erkennen. Die Form des Schweißguts ist annähernd parallel und somit nicht optimal. Grundsätzlich ist eine optimale Schweißnaht V-Förmig aufgebaut, wobei sich eine breitere Deck- und eine deutlich schmalere Wurzellage bilden. [5]

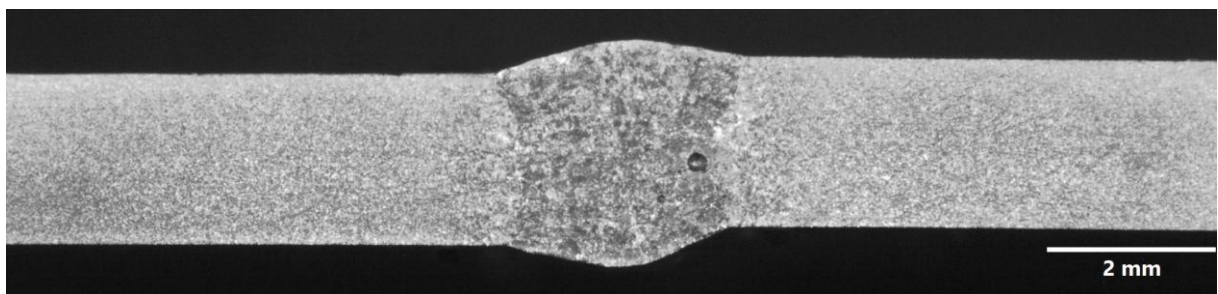


Abb. 29 - Makroskopischer Schliff des Schweißgutes (1.0038)

Das, im Vergleich zum Grundmaterial, unterschiedlich aufgebaute Gussgefüge des Schweißgutes lässt sich anhand des Schliffbildes erahnen.

9.3.2 Vickers-Härteverlauf (ISO 22826)

In Abb. 30 ist der Härteverlauf über das Schweißgut der Baustahlprobe zu sehen. Es handelt sich dabei um keine Abbildung des Versuchs, sondern um eine schematische Darstellung um den gemessenen Härtewerten einen Ort innerhalb der Schweißnaht zuzuweisen (gleiches gilt für Abb. 37 und Abb. 45). Die Abbildung ist das Gegenstück der Schnittkannte von Abb. 29, weshalb der Kantenversatz andersherum zu sehen ist. Während der Härtemessung lässt sich die Schmelzlinie nicht lokalisieren, so dass im Grundwerkstoff beginnend, in regelmäßigen Abständen entlang der Mittellinie der Grundwerkstoffe, geprüft

wird. Da es sich bei dem Werkstoff um einen unlegierten Baustahl mit $C < 0,17\%$ handelt, ist keine Aufhärtung durch Martensitbildung zu erwarten. Sehr gut zu erkennen ist die deutlich Zunahme der Härte des Schweißguts, da die Festigkeit des verwendeten Schweißdrahtes deutlich über der des geschweißten Baustahls liegt.

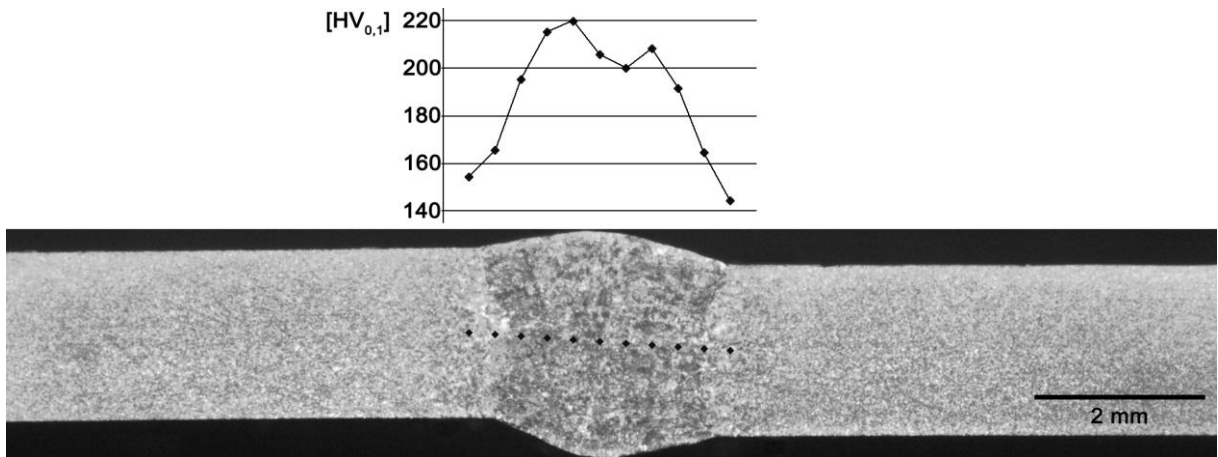


Abb. 30 - Härteverlauf des Schweißguts (1.0038)

Die gemessenen Werte der Härteversuchsreihe entsprechen den zu erwartenden Härtewerten, so dass an dieser Stelle keine Auffälligkeiten bemerkt werden können.

9.4 Prüfungen am austenitischen Stahl 1.4301 / X5CrNi18-10

Bei der untersuchten Probe handelt es sich um den Versuch A#27 (grün gekennzeichnet im Anhang I). Der vollständige Prüfbericht mit allen Angaben nach Norm ist im Anhang L zu finden

9.4.1 Sichtprüfung VT (ISO 13919-1)

Bei der ersten Betrachtung der Schweißnaht ohne Hilfsmittel sind keine Auffälligkeiten festzustellen (siehe Abb. 31 und Abb. 32), die zum Ausschluss führen. Die Spritzer (602) auf der Ober- und Unterseite sollten entfernt werden, da sie Ausgangspunkt für Spaltkorrosion sind. Dies ließe sich im direkten Anschluss an den Schweißvorgang mittels einer Cr-Ni-Bürste bewerkstelligen.



Abb. 31 - Aufnahme der Decklage für die VT-Prüfung (1.4301)



Abb. 32 - Aufnahme der Wurzellage für die VT-Prüfung (1.4301)

9.4.2 Farbeindringprüfung PT (ISO 3452-1)

Die Betrachtung der Schweißnaht mit der Farbeindringprüfung ergibt keine Anzeigen im zu prüfenden Bereich (siehe Abb. 33 und Abb. 34), somit gilt der Versuch auch an dieser Stelle als bestanden.



Abb. 33 - Aufnahme der Decklage für die PT-Prüfung (1.4301)



Abb. 34 - Aufnahme der Wurzellage für die PT-Prüfung (1.4301)

Wie bei dem zuvor mit der Farbeindringprüfung betrachteten Baustahl, weist auch die austenitische Probe die Fehlstellen vor und nach der Schweißnaht auf. Außerhalb des zu prüfenden Bereichs ist auf der linken Seite in der Wurzel kurz nach Nahtbeginn ein ungenügender Wurzeleinbrand (4021) zu erkennen.

9.4.3 Durchstrahlprüfung RT (ISO 17636-2)

Bei der Durchstrahlprüfung der austenitischen Probe (Abb. 35) wird sichtbar, dass an diversen Stellen innere Ungängen vorhanden sind. Diese treten in Form von Porenzeilen (2014) mit geringem Porendurchmesser auf. Die beeinflusste Schweißnahtlänge ≤ 1 mm liegt weit unterhalb der zulässigen Länge, was zum generellen Ausschluss der Probe führt.

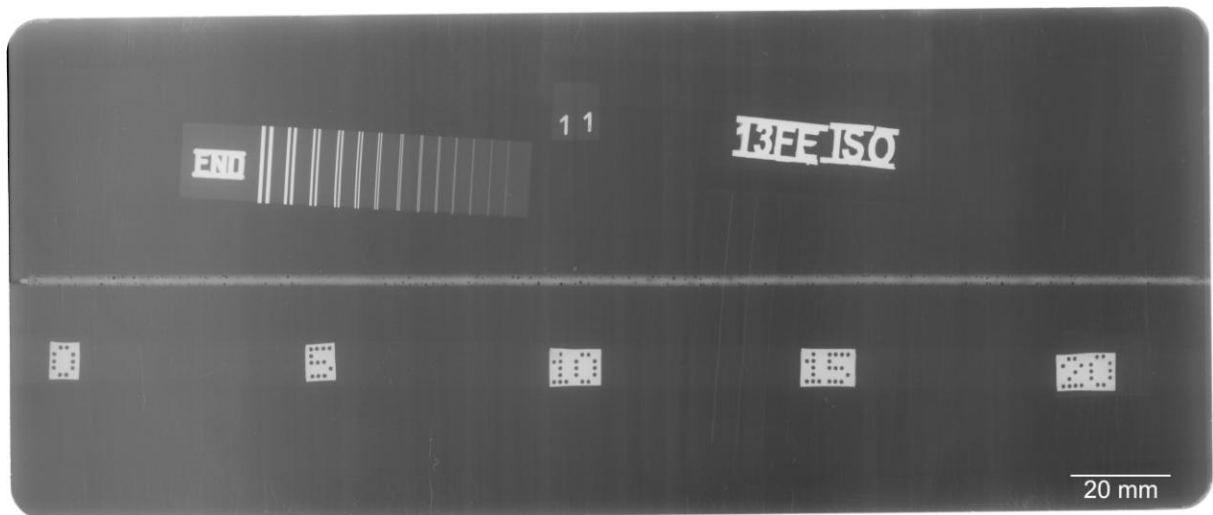


Abb. 35 - Aufnahme für die RT-Prüfung (1.4301)

9.5 Metallografische Untersuchung des austenitischen Stahls

Anders als die zerstörungsfreien Prüfungen aus Kapitel 9.4 sind die Untersuchungen dieses Kapitels mit der Zerstörung der Probe verbunden.

9.5.1 Makroskopischer Schliff / Nahtform

Der Kanten- (507) und Winkelversatz (508) lassen sich in Abb. 36 kaum erkennen. Auch hier ist zu erkennen, dass die Form der Naht nicht optimal ist.

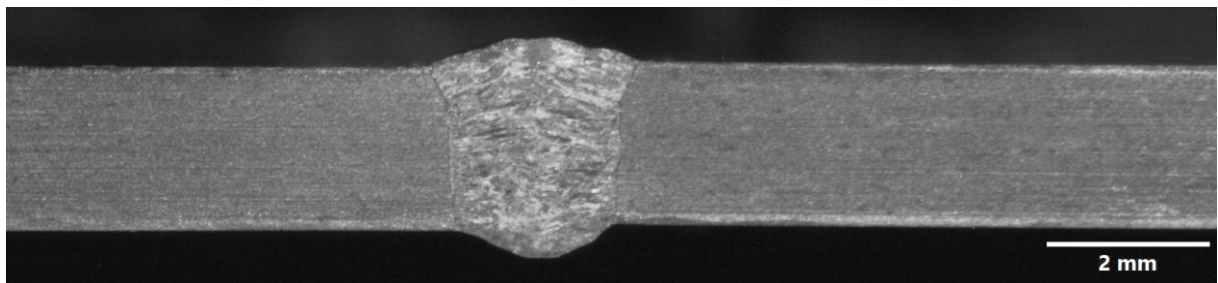


Abb. 36 - Makroskopischer Schliff des Schweißgutes (1.4301)

Das typische, stark gerichtete Stängelgefüge (Gussgefüge) lässt sich anhand der Abbildung, wie auch die Grenze zwischen Schweißgut und Grundmaterial, klar erkennen.

9.5.2 Vickers-Härteverlauf (ISO 22826)

In Abb. 37 ist der Härteverlauf über das Schweißgut der austenitischen Probe zu sehen. Wie zu erwarten steigt die Festigkeit innerhalb der Naht auf Grund des höheren Anteils an Legierungselementen. Die Messwerte im Grundwerkstoff und in der Nähe der Schmelzlinie haben einen sehr ähnlichen Wert, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich das Gefüge dort kaum oder nur sehr wenig vergrößert hat. Allgemein liegen die Werte innerhalb des Schweißguts und der WEZ sehr nah beieinander.

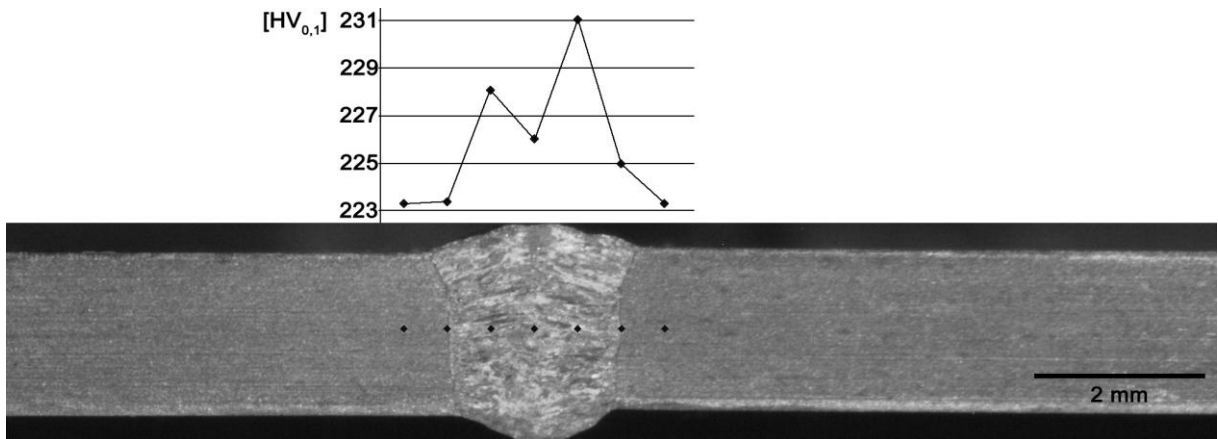


Abb. 37 - Härteverlauf des Schweißguts (1.4301)

Die gemessenen Werte der Härteversuchsreihe entsprechen den zu erwartenden Härtewerten, so dass an dieser Stelle keine Auffälligkeiten bemerkt werden können. Die geringfügigen Abweichungen der Messwerte liegen in etwa innerhalb des Streubereiches der Vickers-Prüfmaschine und der Toleranzen der anschließenden, optischen Auswertung.

9.6 Prüfungen an der Aluminiumlegierung 3.3535 / AlMg3 / AW 5754

Bei der untersuchten Probe handelt es sich um den Versuch A#27 (grün gekennzeichnet im Anhang J). Der vollständige Prüfbericht mit allen Angaben nach Norm ist im Anhang M zu finden

9.6.1 Sichtprüfung VT (ISO 13919-2)

Die Schweißnaht der Aluminiumprobe (Abb. 39 und Abb. 39) weist einen Endkraterlunker (2024) in der Decklage (oben) und einen Wurzelbindefehler (4013) in der Wurzellage (unten) auf. Da diese beiden Fehler, wie auch die Wurzelüberhöhung (504) der Unterseite, innerhalb des Prüfbereiches liegen, muss dieses zum Ausschluss der Probe führen (näheres unter 10.4).

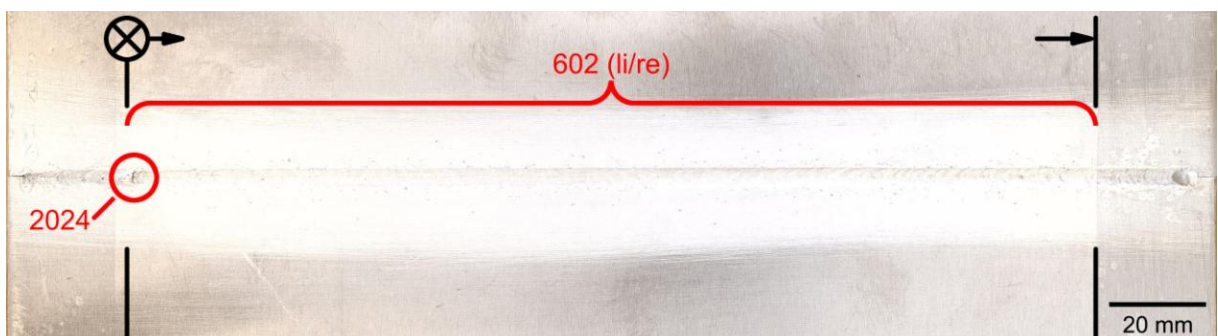


Abb. 38 - Aufnahme der Decklage für die VT-Prüfung (1.4301)

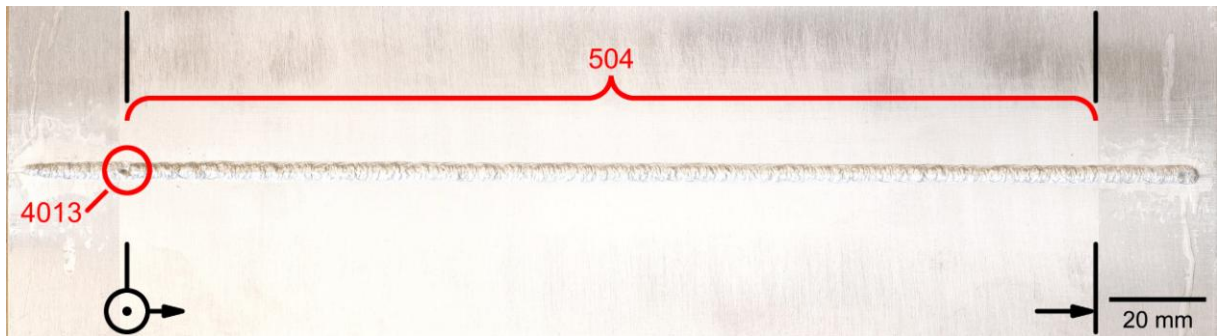


Abb. 39 - Aufnahme der Wurzellage für die VT-Prüfung (1.4301)

Die Spritzer (602) auf Seite der Decklage sollten gegebenenfalls entfernt werden, was jedoch abhängig von der anschließenden Verwendung ist. Für diesen Versuch gelten die Spritzer nicht als Ausschlusskriterium.

9.6.2 Farbeindringprüfung PT (ISO 3452-1)

Bei der Farbeindringprüfung (Abb. 40 und Abb. 41) lassen sich auch hier die Fehlstellen vor und nach der Schweißnaht lokalisieren. Darüber hinaus sind die zuvor bei der Sichtprüfung erwähnten Endkraterlunker (2024) und der Wurzelbindefehler (4013) gut zu erkennen. Die Verfärbungen rechts und links von der Naht in Abb. 41 stammen vom Eindringmittel aus der Wurzellage, da sich nicht durch den Schweißprozess entferntes Oxid in der Bildung einer schuppigen Wurzellage auswirkt.



Abb. 40 - Aufnahme der Decklage für die PT-Prüfung (3.3535)

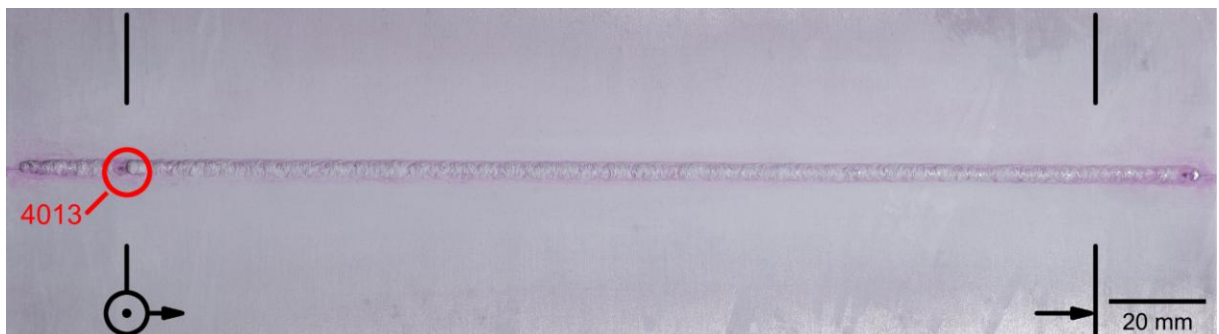


Abb. 41 - Aufnahme der Wurzellage für die PT-Prüfung (3.3535)

9.6.3 Durchstrahlprüfung RT (ISO 17636-2)

Bei der Durchstrahlprüfung der Aluminiumprobe (Abb. 42) wird sichtbar, dass durchgehend innere Ungängen vorhanden sind. Diese treten hauptsächlich in Form von Porenzeilen (2014) in der Nahtmitte sowie am äußeren Randbereich auf und haben einen überwiegenden Durchmesser $\geq 0,6$ mm, was zum generellen Ausschluss der Probe führen muss. Sehr gut lässt sich am Anfang der Bereich des Endkraterlunkers (2024) / Wurzelbindefehler (4013) erkennen.

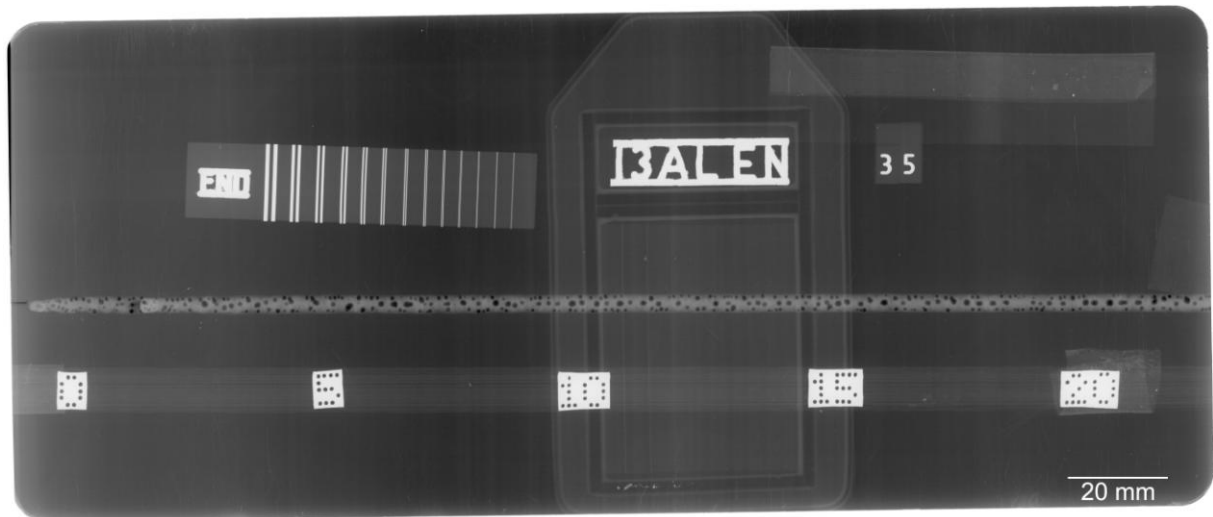


Abb. 42 - Aufnahme für die RT-Prüfung (3.3535)

9.7 Metallografische Untersuchung der Aluminiumlegierung

Anders als die zerstörungsfreien Prüfungen aus Kapitel 9.6 sind die Untersuchungen dieses Kapitels mit der Zerstörung der Probe verbunden.

9.7.1 Makroskopischer Schliff / Nahtform

Der Kanten- (507) und Winkelversatz (508) lassen sich in Abb. 43 gut erkennen. Auch hier ist zu erkennen, dass die parallele Form der Naht nicht optimal ist. Zusätzlich lassen sich eine runde Pore in der geometrischen Mitte sowie am äußeren Nahtbereich erkennen. Der dunkle und nicht runde Bereich an der Außenseite der Pore (re) lässt eine schlauchförmige Verbindung zu einer dahinter befindlichen Pore vermuten, kann aber nicht bestätigt werden.

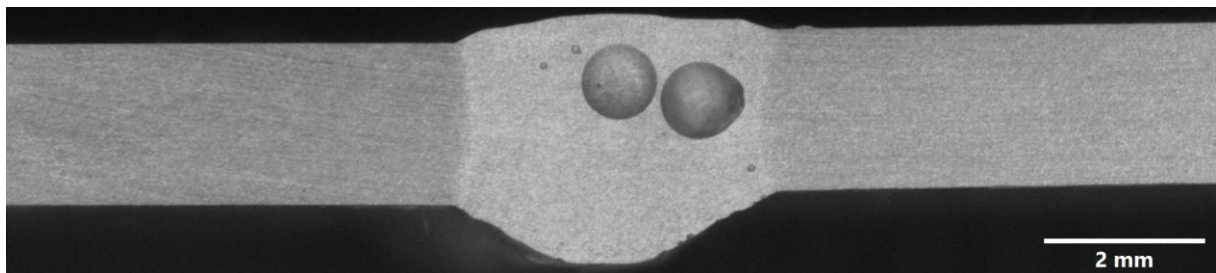


Abb. 43 - Makroskopischer Schliff des Schweißgutes (3.3535)

Die Abb. 44 zeigt einen Ausschnitt des Schweißguts parallel zur Schweißrichtung durch die Nahtmitte. Es ist ersichtlich, dass sich die Poren in axialer Richtung auf einer Höhe befinden. Dies gilt, ohne weitere Untersuchungen, nur für die Poren in der Mitte der Schweißnaht.

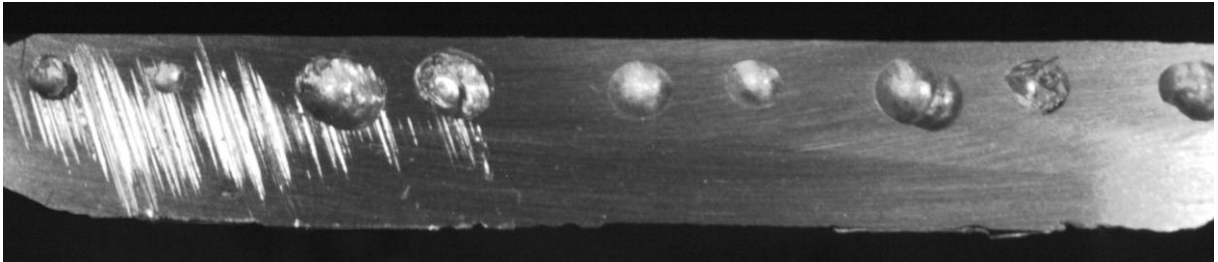


Abb. 44 - Schnitt durch das Schweißgut entlang der Naht (3.3535)

9.7.2 Vickers-Härteverlauf (ISO 22826)

In Abb. 45 ist der Härteverlauf der Schweißnaht in der Probe der Aluminiumlegierung zu sehen. Da die Schweißnaht der ganzen Länge nach Poren und Porenzeilen aufweist, ist es nicht möglich, einen porenfreien Bereich zu schleifen und anschließend zu ätzen, so dass für die Härtemessung der Bereich der Pore ausgelassen werden muss. Darüber hinaus kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Pore im Schweißgut unterhalb der Ebene der Härteprüfung Einfluss auf den gemessenen Härtewert hat.

Beim Härteverlauf ist festzustellen, dass das Schweißgut durch etwas mehr Mg und einen geringen Anteil an Mn aufgrund von Mischkristallverfestigung eine etwas höhere Festigkeit als der Grundwerkstoff aufweist. Generell liegen die Werte für die Festigkeit des Schweißguts innerhalb des Streubereiches der Prüfmaschine.

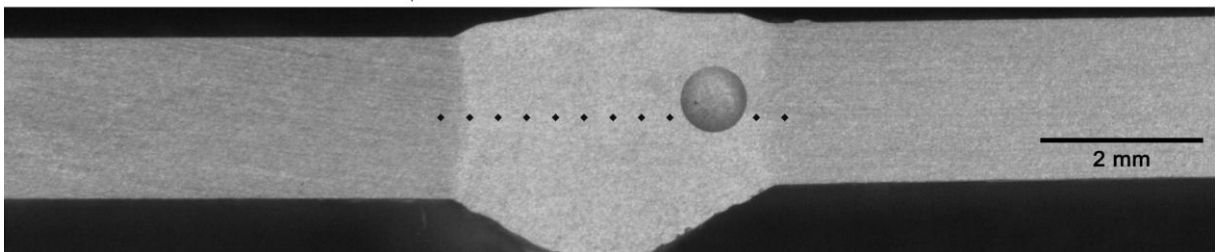
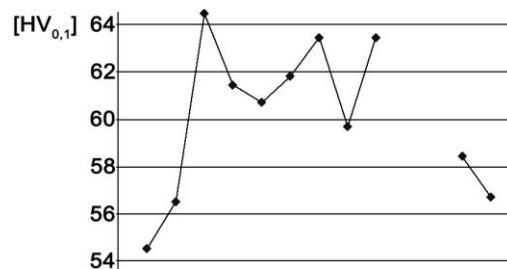


Abb. 45 - Härteverlauf des Schweißguts (3.3535)

Die gemessenen Werte der Härteversuchsreihe entsprechen den zu erwartenden Härtewerten, so dass an dieser Stelle, wie auch bei den beiden Härteverläufen vorher, keine Auffälligkeiten bemerkt werden können.

9.8 Einflussfaktoren auf das Schweißergebnis

Wie bei allen Prozessen des Schweißens gibt es auch bei dem Laserstrahlschweißprozess einige Einflussfaktoren, die sich auf das zu erwartende Schweißergebnis auswirken.

9.8.1 Nahtvorbereitung / Reinigung

Grundsätzlich hat die Nahtvorbereitung beim Schweißen einen nicht unerheblichen Einfluss. Wird mit MIG / MAG geschweißt, wo kontinuierlich Schweißdraht zur Schweißstelle geführt wird und der Lichtbogen über diesen brennt, wirken sich kleinere Spalte kaum negativ aus. Ist allerdings der örtliche Bereich der Energieeinbringung sehr klein, wie beim Laserschweißen, ist der Nahtvorbereitung noch mehr Aufmerksamkeit beizumessen um eventuelle Spalte zu minimieren oder gänzlich zu vermeiden. Darüber hinaus ist das Entfernen von vorhandenen Oxidschichten im schweißnahen Bereich auf Grund der fehlenden, selbstreinigenden Wirkung des Laserstrahlschweißprozesses zwingend notwendig und muss vor jedem Schweißvorgang, wie in 6.3, beschrieben, durchgeführt werden.

9.8.2 Prozessparameter

Neben dem Einfluss der Nahtvorbereitung haben auch einige Prozessparameter Einfluss auf die Qualität der Schweißnaht. Wird für den Vorschub des Lasers ein zu hoher Wert gewählt, kommt es vor, dass das Material nur teilweise aufschmilzt und sich nur partiell eine Schweißnaht aufbaut.

Ebenso hat die Frequenz, mit der der Laserstrahl über die zu fügende Stelle fährt, einen großen Einfluss, wobei sich die Auswirkung nicht von zu hohem Vorschub unterscheidet. Wechselt der Laser zu schnell die Seite, wird nicht genug Energie zum Aufschmelzen ins Material gebracht und eine Naht baut sich nur teilweise auf.

Unter Berücksichtigung der im Versuch vorliegenden Kantengeometrie und gut gewählten Prozessparametern an der Laserquelle muss auch der Drahtvorschub auf den Prozess abgestimmt sein. Ist der zu überbrückende Spalt für das Schweißen ohne Zusatz zu groß, beginnt das Material beim Aufschmelzen in Form von Tropfen von der Kante zu flüchten. Um dieses zu verhindern, muss kontinuierlich Material nachgeführt werden. Ist der Vorschub zu groß, wird das überflüssige Material in Form einer Wurzelüberhöhung auf der Unterseite aus der Naht gedrückt oder führt in der Decklage zu einer Nahtüberhöhung.

10. Fehleranalyse

In Kapitel 9 ist jeder aufgeführte Versuch mit Fehlern versehen. Selbst wenn die Sicht- und Farbeindringprüfung keine aufzeigen (1.0038 und 1.4301), sorgt spätestens die anschließende Durchstrahlprüfung für einen Ausschluss der Probe. Im folgenden Kapitel sollen mögliche Ursachen und Abhilfen erörtert werden.

10.1 Spritzer (602) auch Deck- und / oder Wurzellage

Die Spritzer auf der Oberseite des austenitischen Stahls sind, wie auch beim Versuch mit Aluminium, prozessbedingt. Eine Möglichkeit ist der Parameter „duty cycle“ (Einschaltdauer des Schweißens). Er gibt das Verhältnis zwischen Aufheizen und Abkühlen des gepulsten Laserstrahls an. Die Energie des schlagartigen Anstiegs beim Aufheizen sorgt dafür, dass ein Teil des schlagartig erwärmenden Materials in Form von Funken von der Schweißstelle fliegt. Wird eine Einschaltdauer = 100% gewählt, reduziert dieses die Spritzerbildung signifikant, eliminiert sie jedoch nicht vollständig. Eine andere Möglichkeit ist die Entstehung eines sehr kleinen Laserplasmas, welches im stark begrenzten Maße Spritzer entstehen lässt, welche in alle Richtungen verteilt werden. Diese Überlegung ergibt sich aus der Tatsache, dass ein Plasma beim Wärmeleitungsschweißen nicht ausgeschlossen werden kann, da der Übergang zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen fließend ist. Auf Grund des geringen Durchmessers ist die punktuelle Leistung an der Oberfläche so groß, dass sie einen kleinen Teil verdampfen kann, jedoch nicht in die Tiefe reicht. Diese Spritzer auf der Oberseite können, wenn es für den weiteren Einsatz notwendig ist, mechanisch entfernt werden. [5] [35]

Die Spritzer an der Unterseite der austenitischen Probe sind Reflektionen von Funken durch die Schutzplatte, da der Formiergaskanal 3 mm in der Höhe misst. Solche Spritzer sind durch mehr Platz an der Unterseite oder allgemein geänderten Aufbau zu vermeiden. Sie sind in diesem Falle vorhanden, führen jedoch, wie die Spritzer auf der Decklagenseite, nicht zum Ausschluss der Proben. Diese Spritzer müssen durch den Impuls entstanden sein, da ein Keyhole, wie es zum Tiefschweißen notwendig ist, bei der geringen Leistung nicht zustande kommen kann.

10.2 Decklagenüberhöhung (502) und Wurzelüberhöhung (504)

Es werden in den Prüfberichten (Anhang K - Anhang M) keine Decklagenüberhöhungen beanstandet, jedoch traten diese vermehrt während der Versuche auf. Dies kann an der Menge und / oder dem Durchmesser des verwendeten Schweißzusatzes in Verbindung mit dem bereitgestelltem Drahtkoffer liegen. Die Laserquelle wird mit einem Drahtkoffer ausgeliefert, der nicht dem allgemein anerkannten Stand der Technik entspricht. Der Drahtvorschub ist nicht konstant, weshalb sich die aufbauende Decklage ungleichmäßig ausprägt. Dabei sind Stellen mit ausreichend Material von Stellen mit zu wenig gefolgt. Da kein Einfluss auf den Drahtkoffer genommen werden kann, wird der Drahtvorschub minimal erhöht, bis sich die Decklage, durch mehr Materialzufuhr, gleichmäßig aufbaut. Somit steht unter Umständen zu viel Material für die Nahtbildung zur Verfügung.

Ebenfalls hat der verwendete Drahtdurchmesser von \varnothing 1mm Einfluss auf die Decklage, da bei einem Draht mit \varnothing 0,8 mm und gleichem Vorschub 36 % weniger Material zur Verfügung steht. Wegen des unrunder Laufes der Drahtspule im Koffer knickt der \varnothing 0,8 mm Draht bei allen drei Werkstoffen ab, so dass zwingend der \varnothing 1 mm verwendet werden muss.

Die Wurzellage der Aluminiumprobe (vgl. 9.6.1) weist eine signifikante Wurzelüberhöhung auf und beruht wahrscheinlich auf der gleichen Ursache. Um der Kantenflucht des aufgeschmolzenen Aluminiums wegen fehlenden Kontakts beider Seiten entgegenzuwirken, wurde der Schmelze viel Draht zugeführt. Der Gravitation folgend, floss das Material weiter nach und führte so zu einer Wurzelüberhöhung.

Eine mögliche Abhilfe stellt das Schweißen mit einer geringeren Spurbreite unter Verwendung eines Drahtkoffers mit konstantem Drahtvorschub bei gleichzeitiger Reduzierung des Drahtdurchmessers und dessen Vorschubgeschwindigkeit, dar. Somit bleibt der aufgeschmolzene Bereich kleiner, was die Schmelzbaddynamik reduziert und es ist weniger Zusatz notwendig, um den Spalt zu überbrücken. Eine weitere Möglichkeit ist das Fräsen der zu fügenden Kanten in der Schweißnahtvorbereitung (vgl. 8.3.1), so dass diese spaltfrei verschweißt werden können. Es darf weiterhin davon ausgegangen werden, dass Verschweißen ohne Zusatz auf diese Weise möglich ist. Damit ließe sich die Spurbreite reduzieren, da der Bereich, der aufgeschmolzen werden muss, deutlich kleiner ausfällt und wegen des Verzichts von Zusatz würden sich die Probenstücke mit konstanter Dicke verbinden.

10.3 Schweißnahtgeometrie

Beim Laserstrahlschweißen wird, wie bei vielen anderen Schmelzschweißverfahren, eine V-förmige Schweißnaht angestrebt. Dabei bildet sich eine breitere Decklage, die Wurzellage ist schmal. Anhand der annähernd gleichen Breite der Schweißnaht in der Deck- und der Wurzellage lässt sich bei allen drei Versuchen eine zu hohe Streckenenergie erkennen. Mögliche Ursachen sind:

- gewählte Leistung zu hoch; zu viel Energie auf zu kleine Fläche
- Schweißkopftaumelfrequenz (welding head wobble frequency) zu langsam; Wechsel der Seiten innerhalb der Spurbreite nicht schnell genug, so dass punktuell zu viel Wärme ins Material gebracht wurde
- zu hohe Einschaltdauer (duty cycle); Material wird zu stark aufgeheizt und hat nicht genügend Zeit zum Abkühlen
- zu große Spurbreite; aufgeschmolzenes Volumen zu groß
- Vorschub des Roboters zu langsam; zu viel Energie auf zu kleine Fläche
- Defokussierung; der wirksame Durchmesser des Laserstrahl ist aufgrund der Defokussierung zu groß und brachte die Energie auf eine zu große Fläche

Die Wahrscheinlichkeit, dass einer der aufgelisteten Punkte alleine für die breite Nahtform verantwortlich ist, erscheint gering. Vielmehr ist anzunehmen, dass eine ungünstige Zusammenstellung der oben aufgeführten Parameter getroffen wurde.

An dieser Stelle ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei 1.4301 die Deck- und Wurzellage 2,4 mm (Verhältnis 1:1) Breite und bei 1.0038 die Decklage 3,0 mm und die Wurzellage 2,6 mm (Verhältnis 15:13) Breite haben und es sich, im Vergleich zum MSG-Schweißen, um relativ schmale Nähte handelt. Eine geübter WIG-Schweißer sollte dagegen in der Lage sein, filigranere Nähte zu schweißen. Die Deck- und Wurzellage der Aluminiumschweißnaht beträgt 4 mm (Verhältnis 1:1) in der Breite, weshalb sie sich stark von den beiden vorangegangenen unterscheidet.

10.4 Endkraterlunker (2024) und Wurzelbindefehler (4013)

Die Aluminiumprobe weist bei der VT- und PT-Prüfung einen Endkraterlunker und einen Wurzelbindefehler auf. Dies liegt an einer notwendigen Unterbrechung der Durchführung, da der Wurzelschutz fehlte und nachträglich zugeschaltet werden musste. Bei der untersuchten Probe handelt es sich um Versuch A#27 (dem 27. Versuch mit Aluminium). Bei diesem Versuch gelang die, ohne Messen, erste korrekte Schweißnaht. Im nachfolgenden, letztmöglichen Versuch A#28 wurden die Bleche exakt so positioniert (Walzrichtung und Kaltverformung der Schnittkante), wie bei Versuch A#27, Parameter wurden nicht geändert. Das Ergebnis von Versuch A#28 ist nicht zufriedenstellend, da sich keine durchgehende Decklage aufbaute, so dass Versuch #A27 der einzig zu wertende Versuch der Aluminiumreihe ist.

10.5 Poren (2011) und Porenzeilen (2024)

Einzelnen oder als Zeilen auftretende Poren betreffen alle 3 Versuche. Dabei ist im Baustahl 1.0038 die geringste Menge an Poren, mit vereinzelt sehr großen Durchmessern, vorhanden. Der austenitische Stahl 1.4301 weist dahingegen keine großen Poren auf, besteht die Durchstrahlprüfung jedoch wegen der durchgehenden Porenzeilen nicht. Die Aluminiumlegierung 3.3535 weist Porenketten mit Durchmessern auf, die bei einzelnen Poren schon zum Ausschluss führen. Für das Auftreten von Poren in einer derartigen Anhäufung gibt es mehrere mögliche Ursachen.

Zum einen ist die Wahl des Schweißdrahtes eine mögliche Ursache. Die Drähte sind, laut Herstellerangaben, für die MIG- / MAG-Schweißprozesse optimiert und auch nur für diese zugelassen. Für die erhältlichen Schweißzusätze des Laserstrahlschweißens existieren bisher keine gültigen Normen, so dass allgemein die gleichen Bezeichnungen nach ISO 14341 / ISO 14343 / ISO 18273 verwendet werden. Dabei sind die empfohlenen Zusätze identisch mit den im Versuch verwendeten. Diese Zusätze für 1.0038 und 1.4301 setzen generell aktive Anteile im Mischgas voraus, um ihr garantiertes Schweißergebnis zu liefern. 1.0038 wird mit einem Anteil von CO₂ und 1.4301 mit einem geringen Anteil von O₂ im Schutzgas geschweißt. Unter der Annahme, dass beim Wärmeleitungsschweißen kein Plasma entsteht, wird der aktive CO₂-Anteil im Prozessgas M12 (0,5 ≤ CO₂ ≤ 5, Rest Ar), M21 (15 < CO₂ ≤ 25, Rest Ar) und C1 (100 % CO₂) beim Laserstrahlschweißen mit Wärmeleitung nicht, wie beim MAG-Schweißen, durch den bestehenden Lichtbogen aufgespalten (siehe 3.4.2), so dass dessen Einfluss auf die Schmelzbadcharakteristik fragwürdig ist. Dann ließen lediglich die höheren Temperaturen im Schmelzbad die sonst bei Raumtemperatur ablaufenden, chemischen Prozesse beschleunigt geschehen.

Wird angenommen, dass ein kleines Laserplasma beim Wärmeleitungsschweißen entsteht, spaltet dieses einen Teil der aktiven Komponenten im Schutzgas auf, so dass der Sauerstoff die Oberflächenspannung herabsetzt und das Entgasen erleichtert wird.

Um einen starken Einfluss der aktiven Anteile beim Laserstrahlschweißen zu gewährleisten, muss der Tiefschweißeffekt angewendet werden, um die aktiven CO₂-Bestandteile aufzuspalten (vgl. 2.4). Die mit Gleichung 2.1 berechnete Leistungsdichte (10.1) beträgt im Versuch (bei einer Defokussierung von 7,5 mm und einem Anstellwinkel von 20°; vgl. 8.1):

$$I = \frac{P \cdot \eta_{\text{elektr.-opt.}}}{A_{\text{W}}} = \frac{1000\text{W} \cdot 0,28}{0,0020482\text{cm}^2} \approx 136705 \text{ W/cm}^2 \quad (10.1)$$

Da der Tiefschweißeffekt bei einer Leistungsdichte von 10⁶ W/cm² (korrosionsbeständigem Stahl / Baustahl) bzw. 10⁷ W/cm² (Aluminium) beginnt, handelt es sich bei der im Versuch tatsächlich auftretenden Dichte lediglich um 13,67 % der von korrosionsbeständigem Stahl / Baustahl bzw. 1,37 % der von Aluminium benötigten Leistungsdichte, um einen Tiefschweißeffekt herbeizuführen.

Anders sieht es bei der Verwendung des Schutzgases M13 (0,5 ≤ O₂ ≤ 3) zum Schweißen von austenitischem Stahl aus, da hier keine chemischen Bindungen aufgespalten werden muss. Der oberflächenspannungsreduzierende Einfluss vom Sauerstoff vereinfacht das Ausgasen des Schweißguts, so dass die Porenbildung möglicherweise (erheblich) reduziert werden kann.

Zum anderen ist es möglich, dass das Verhältnis von Drahtdurchmesser (Ø 1mm mit 0,785 cm²) zur wirksamen Fläche des Laserstrahls auf der Oberseite des Materials (0,00204 cm²) bei zu schneller Drahtzufuhr dazu geführt hat, dass der Draht beim Aufschmelzen nicht flüssig, sondern nur breiig aufschmilzt und das Entgasen verhindert. Somit wird die Luft im Fügespalt eingeschlossen. Bei Aluminium würde die Oxidschicht das Entgasen verhindern, während der Metallanteil selbst noch flüssig ist.

Desweiteren ist eine überhöhte Streckenenergie möglich, die das Schmelzbad in einem sehr begrenzten Ausmaß überhitzt. Die dabei entstehende Dampfblase wird anschließend beim schnellen Erstarren des Gefüges eingeschlossen. Somit fehlt dem Schweißgut die Zeit zum Entgasen. Grundsätzlich muss hierbei beachtet werden, dass, trotz der Defokussierung, der Punkt des Wärmeeintrages noch deutlich geringer als beim Schutzgasschweißen ist. In Hinblick auf die zuvor, in Gleichung 10.1, berechnete Leistungsdichte ist dieses allerdings sehr unwahrscheinlich, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch nicht ausgeschlossen werden. [5]

Eine weitere Möglichkeit ist das Überschweißen von Spalten in Verbindung mit der schnellen Erstarrung der Schmelze. Auch hier fehlt es dem Schmelzbad bis zur Erstarrung an der nötigen Zeit zum Entgasen. Im Hinblick auf die kaltverformten, und damit nicht rechtwinkligen, Schnittkanten mit leichter V-Form (vgl. 8.3.1) stellt dies eine mögliche Ursache dar.

Mangelnde Schutzgasabdeckung der Schweißnaht durch zu wenig Volumenstrom oder Injektorwirkung (vgl. 2.5) kann hingegen ausgeschlossen werden, da weder die VT- noch die PT-Prüfung zur Oberfläche hin offene Fehlstellen anzeigt, wie es bei ungenügender Abdeckung und der damit einhergehenden Reaktion mit Umgebungsluft der Fall ist. Lediglich an den Anlauffarben ist ersichtlich, dass die Abdeckung im gerade erstarrten Zustand zu gering ausfällt.

Eine zu große Vorschubgeschwindigkeit erzeugt eine hohe Abkühlgeschwindigkeiten und erschwert das Ausgasen des Schweißguts. Der Vorschub bei Stahl betrug 0,3 m/min und ist im Bereich des MSG-Schweißens angesiedelt, Aluminium liegt mit 0,66 m/min etwas oberhalb dieses Bereiches, weshalb davon auszugehen ist, dass die hier vorherrschenden Bedingungen nicht ausreichend sind, um diesen Effekt herbeizuführen. [14]

Ebenfalls kann eine zu geringe Schweißgeschwindigkeit zur Porenbildung führen. Die Schmelze kann dann an der Wurzelseite Gase aufnehmen. In Verbindung mit der, in 10.3 erwähnten, Schweißnahtbreite und dem, im vorigen Absatz erörterten, Vorschub erscheint dies als eine wahrscheinliche Ursache. [4]

Die schleppende Ausrichtung der Schweißpistole (Drahtzufuhr und Laser sind entgegen der Vorschubrichtung ausgerichtet) ist eine weitere mögliche Ursache für die Entstehung von Porenzeilen in der Schweißnaht. In Abb. 46 ist ein Stark vergrößerter Ausschnitt der Schweißsituation dargestellt. Während der Laser den Schweißzusatz auf die Oberfläche aufschmilzt, wird, etwas weiter zurück, tiefer gelegenes Material aufgeschmolzen, über dem sich schon erkaltendes Schweißgut befindet, und so das Entgasen erschwert.

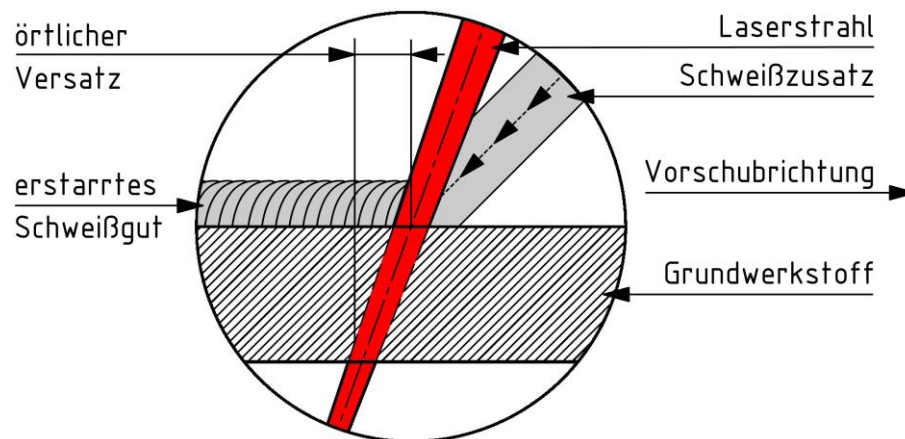


Abb. 46 - Ausschnitt der Schweißsituation mit 20° Anstellungswinkel (schleppend)

Der Versatz entgegen der Vorschubrichtung über die gesamte Dicke (2mm) des Bleches im Versuch bei einem Anstellungswinkel von $\alpha=20^\circ$ lässt sich mittels Umstellen des Tangens (Gleichung 10.2) nach Versatz (Gegenkathete G) berechnen, wobei die Ankathete A die Blechdicke ist:

$$\tan \alpha = \frac{G}{A} = \frac{\text{Versatz}}{\text{Blechdicke}}$$

10.2

$$\text{Versatz} = \tan\alpha \cdot \text{Blechdicke} = \tan 20^\circ \cdot 2\text{mm} \approx 0,73\text{mm}$$

10.3

Wie anhand Gleichung 10.3 festgestellt werden kann, beträgt der Versatz entgegen der Vorschubrichtung über die gesamte Blechdicke 0,73 mm. In Verbindung mit der sehr kleinen Wirkfläche und der damit einhergehenden, hohen Energiedichte ist diese Möglichkeit die Wahrscheinlichste, die zur Bildung von Porenzeilen während der Versuche führte.

Da die Porenzeilen, besonders beim Aluminium, sehr stark ausgeprägt sind, ist die schleppende Ausrichtung aller Wahrscheinlichkeit nach nicht die alleinige Ursache. In Verbindung mit den zuvor diskutierten

- zu dicken Drahtdurchmesser,
- überhöhten Streckenenergie,
- Überschweißen von Spalten,
- zu geringen Schweißgeschwindigkeit,
- und hohen Drahtvorschub (vgl. 10.2)

ist jedoch naheliegend, dass die schleppende Ausrichtung eine der Hauptursache für die Entstehung der Porenzeilen darstellt und sich in Verbindung mit einer oder mehreren der aufgelisteten möglichen Ursachen in der Art auswirkt, wie es in Abschnitt 9 bei allen 3 Durchstrahlprüfungen der Fall ist.

Es wurde während der Durchführung versucht, neutral (Laser orthogonal zur Oberfläche) zu schweißen. Da das System über keinerlei Mechanismen verfügt, die Schweißspritzer daran zu hindern, die Sammellinse zu zerstören, musste von dieser Ausrichtung Abstand genommen werden.

Vor Versuchsbeginn wurde ebenfalls versucht, stechend (Drahtzufuhr und Laser sind in Vorschubrichtung ausgerichtet) zu schweißen (vgl. Abb. 47). Dabei traten mehrere Probleme auf, so dass auch dieses verworfen werden musste.

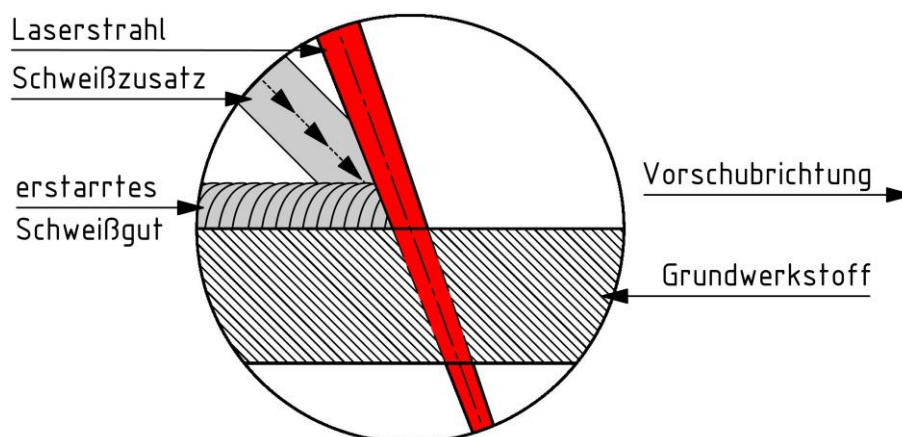


Abb. 47 - Ausschnitt der Schweißsituation mit 20° Anstellungswinkel (stechend)

Der Zusatz muss zwingend den Laserstrahl auf der Oberfläche kreuzen. Wird mit dem Laser einfach die Richtung geändert, in der geschweißt wird, gibt es drei Möglichkeiten. Kreuzen sich Laser und Draht oberhalb der Werkstückoberkante, tropft der Zusatz auf die nicht mehr aufgeschmolzene Oberfläche. Diese Tropfen fielen teilweise ohne mechanische Behandlung wieder ab oder blieben als grobe Tropfen zurück. Ist der Kreuzungspunkt innerhalb des Werkstücks, schleift der Drahtzusatz auf der Oberfläche und knickt ab. Liegt der Knotenpunkt direkt auf der Werkstückoberfläche, wird der Draht am Werkstück angeschweißt und knickt ab.

Weiter wurde überlegt, den Drahtvorschub entgegen des Vorschubes zuzuführen, wie in Abb. 48 dargestellt. Dieses scheiterte an der Bauart.

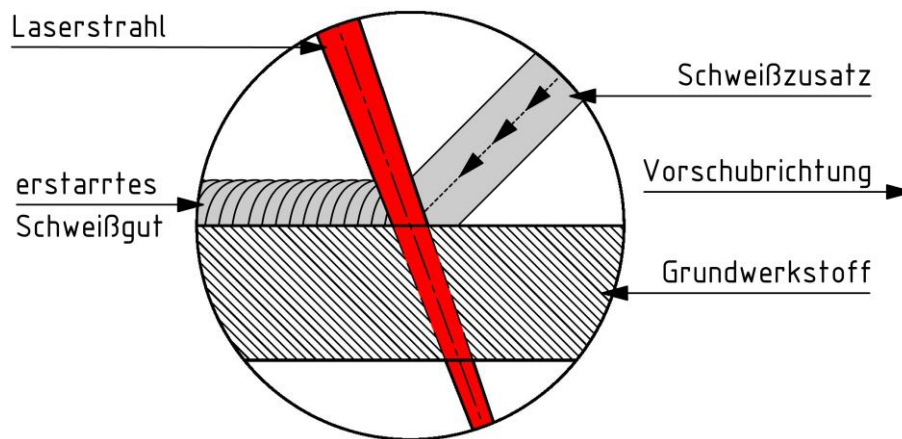


Abb. 48 - Ausschnitt der Schweißsituation mit 20° Anstellungswinkel (stechend v.2)

In Abb. 23 ist der Aufbau der Laserpistole dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Drahtvorschub unterhalb des Griffstückes befestigt ist. Um den Draht bei stechendem Schweißen entgegen der Schweißrichtung zuzuführen, muss die Laserpistole auf dem Kopf eingebaut werden. Dieses scheitert gleich an 2 Problemen. Zum einen ist der Abstand der Drahtzufuhr und der tatsächlichen Schweißstelle sehr groß (~ 30 - 40 mm). In Verbindung mit dem zum System gehörenden Drahtkoffer, der den Schweißzusatz zur Drahtzufuhr führt, ergibt sich das Problem, dass er sich aufrollt, sobald er aus der Drahtzufuhr kommt. Der Koffer verfügt nur über Antriebsrollen mit umlaufender V-Nut (für Stähle aller Art) für den Drahttransport. Aluminium muss zwingend mit einer umlaufenden U-Nut-Rolle befördert werden, da die V-Nut den Draht, bei der zum Transport notwendigen Anpresskraft, kalt verformt, so dass die Eigenspannung den Draht spiralförmig aus der Drahtzufuhr kommen lässt. Zusätze für Stähle haben dieses Problem nicht in solch ausgeprägter Form. Bei diesen Drähten (und auch beim Aluminiumdraht) kommt zum Tragen, dass sie auf Spulen aufgewickelt sind und ebenfalls über eine gewisse Verformung verfügen, so dass auch diese sich aufrollen.

Diesem Problem ließe sich einfach mit einer verlängerten Drahtzufuhr entgegenwirken, so dass das freie Ende in Richtung Schmelzbad verkürzt und somit eine Zwangsführung erwirkt wird. Für Aluminium sollte zwingend auf Antriebsrollen mit umlaufender U-Nut umgestellt werden. Beides stand jedoch zum Zeitpunkt der Versuche nicht zur Verfügung und bleibt somit eine rein theoretische Lösung des Problems.

10.6 Beenden der Versuche und Auswertung der Proben

Während der Schweißversuche musste ohne Hilfsmittel entschieden werden, ob ein Versuch erfolgreich gewesen ist, da zu dem Zeitpunkt keine Vier-Skalenlehre zur Verfügung stand. Dabei wurde mit bestem Wissen und Gewissen nach der 13919-1 und 13919-2 entschieden. Alle ausführlichen Untersuchungen wurden im Nachhinein separat ausgeführt.

Bei den ausgewerteten Proben handelt es sich um:

- Versuchsdurchführung S(tahl)#25, 3 weitere Versuche möglich
- Versuchsdurchführung C(hrom)#27, 1 weiterer Versuch möglich
- Versuchsdurchführung A(luminium)#27, letzter Versuch A#28 schlug fehl

Bei den im Versuchsablauf nicht zu ändernden Rahmenbedingungen handelt es sich um:

- kein dünnerer Schweißzusatz möglich (siehe 10.2)
- kein anderes technisches Gas vorhanden
- keine Möglichkeit, Schweißnahtvorbereitungen besser auszuführen
- Bauart der Laserpistole lässt keine stechende Ausführung zu

Es ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt anzunehmen, dass Änderungen der aufgeführten Bedingungen, besonders die Ausrichtung der Laserpistole, einen signifikanten Einfluss auf die Schweißnaht haben. Auf Grund der geringen Aussicht auf ein besseres Ergebnis durch Änderung der verbliebenen Parameter sowie der Tatsache, dass es sich bei den ausgewerteten Proben um die annähernd letzten möglichen Versuchsdurchführungen handelt, wurden diese für weitere Untersuchungen ausgewählt.

11. Zusammenfassung und Fazit

Gegenstand dieser Arbeit war die Qualifizierung typischer metallischer Konstruktionswerkstoffe für das Laserstrahlschweißen.

Zunächst wurde das Schweißverfahren, speziell in Hinsicht auf das Schweißen von Baustählen, austenitischen Stählen und Aluminium, vorgestellt. Die verwendeten zerstörungsfreien und zerstörenden Verfahren zur Werkstoffprüfung im Bereich der Schweißtechnik wurden aufgezeigt. Desweiteren wurden die Vorgaben aus den geltenden Regelwerken aufgegriffen und eine Übersicht über Fehler, die während einer Schweißung entstehen können, gegeben.

Die Versuchsvorbereitung, im speziellen die vorgenommene Defokussierung des Lasers und die Ermittlung der Parameter zur Charakterisierung der Schweißversuche sowie der prinzipielle Ablauf der Schweißungen wurden erklärt.

Die anschließende Auswertung der Proben zeigt, dass reine Sicht- und Farbeindringprüfung zwar durchaus ihre Berechtigung haben, jedoch innere Ungenzen dadurch nicht detektiert werden können, so dass andere zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie die Durchstrahlungsprüfung, zur Sicherung der Schweißnahtqualität unerlässlich sind. Nur mit dem Röntgenverfahren konnten die leider in allen Schweißnähten entstandenen Poren detektiert werden, denn Gefüge und Härteverläufe der einzelnen Proben waren unauffällig.

Die Fehleranalyse hat aufgezeigt, dass die inneren Poren und Porenzeilen aller Wahrscheinlichkeit nach nicht nur eine einzige Ursache haben, sondern eine Vielzahl von sich gegenseitig beeinflussenden Parametern die tatsächlich Ursache für deren Entstehung war. Ein auf breiter Front in die technische Praxis eingeführtes Verfahren kann also im Einzelfall durchaus misslingen und die Fehlerhaftigkeit kann trotz aller Sorgfalt erst im allerletzten Untersuchungsschritt entdeckt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die hohen Erwartungen an das Laserstrahlschweißen nicht erfüllt wurden. Mit konventionellen Schweißverfahren wären wahrscheinlich bessere Ergebnisse erzielt worden. Es sei jedoch angemerkt, dass das Schweißen mittels Laserstrahl bei passender apparativer Ausstattung grundsätzlich erfolgreich auf jedes schmelzschweißgeeignete Material angewendet werden kann. Das Kapitel 10 zeigt eine große Breite an möglichen Fehlerquellen auf, die sich auf die verwendete Prozesstechnik und Peripherie sowie die verwendeten Elektroden und Schutzgase zurückführen lassen.

Daher ist es wünschenswert, dass nachfolgend an einem Laserstrahl mit höherer Leistung der Einfluss der Prozessgase auf das Schmelzbad und die Entstehung des Laserplasmas systematisch untersucht wird, so dass die Ursache für die Entstehung der Poren lokalisiert werden kann, um letzten Endes normgerechte Ergebnisse zu erzielen.

12. Literaturverzeichnis

- [1] **Fachgruppe "Schweißtechnische Ausbildung an Hochschulen"**. *Fügetechnik Schweißtechnik (8., aktualisierte und erweiterte Ausgabe)*. Düsseldorf : DVS Media, 2012.
- [2] **Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.)**. *DIN 1910-100 - Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008-02.
- [3] **Schuler, Volkmar und Twrdek, Jürgen**. *Praxis Schweißtechnik (6. Auflage)*. Wiesbaden : Springer Verlag, 2019.
- [4] **Dilthey, Ulrich**. *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1 (3., bearbeitete Auflage)*. Berlin : Springer-Verlag, 2006.
- [5] **Bliedtner, Jens, Müller, Hartmut und Barz, Andrea**. *Lasermaterialbearbeitung*. München : Hanser, 2013.
- [6] **Ilschner, Bernhard und Singer, Robert F.** *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik (6. Auflage)*. Berlin : Springer Vieweg, 2016.
- [7] **Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.)**. *DIN EN 10020 - Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2000-07.
- [8] —. *DIN EN 10025-2 - Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen . Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2019-10.
- [9] **Roos, E., Maile, Karl und Seidenfuß, Michael**. *Werkstoffkunde für Ingenieure (6. Auflage)*. Berlin : Springer-Verlag GmbH, 2017.
- [10] **Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.)**. *DIN EN 10088-1 - Nichtrostende Stähle - Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014-12.
- [11] —. *DIN EN 573-3 - Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeugen - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2019-10.
- [12] —. *DIN EN 573-4 - Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeugen - Teil 4: Erzeugnisformen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1994-12.
- [13] **Ostermann, Friedrich**. *Anwendungstechnologie Aluminium (3. Auflage)*. Berlin : Springer Vieweg, 2014.
- [14] **Schulze, Günter**. *Die Metallurgie des Schweißens (4., neu bearbeitete Auflage)*. Heidelberg : Springer, 2009.
- [15] **Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.)**. *DIN EN ISO 5817 - Schweißen - Schmelzschweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschweißen) - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014-06.

- [16] —. *DIN EN ISO 10042 - Schweißen - Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen Legierungen - Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2019-01.
- [17] —. *DIN EN ISO 13919-1 - Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen - Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 1: Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2020-03.
- [18] —. *DIN EN ISO 13919-2 - Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen - Anforderungen und Empfehlungen für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten - Teil 2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2001-12.
- [19] —. *DIN EN ISO 17637 - Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017-04.
- [20] —. *DIN EN ISO 3452-1 - Zerstörungsfreie Prüfung - Eindringprüfung - Teil 1: Allgemeine Grundlagen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014-09.
- [21] —. *DIN EN ISO 19232-1 - Zerstörungsfreie Prüfung - Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen - Teil 1: Ermittlung der Bildgütezahl mit Draht-Typ-Bildgüteprüfkörpern*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013-12.
- [22] —. *DIN EN ISO 19232-3 - Zerstörungsfreie Prüfung - Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen - Teil 3: Bildgüteklassen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2014-02.
- [23] —. *DIN EN ISO 15614-11 - Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Teil 11: Elektronen- und Laserstrahlschweißen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2002-11.
- [24] —. *DIN EN ISO 17639 - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Makroskopische und mikroskopische Untersuchung von Schweißnähten*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013-12.
- [25] **Schiebold, Karlheinz**. *Zerstörende Werkstoffprüfung*. Berlin : Springer Vieweg, 2018.
- [26] **Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.)**. *DIN EN ISO 6507-1 - Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2018-07.
- [27] —. *DIN EN ISO 22826 - Zerstörende Prüfung von Schweißungen an metallischen Werkstoffen - Härteprüfung an durch Laser- und Elektronenstrahlschweißung hergestellten Schweißungen (Vickers- und Knoop-Härteprüfung)*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2021-05.
- [28] —. *DIN EN ISO 9692-1 - Schweißen und verwandte Prozesse - Arten der Schweißnahtvorbereitung - Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen, WIG-Schweißen und Stahlschweißen von Stählen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013-12.
- [29] —. *DIN EN ISO 9692-3 - Schweißen und verwandte Prozesse - Arten der Schweißnahtvorbereitung - Teil 3: Metall-Inertgasschweißen und Wolfram-Inertgasschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2016-11.

- [30] —. *DIN EN ISO 17635 - Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Allgemeine Regeln für metallische Werkstoffe*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2017-04.
- [31] **Technisches Ausschuß, Arbeitsgruppe "Lichtbogenschweißen"**. *Richtlinie DVS 0912 Teil 2: Metall-Schutzgasschweißen von Stahl - Richtlinie zur Verfahrensdurchführung - Vermeidung von Poren*. Düsseldorf : DVS Media Verlag, 1991-02.
- [32] **Informationsstelle Edelstahl Rostfrei**. *Merkblatt 823 - Schweißen von Edelstahl Rostfrei (5. überarbeitete Auflage)*. Düsseldorf : Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, 2019.
- [33] **Ausschuß für Technik, Arbeitsgruppe "Lichtbogenschweißen"**. *Merkblatt DVS 0913 Teil 3: MIG-Schweißen von Aluminium - Anwendungstechnische Hinweise*. Düsseldorf : DVS Media GmbH, 2008-05.
- [34] **Zopelis, Eimantas**. *Vortrag zum Laserstrahlschweißen mit dem FWS-1000*. DVS Wilhelmshaven, 29. 03 2022.
- [35] **Runzka, Michael**. GSI SLV Nord - SFI - Lehrgang Teil 3. *1.12.1 Sonderschweißprozesse - Laserstrahlschweißen*. Hamburg-Harburg, 29. 07 2022.
- [36] **Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.)**. *DIN EN ISO 6520-1 - Schweißen und verwandte Prozesse - Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen - Teil 1: Schmelzschweißen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2007-11.

13. Anhang

Anhang A: Schweißparameter des handgeführten Laserschweißsystems.....	70
Anhang B: Spezifikation des Laserschweißsystems.....	71
Anhang C: Datenblatt Kuka KR 6 R900-2.....	72
Anhang D: Datenblatt Argon 4.8	73
Anhang E: Massivdraht für Baustahl	74
Anhang F: Massivdraht für austenitischen Stahl	75
Anhang G: Massivdraht für Aluminiumlegierung	76
Anhang H: Schweißparameter 1.0038.....	77
Anhang I: Schweißparameter 1.4301	78
Anhang J: Schweißparameter 3.3535	79
Anhang K: Prüfbericht 1 - 1.0038	80
Anhang L: Prüfbericht 2 - 1.4301	88
Anhang M: Prüfbericht 3 - 3.3535	96

Anhang A: Schweißparameter des handgeführten Laserschweißsystems

Welding Data of Handheld Laser Welding System "Diodela FWS-series"												
WSF	t [mm]	Splicing Method	Weld Gap [mm]	Whether to Fill Wire	Wire Diameter [mm]	Defocus of Welding Head [mm]	Power [W]	Laser Frequency [Hz]	Duty Cycle [%]	Welding Head Wobble Frequency [Hz]	Line Width [mm]	Gas [l/min]
SS304 / 1.4301	2	Table Docking	< 0,4	No	-	5 - 10	700 - 1000	3000	80 - 90	8 - 16	2-3	15 - 20
			0,4 - 1	Yes	1		800 - 1200				2,5-3,5	
		90 degree internal angle	< 0,4	No	-		700 - 1000				2-3	
			0,4 - 1	Yes	1		800 - 1200				2,5-3,5	
		90 degree external angle	< 0,4	No	-		700 - 1000				2-3	
			0,4 - 1	Yes	1		800 - 1200				2,5-3,5	
EN AW-6060	2	Table Docking	< 0,4	No	-	5 - 10	1200 - 1300	3000	90 - 100	8 - 16	2-3	15 - 20
			0,4 - 1	Yes	1		1200 - 1300				2,5-3,5	
		90 degree internal angle	< 0,4	No	-		1200 - 1300				2-3	
			0,4 - 1	Yes	1		1200 - 1300				2,5-3,5	
		90 degree external angle	< 0,4	No	-		1200 - 1300				2-3	
			0,4 - 1	Yes	1		1200 - 1300				2,5-3,5	

Anhang B: Spezifikation des Laserschweißsystems

Modell	Dio-500	FWS-1000	FWS-1500	FWS-2000
Laserquelle	Diodenlaser	Faserlaser	Faserlaser	Faserlaser
Ausgangsleistung	500W	1000W	1500W	2000W
Anpassungsbereich der Leistung	10-100%			
Wellenlänge	1080 nm			
Ausgabeoperation	Kontinuierlich / Moduliert			
Modulationsfrequenz	Bis 50 kHz			
Leistungsstabilität	<3%			
Einstellbarer Planlauf (Schweißnaht)	0.1 - 5 mm			
Zentraler Fokusabstand	Standard 120 mm (150 mm optional)			
Kühlung	Integrierte Wasserkühlung			
Aufheizzeit	1 min			
Arbeitsfeuchtigkeit	<70% (bei 40 ° C)			
Betriebstemperatur	0 - 40 Grad Celsius			
Gewicht der Laserschweißpistole	< 1 kg			
Optische Kabellänge	Standard 8 m (bis zu 15 m optional)			
Gesamtmaße des Systems	550 x 500 x 650 mm	1200 x 600 x 1300 mm		
Systemgewicht	90 kg	120 kg	120 kg	130 kg
Energieversorgung	Einphasig 220 VAC	Einphasig 220 VAC	Einphasig 220 VAC	Dreiphasig 380 VAC
Leistungsaufnahme	<1.5 kW	<5 kW	<7 kW	<9 kW
Schweißnahtstärke (einmaliger Durchgang)	Bis zu 1 mm	Bis zu 2.5 mm	Bis zu 3.5 mm	Bis zu 5mm

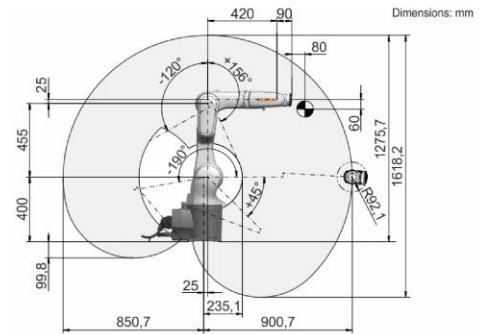
Anhang C: Datenblatt Kuka KR 6 R900-2



KR 6 R900-2



Workspace graphic



Technical data

Maximum reach	901 mm
Maximum payload	6.7 kg
Pose repeatability (ISO 9283)	± 0.02 mm
Number of axes	6
Mounting position	Floor; Ceiling; Wall;
Footprint	208 mm x 208 mm
Weight	approx. 55 kg

Axis data

Motion range	
A1	±170 °
A2	-190 ° / 45 °
A3	-120 ° / 156 °
A4	±185 °
A5	±120 °
A6	±350 °

Operating conditions

Ambient temperature during operation	0 °C to 45 °C (273 K to 318 K)
--------------------------------------	--------------------------------

Protection rating

Protection rating (IEC 60529)	IP65 / IP67
Protection rating, robot wrist (IEC 60529)	IP65 / IP67

Controller

Controller	KR C5 micro; KR C4 compact
------------	-------------------------------

Certificates

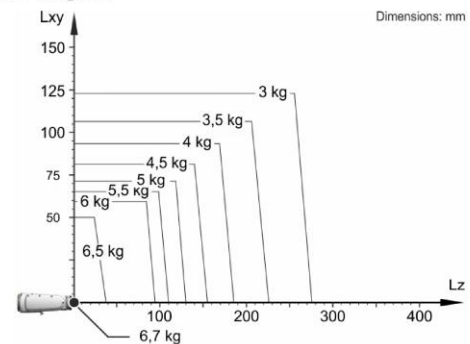
ESD requirements	IEC61340-5-1; ANSI/ESD S20.20
------------------	-------------------------------

Cycle time

150 cycles per minute (25 mm / 305 mm / 25 mm, 1 kg)
--

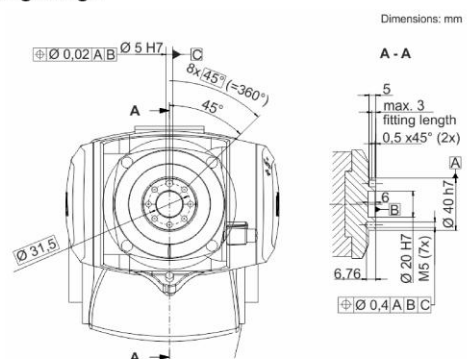


Payload diagram



The KR 6 R900-2 is designed for a rated payload of 3 kg in order to optimize the dynamic performance of the robot. The maximum payload of 6.7 kg applies only if the position of the center of mass is 0 mm and a supplementary load optimized for the load case is mounted. The specific load case must be verified using KUKA.Load or KUKA Compose. For further consultation, please contact KUKA Support.

Mounting flange



Details provided about the properties and usability of the products are purely for information purposes and do not constitute a guarantee of these characteristics. The extent of goods delivered and services performed is determined by the subject matter of the specific contract. No liability accepted for errors or omissions.
0000-290-001 / V13.1 / 27.05.2022 / en
KUKA Deutschland GmbH Zugspitzstrasse 140, 86165 Augsburg, Germany. Tel.: +49 821 797-4000, www.kuka.com

Anhang D: Datenblatt Argon 4.8

→ Produktdatenblatt



Argon 4.8 für Spektrometrie

(Erfüllt die Anforderungen der Norm DIN EN ISO 14175: I1)

Reinheit in %: $\geq 99,998$

Nebenbestandteile, ppm:		
N ₂		≤ 10
O ₂		≤ 3
H ₂ O		≤ 5
KW		≤ 0,5

Angaben sind als ideale Volumenanteile (= Molanteile) zu verstehen

Lieferarten: **Stahlflasche**

Rauminhalt, [Liter]	Füllmenge, ca. [m ³]	Fülldruck, ca. [bar]	Gesamtgewicht, mit Füllung ca. [kg]	Aussen-Ø, ca. [mm]	Gesamtlänge ca. [mm]
10	2,13	200	20	140	970
20	4,27	200	40	204	950
50	10,7	200	80	229	1640
50	15,2	300	90	229	1700

Flaschenbündel

Rauminhalt, [Liter]	Füllmenge, ca. [m ³]	Fülldruck, ca. [bar]	Anzahl Flaschen im Bündel	Gesamtgewicht, mit Füllung ca. [kg]	Maße ca. (H x L x B)[mm]
600	128	200	12	1320	1900 x 980 x 770
600	182	300	12	1460	1900 x 980 x 770

LIPAC® duo

Rauminhalt, [Liter]	Füllmenge, ca. [m ³]	Fülldruck, ca. [bar]	Anzahl Flaschen im Bündel	Gesamtgewicht, mit Füllung ca. [kg]	Maße ca. (H x L x B)[mm]
600	182	300	12	1460	1900 x 980 x 770

Weitere Lieferarten auf Anfrage.

Umrechnungszahlen:	m ³ Gas (15°C, 1 bar)	l flüssig bei T _s	kg
	1	1,197	1,669
	0,835	1	1,394
	0,599	0,717	1

Linde GmbH

Gases Division, Seitnerstrasse 70, 82049 Pullach, Deutschland
 Telefon: 0800-0530 530 0, Telefax: 0800-0530 530 11, www.linde-gas.de

Zur Sicherstellung eines hohen Niveaus der Kundenbetreuung werden Daten unserer Kunden wie z.B. Telefonnummern elektronisch gespeichert und verarbeitet.

Änderungen vorbehalten
 Stand 07.08.2017

Anhang E: Massivdraht für Baustahl

Weld G3Si1



Drahtelektrode

ISO 14341-A	G 3Si1 (Drahtelektrode)
ISO 14341-A	G 42 3 M21 3Si1 / G 38 2 C1 3Si1
SFA/AWS A5.18	ER70S-6

Kurzcharakteristik

Universell einsetzbare, verkupferte Allpositions-Drahtelektrode der Güte G3Si1 für Verbindungsschweißungen an allgemeinen un- und niedriglegierten Stählen. Die Drahtelektrode kann unter Mischgas (bevorzugt M21) oder C1 verschweißt werden. CE-Konformität nachgewiesen und nach Europäischer Bauproduktenverordnung einsetzbar, DB-zugelassen, TÜV-eignungsgeprüft.

Grundwerkstoffe

P235 / S235 - P420 / S420 u.ä.

siehe Schweißweiser Abschnitt

Schutzgase nach EN ISO 14175

M21 / C1

Durchmesser [mm]

0,8 1,0 1,2

Stromeignung

= +

Schweißposition



Richtanalyse des Drahtes [%]

C	Si	Mn
0,1	0,85	1,5

Gütwerte des reinen Schweißgutes

Wärme- behandlung	Schutzgas	Dehngrenze N/mm ²	Festigkeit N/mm ²	Dehnung %	Kerbschlagarbeit ISO-V J	
					-20°C	-30°C
U	M21	≥ 420	500-640	≥ 20	≥ 47	≥ 47
U	C1	≥ 380	470-600	≥ 20	≥ 47	

Leistungsdaten

Durchmesser 0,8 mm			Durchmesser 1,0 mm			Durchmesser 1,2 mm		
Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h	Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h	Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h
60	18	0,8	80	18	1,0	120	18	1,3
180	22	2,6	250	32	5,5	330	35	8,0

Spulentyp

67 (Korbspule BS300; 15 kg)

Zulassungen (siehe auch Draht/Pulver-Kombination)

CE, DB, TÜV

siehe Abschnitt Q

Anhang F: Massivdraht für austenitischen Stahl

Legierungstyp
19 12 3 L Si / 316LSi

OK Autrod 316LSi

**Drahtelektrode**

EN ISO 14343-A	G 19 12 3 L Si
SFA/AWS A5.9	ER316LSi
Werkstoffnummer (DIN 8556)	1.4430 (SG X 2 CrNiMo 19 12)

Kurzcharakteristik

Austenitische Drahtelektrode für artähnliche stabilisierte und nicht stabilisierte CrNi- und CrNiMo-Stähle, insbesondere im Chemieanlagenbau. Hitze- und zunderbeständig bis 800°C, bei Nasskorrosion bis 400°C einsetzbar. Nicht ausreichend beständig gegen Salpetersäureangriff.

Grundwerkstoffe

siehe Schweißweiser Abschnitt

1.4301, 1.4306, 1.4401, 1.4404, 1.4435, 1.4541, 1.4550, 1.4571, 1.4583 u. ä.

Schutzgase nach EN ISO 14175

M12, M13

Durchmesser [mm]

0,8 1,0 1,2 1,6

Stromeignung

= +

Schweißposition**Richtanalyse des Drahtes [%]**

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,02	0,8	1,8	18,5	12	2,7

Gütwerte des reinen Schweißgutes

Wärme- behandlung	Schutzgas	Dehngrenze		Festigkeit		Dehnung		Kerbschlagarbeit	
		R _{p0,2}	N/mm ²	R _m	N/mm ²	A ₅	%	ISO-V	J
U	M12	≥ 320		560		30		≥ 90	≥ 32
								-60°C	-120°C

Leistungsdaten

Durchmesser 1,0 mm			Durchmesser 1,2 mm		
Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h	Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h
80	15	1,4	100	15	1,6
240	28	5,5	300	29	6,8

Spulentyp

95 (MarathonPac 100 kg) 93 (MarathonPac 250 kg) 98 (BS 300; 15kg)

Zulassungen (siehe auch Draht/Pulver-Kombination)

siehe Abschnitt Q

CE, DNV, DB, TÜV, CWB

Anhang G: Massivdraht für Aluminiumlegierung

Legierungstyp
5183 / AlMg4,5Mn0,7(A)

OK Autrod 5183



Drahtelektrode

EN ISO 18273	S Al 5183 (AlMg4.5Mn0.7(A))
SFA/AWS A5.10	ER5183
(DIN 1732)	(SG-AlMg4,5Mn)
(Werkstoffnummer)	(3.3548)

Kurzcharakteristik

MIG-Schweißdraht für AlMg- und AlMgMn-Legierungen. Magnesium wirkt festigkeitssteigernd, der Mn-Anteil verbessert die Stabilität bei höheren Temperaturen. Das Schweißgut ist seewasserbeständig und wird bevorzugt im Schiffbau eingesetzt. Vielseitig für Aluminiumkonstruktionen hoher Festigkeit einsetzbar, jedoch nicht für erhöhte Temperaturen. Eignungsgeprüft für den Temperaturbereich von -196°C bis +80°C. Nicht geeignet für die anodische Nachbehandlung, Mn führt zu einer weißen bis hellgrauen Färbung.

Grundwerkstoffe

siehe Schweißweiser Abschnitt

5019 (AlMg5); 5083 (AlMg4,5Mn0,7); 5086 (AlMg4); 7020 (AlZn4,5Mg1) u. ä.

Schutzgase nach EN ISO 14175

I1 - I3

Durchmesser [mm]

1,0 1,2 1,6 2,4

Stromeignung



Schweißposition



Richtanalyse des Drahtes [%]

	Al	Mg	Mn	Cr
Basis		4,7	0,7	0,15

Gütwerte des reinen Schweißgutes

Wärme- behandlung	Schutzgas	Dehngrenze R _{p0,2} N/mm ²	Festigkeit R _m N/mm ²	Dehnung A ₅ %	Kerbschlagarbeit ISO-V Rt J
U	I1	140	290	25	30

Leistungsdaten

Durchmesser 1,0 mm			Durchmesser 1,2 mm			Durchmesser 1,6 mm		
Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h	Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h	Schweiß- strom A	Spannung V	Abschmelz- leistung kg/h
90	15	0,6	140	20	0,9	190	25	1,2
210	26	1,6	260	29	2,1	350	30	3,3

Spulentyp

46-2 (Dornspule S 200; 2 kg) 98-7 (Korbspule BS 300; 7 kg) 94-4 (MarathonPac Jumbo; 141 kg)

Zulassungen (siehe auch Draht/Pulver-Kombination)

siehe Abschnitt Q

CE, ABS, BV, CWB, LR, DNV, GL, DB, TÜV

Anhang J: Schweißparameter 3.3535

#	Leistung [W]	Duty Cycle [%]	Frequenz [Hz]	Spurbreite [mm]	Drahtvorschub [m/min]	Z-Wert OK [mm]	Vorschub [m/s]	Laserstrahl [°]	Volumenstrom [l/min]	Winkel	
										Draht	Bewertung
A#01	1000	90	10	2,8	-	-7,50	0,018	20	21	-	Decklagenunterwölbung / Flankenbindefehler
A#02	1000	90	8	3,0	-	-7,50	0,020	20	21	-	Decklagenunterwölbung / Flankenbindefehler
A#03	1000	90	8	3,0	-	-7,50	0,019	20	21	-	Geringer Wurzerückfall
A#04	1000	90	8	2,8	-	-7,50	0,018	20	21	-	beginnende Materialflucht
A#05	1000	90	8	2,8	-	-7,50	0,017	20	21	-	stärkere Materialflucht
A#06	1000	90	8	3,0	010	-7,50	0,010	20	21	-	Starker Wurzerückfall / Flankenbindefehler
A#07	1000	90	8	2,4	010	-7,50	0,020	20	21	-	Fehlende Wurzel
A#08	1000	90	10	2,8	010	-7,50	0,020	20	21	-	Beginnende Wurzelausträgung
A#09	1000	90	8	2,4	015	-7,50	0,018	20	21	-	Draht schmilzt vor MaterialOK
A#10	1000	90	8	2,4	015	-7,50	0,018	20	21	-	Beginnender Durchbrand / Tropfenbildung Schweißdraht
A#11	1000	90	10	2,8	015	-7,50	0,020	20	21	-	Fehlende Wurzel / Tropfenbildung Schweißdraht
A#12	1000	90	10	3,0	010	-7,50	0,017	20	21	-	Beginnende Wurzeausprägung
A#13	1000	90	8	3,0	010	-7,50	0,015	20	21	-	Beginnende Wurzeausprägung
A#14	1000	100	8	3,0	010	-7,50	0,015	20	21	-	Rückfall Wurzel
A#15	1000	100	8	3,0	015	-7,50	0,015	20	21	-	Unregelmäßige Wurzel
A#16	1000	100	8	3,0	015	-7,50	0,013	20	21	-	Tropfenbildung an Wurzel
A#17	1000	100	8	3,0	018	-7,50	0,013	20	21	-	stärkere Tropfenbildung an Wurzel (Materialübergang Draht)
A#18	1000	100	8	3,0	020	-7,50	0,013	20	21	-	Wurzel wird besser (etwas ungleichmäßig)
A#19	1000	100	8	3,0	022	-7,50	0,012	20	21	-	Drahtstau
A#20	1000	100	8	3,0	022	-7,50	0,012	20	21	-	Drahtstau
A#21	1000	100	8	3,0	022	-7,50	0,012	20	21	-	Bisher beste Wurzel
A#22	1000	100	8	3,0	023	-7,50	0,011	20	21	-	Porenbildung in Wurzelberseite
A#23	1000	100	8	2,6	023	-7,50	0,011	20	21	-	Relativ gleichmäßige Wurzel
A#24	1000	100	8	2,6	023	-7,50	0,010	20	21	-	Wurzel gut / Decklage beginnende Porenbildung
A#25	1000	100	8	2,6	024	-7,50	0,010	20	21	-	Weiterhin vereinzelte Poren auf Oberseite der Naht
A#26	1000	100	8	2,6	024	-7,50	0,010	20	21	-	5 Poren Oberseite
A#27	1000	100	8	2,6	025	-7,50	0,011	20	21	-	Schweißnaht bewerten
A#28	1000	100	8	2,6	025	-7,50	0,011	20	21	-	Kleine Poren auf Oberseite

Anhang K: Prüfbericht 1 - 1.0038



DIN EN ISO 13919-1 2020-03		Bewertungsgruppe			max. Abweichung	Bewertung
Merkmale	ISO 13919 ISO 6520	D	C	B	zulässig ist	e=erfüllt ne = nicht erfüllt
1. Oberflächenunregelmäßigkeiten						
	1.1 100	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.2 104	zulässig	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					entfällt	<input type="checkbox"/> ne
	1.3 2017/516	d≤0,3t; max 3 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.4 2025	hs0,4t	hs0,3t	hs0,2t	0,4 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					entfällt	<input type="checkbox"/> ne
	1.5 4013	ls0,25t max 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.6 4021	ls0,25t oder 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.7 5011/5012	hs0,15t; max 1 mm	hs0,1t; max. 0,5 mm	hs0,05t; max. 0,5 mm	0,1 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.8 515	hs0,3t max 1 mm	hs0,2t max. 0,5 mm	hs0,1t; max. 0,5 mm	0,2 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.9 502	hs0,2mm +0,3t o. 5 mm	hs0,2mm +0,2t o. 5 mm	hs0,2mm +0,15t o. 5 mm	0,5 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,4 mm	<input type="checkbox"/> ne
	1.10 504	hs0,2mm +0,3t o. 5 mm	hs0,2mm +0,2t o. 5 mm	hs0,2mm +0,15t o. 5 mm	0,5 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,4 mm	<input type="checkbox"/> ne
	1.11 506	hs0,2b	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.12 509/511	hs0,3t; oder 1 mm	hs0,2t; oder 0,5 mm	hs0,1t; oder 0,5 mm	0,2 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.13 510	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.14 602	Abhängig von Verwendung, z. B. Werkstoff Korrosionsschutz			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
2. Innere Unregelmäßigkeiten						
	2.1 100	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.2 1001	zulässig	Abhängig v on Werkstoffart (Rissanfälligkeit)		nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.3 200	d≤0,5t; oder 5 mm	d≤0,4t; oder 3 mm	d≤0,3t; oder 2 mm	0,6 mm	<input type="checkbox"/> e
					Ø > 0,6 mm	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	2.4 2013/2014	d≤0,5t; oder 5 mm	d≤0,4t; oder 3 mm	d≤0,3t; oder 2 mm	0,6 mm	<input type="checkbox"/> e
					Porenzeile	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	2.5 202	Es gelten die Grenzwerte für die Porosität			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.6 300	nicht relevant			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.7 4011	hs0,25t; oder 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.8 402	hs0,15t; oder 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.10 403	Abhängig v on Kundenanforderungen ohne Unregelmäßigkeiten			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
3. Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie						
	3.1 507	hs0,2mm +0,25t	hs0,2mm +0,15t	hs0,2mm +0,1t	0,4 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,25 mm	<input type="checkbox"/> ne
	3.2 508	4°	2°	1°	1°	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,5°	<input type="checkbox"/> ne

Allgemeine Angaben	
Teilbezeichnung	ISO 9606-1 52 P BW FM1 S t2,0 PA ssnb
Prüfumfang	100 %
Werkstoff	S235JR (1.0038)
OF-Zustand	gebeizt und geölt

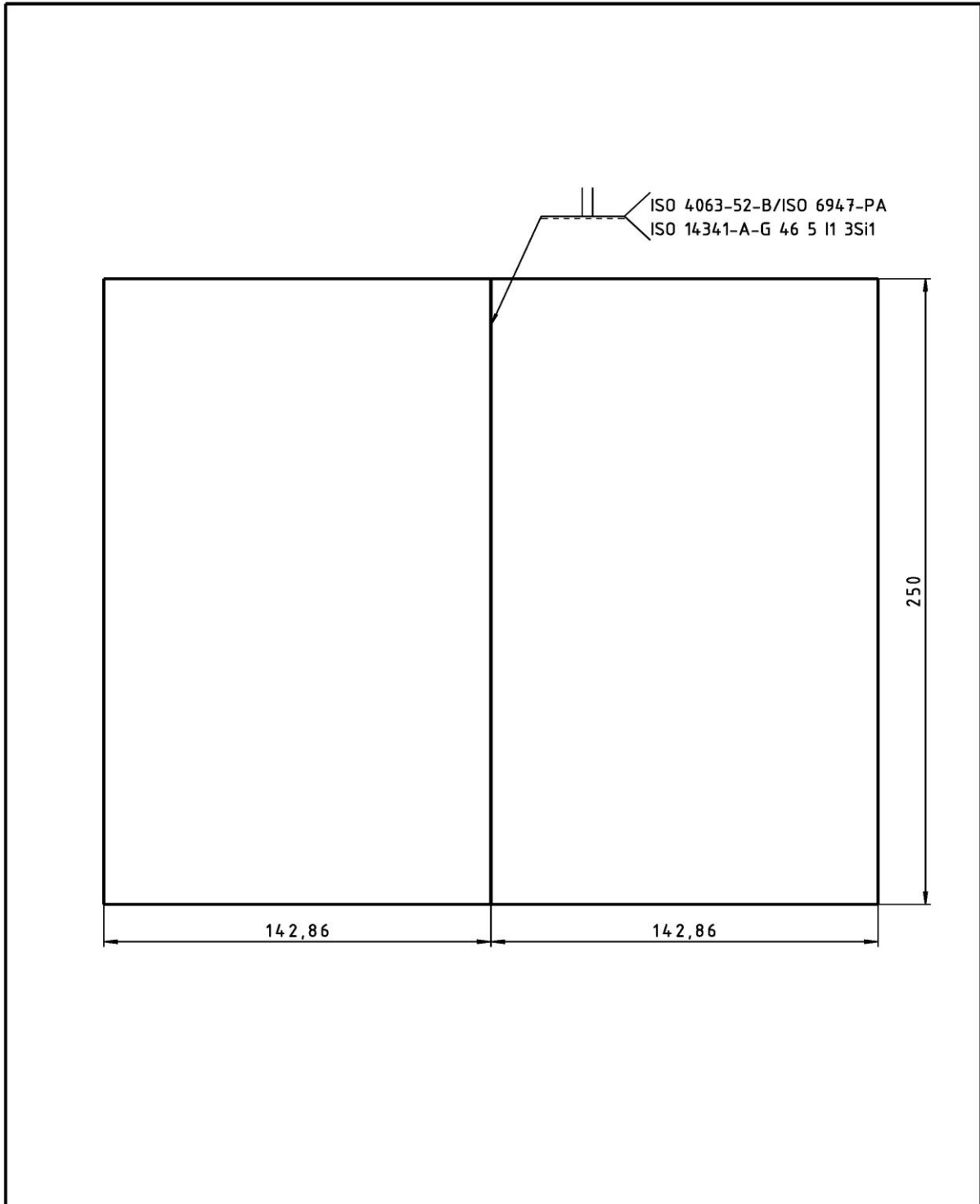
Angaben zum Prüftechnik	
Bewertungsnom	13919-1 / 3452-1 / 17636-2
Beleuchtungsstärke	630 lx
Betrachtungsmittel	n. v.
Hilfsmittel	4-Skalenlehre


Allgemeines Nahtaussehen	
Gleichmäßigkeit	<input checked="" type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> brauchbar <input type="checkbox"/> schlecht
Einbrandkerben	<input checked="" type="checkbox"/> keine (gut) <input type="checkbox"/> gering (brauchbar) <input type="checkbox"/> vorhanden (schlecht)
Aussehen der Wurzel	<input checked="" type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> brauchbar <input type="checkbox"/> schlecht



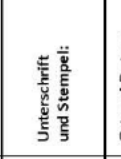
Allgemeine Notizen	
Prozess	Laserstrahl (52)
Arbeitsumgebung	Schweißzelle
Material	mit Tafelschere vorbereitet
Prüfung	VT (001-VT-01-1.0038) PT (004-PT-01-1.0038) RT (007-RT-01-1.0038)


Gesamtbewertung	
<input type="checkbox"/> Anforderungen wurden erfüllt	
<input checked="" type="checkbox"/> Anforderungen wurden nicht erfüllt	

Halbe Maßeinheiten
Ort und Datum, Name des Prüfers




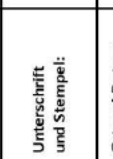
Erstellt durch Michael Thomeßen	Projekt Bachelorarbeit	Zeichnungs-Nr. 1	
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences	Dokumentenart Fertigungszeichnung	Dokumentenstatus freigegeben	
	Titel, Zusätzlicher Titel Schweißverfahrensprüfung Prüfstück Längsstumpfnah Laserschweiß (52)	Werkstoff 1.0038	Dicke 2 mm
		Änd. Ausgabedatum A 14.07.2022	Spr. Blatt de 1/3


		VT Prüfbericht DIN EN ISO 13919-1		Bericht Nr.: 001-VT-01-1.0038	
				Berichtsdatum: 22.07.2022	
				Seite: 1 von 2	
Kunde:	Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.:	n. v.	Pos.-Nr.:	1/3
Zeichnungs-Nr. (Rev.):	Fertigungszeichnung 1	Fabrik-Nr.:	n. v.	Prüfgegenstand:	ISO 9606-1 S2 P BW FM1 S12.0 PA ssnb
Prüfanweisung (Rev.):	n. v.	Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-8			
Grundwerkstoff:	5235JR (1.0038)	Abmessungen (Dicke):	2 mm	Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063: Laserstrahlschweißen (S2)	
Oberflächenzustand:	<input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> gestraht <input type="checkbox"/> beschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> gebeizt und geölt	Wärmebehandlung:		<input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach	Stumpfnahht (BW)
Prüfbericht:	Schweißnaht (SN) + 10 mm Wärmeeinflusszone (WEZ) Prüfumfang: 100 %	Schweißnahtgeometrie:			
Prüfbedingung / Technik:	<input checked="" type="checkbox"/> Direkte Sichtprüfung: <input type="checkbox"/> Indirekte Sichtprüfung: <input type="checkbox"/> Lichtdurchlässige Sichtprüfung:	Betrachtungswinkel: > 30°		Betrachtungsabstand: > 600 mm	
Prüfgerät:	4-Skalen-Lehre	Prüfgeräte Hersteller:	SLV	Prüfgerät (SN):	n. v. Kalibrierdatum: n. v.
Weiteres Prüfgerät:	n. v.	Prüfgeräte Hersteller:	n. v.	Prüfgerät (SN):	n. v. Kalibrierdatum: n. v.
Beleuchtungsstärke:	630 lx	Lichtstärkemessgerät Hersteller:	Trotec BF06	Lichtstärkemessgerät (SN):	190604972 Kalibrierdatum: 12.05.2022
Abkürzungen (DIN EN ISO 6520-1)					
100	Riss	<input type="checkbox"/> 4013	Wurzelbindefehler	<input type="checkbox"/> 502	Nahüberhöhung
104	Endkateriss	<input type="checkbox"/> 4021	Ungenügender Wurzelanbrand	<input type="checkbox"/> 504	Wurzelüberhöhung
2017	Oberflächenpore	<input type="checkbox"/> 5011	Durchlaufende Einbrandkerbe	<input type="checkbox"/> 506	Schweißgutüberlauf
516	Wurzelporosität	<input type="checkbox"/> 5012	Nicht Durchlaufende Einbrandkerbe	<input type="checkbox"/> 509	verlaufenes Schweißgut
2025	offener Endkaterlunker	<input type="checkbox"/> 515	Wurzelnickfall	<input type="checkbox"/> 511	Decklagenunterwölbung
Prüfergebnis:	<input checked="" type="checkbox"/> Keine Unganzen <input type="checkbox"/> Zulässige Unganzen <input type="checkbox"/> Unzulässige Unganzen	Datum der VT Prüfung: 21.07.2022			
Anforderungen:	<input checked="" type="checkbox"/> erfüllt <input type="checkbox"/> nicht erfüllt	Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel			
Prüfer:	Michael Thomeßen	Stufe nach DIN EN ISO 9712:	n. v.	Prüfaufsicht:	Björn Rosenburg
Unterschrift und Stempel:		Unterschrift und Stempel:		Stufe nach DIN EN ISO 9712: 2	
Ort und Datum:	Halstenbek den 22.07.2022	Ort und Datum:	Halstenbek den 22.07.2022	ZfP-Gelände Weg 6a · 25482 Aylpen Tel.: 09132 / 810.1000	

	VT Prüfbericht DIN EN ISO 13919-1	
	Bericht Nr.: 001-VT-01-1.0038	
	Berichtsdatum: 22.07.2022	
	Seite: 2	von 2

Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel





		PT Prüfbericht DIN EN ISO 3452-1		Bericht Nr.: 004-PT-01-1.0038 Berichtsdatum: 22.07.2022 Seite: 1 von 2	
		Kunde: Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.: n. v.	Pos.-Nr.: 1/3	Projekt: Bauchelarbeit
		Zeichnungs-Nr. (Rev.): Fertigungszeichnung 1	Fabrik-Nr.: n. v.	Prüfgegenstand: ISO 9606-1 S2 P BW FM1 S12.0 PA 55nb	
Prüfanweisung (Rev.): n. v.		Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-8			
Grundwerkstoff: 5235JR (1.0038)	Abmessungen (Dicke): 2 mm		Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063: Laserstrahlschweißen (S2)		
Oberflächenzustand: <input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> ges taht <input type="checkbox"/> beschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> geätzt und geölt	<input type="checkbox"/> mit Zwischenreiniger: <input checked="" type="checkbox"/>		Wärmebehandlung: <input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach		
Prüfbereich: Schweißnaht (SN) + 10 mm Wärmeeinflusszone (WEZ)	Prüfumfang: 100 %	Beaiteiltemperatur: 25 °C	Thermometer Seifen Nr.:	Kalibrierdatum: -	
Vorreinigung: <input checked="" type="checkbox"/> sofort <input type="checkbox"/> 15 min <input type="checkbox"/> 30 min <input checked="" type="checkbox"/> 60 min <input type="checkbox"/> 120 min	Dauer bis Aufbringen des Eindringmittels: 5 min		Eindringmittel Typ: <input checked="" type="checkbox"/> sichtbar <input checked="" type="checkbox"/> fluoreszierend		
Eindringmittel Hersteller: Helling	Bezeichnung: Nord-Test Rot 3000	Chargen-Nr.: 3494/04/2019		Eindringdauer: 20 min	
Eindringmittel- Typ gem. ISO 3452-1: <input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input checked="" type="checkbox"/> III	Art der Aufbringung: <input type="checkbox"/> sprühen <input checked="" type="checkbox"/> pinseln <input type="checkbox"/> tauchen	Chargen-Nr.: R39838/01/2022		Eindringdauer: 20 min	
Zwischenreiniger Hersteller: Helling	Bezeichnung: Reiniger U87	Chargen-Nr.: R39842/01/2022		Dauer bis Aufbringen des Entwicklers: 5 min	
Zwischenreiniger-Verfahren gem. ISO 3452-1: <input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> E	Bezeichnung: Entwickler U89	Chargen-Nr.: R39842/01/2022		Entwicklungsdauer: 20 min	
Entwickler Hersteller: Helling	Bezeichnung: <input type="checkbox"/> a <input type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c <input type="checkbox"/> d <input checked="" type="checkbox"/> e	Halogen Gehalt $\leq 0,1$ Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein			
Entwickler- Art gem. ISO 3452-1: <input type="checkbox"/> sofort <input type="checkbox"/> 15 min <input type="checkbox"/> 30 min <input checked="" type="checkbox"/> 60 min <input type="checkbox"/> 120 min	Schwefel Gehalt $\leq 0,1$ Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein		Halogen Gehalt $\leq 0,1$ Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein		
Analyse des Eindringensystem: Schwefel Gehalt $\leq 0,1$ Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein		Halogen Gehalt $\leq 0,1$ Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein			
Beurteilung nach: <input type="checkbox"/> sofort <input type="checkbox"/> 15 min <input type="checkbox"/> 30 min <input checked="" type="checkbox"/> 60 min <input type="checkbox"/> 120 min		Beleuchtungseinrichtung: Hallenbeleuchtung		Augenadaptionszeit: 60 min	
Beleuchtungsstärke: 630 lx		Lichtstärkemessgerät (SN): Trotec BF06		Kalibrierdatum: 12.05.2022	
Prüfergebnis: <input checked="" type="checkbox"/> keine oder nicht relevante Anzeigen <input type="checkbox"/> relevante Anzeigen <input type="checkbox"/> Unzulässige Ungenauigkeiten		Datum der PT Prüfung: 21.07.2022		Nachreinigung durchgeführt: <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
Anforderungen: <input checked="" type="checkbox"/> erfüllt <input type="checkbox"/> nicht erfüllt		Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel			
Prüfer: Michael Thomeßen		Stufe nach DIN EN ISO 9712: n. v.		Prüfaufsicht: Björn Rosenburg	
Unterschrift und Stempel:		Unterschrift und Stempel:		 Ziegelerweg 6a · 35482 Aßper Tel.: 04322 / 850-3000	
Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022		Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022		Stufe nach DIN EN ISO 9712: 2	

	PT Prüfbericht DIN EN ISO 3452-1	
	Bericht Nr.: 004-PT-01-1.0038	
	Berichtsdatum: 22.07.2022	
	Seite: 2	von 2

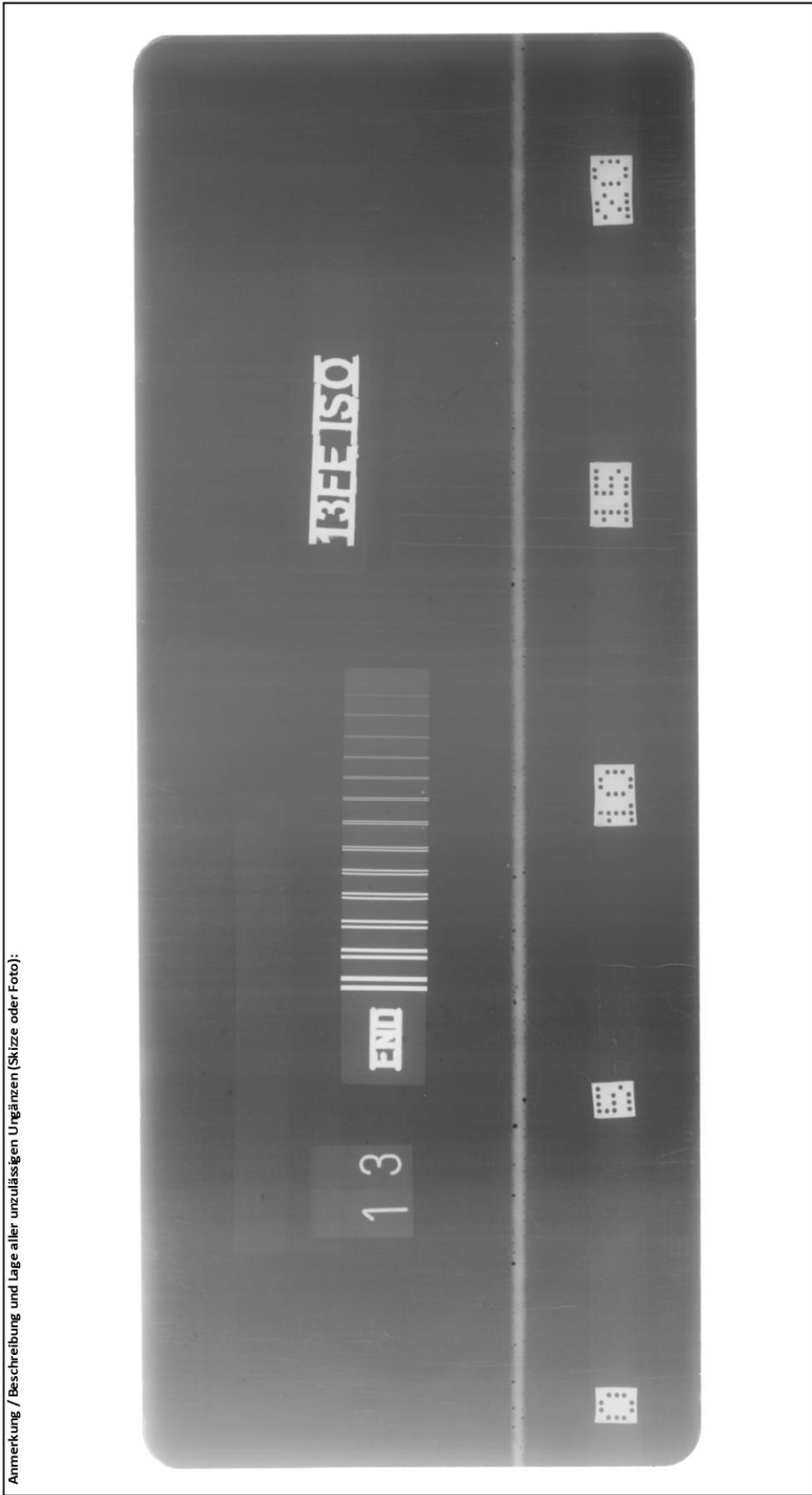
Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel



		RT Prüfbericht DIN EN ISO 17636-2		Bericht Nr.: 007-RT-01-1.0038						
				Berichtsdatum: 26.07.2022						
				Seite: 1 von 2						
Kunde:	Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.:	n. v.	Pos.-Nr.:	1/3	Projekt:	Bachelorarbeit			
Zeichnungs-Nr. (Rev.):	Fertigungszeichnung 1	Fabrik-Nr.:	n. v.	Prüfgegenstand:				ISO 9606-1 S2 P BW FMLS 12,0 PAsrb		
Prüfanweisung (Rev.):	n. v.	Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung:						ISO 13919-1-B		
Grundwerkstoff:	5235JR (1.0038)	Abmessungen (Dicke):		2 mm		Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063:		Laserschweiß (S2)		
Oberflächenzustand:	<input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> gestraht <input type="checkbox"/> geschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> gebeizt und geölt	Wärmebehandlung:		<input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach		Schweißnahtgeometrie:		Stumpfnah (BW)		
Prüfbericht:	Schweißnaht (SN) + 10 mm Wärmeeinflusszone (WEZ) <input type="checkbox"/> Prüfungsfang: 100%	Strahlentyp:		Yxlon Y-MG226		max. Röhrenspannung:		226 kV		
<input checked="" type="checkbox"/> RT Technik – Grundtechnik <input type="checkbox"/> Klasse A <input checked="" type="checkbox"/> Klasse B	Strahlenquelle:	Röntgenröhrentyp:		Metal-Keramik		Datum der RT Prüfung:		21.07.2022		
<input checked="" type="checkbox"/> RT Technik – verbesserte Prüftechnik	Art des Brennflecks:	Größe des Brennflecks (d):		0,4 mm x Innm		Filmmaße:		250 x 100 mm		
Strahlenquelle Seriennummer:	n. v.	Scanner:		HD-CR 35		Auflösung:		1270 x 1270 DPI		
Film Hersteller:	Dürr NDT	Filmtyp:	Sperchierfolie							
Abkürzungen (DIN EN ISO 6520-1)										
100	Risse	<input type="checkbox"/> 200	Hohlraum	<input checked="" type="checkbox"/> 2014	Porenzeile	<input checked="" type="checkbox"/> 300	feiner Einschluss	<input type="checkbox"/> 402	ungenügende Durchschweißung	
1001	Mikroniss	<input type="checkbox"/> 2013	Porennest	<input type="checkbox"/> 202	Lunker	<input type="checkbox"/> 4001	Brieffehler	<input type="checkbox"/> 403	Spikbildung	
Filmidentifikation:	13	Aufnahmeanordnung (Bild) nach DIN EN ISO 1		verwendete Röhrenspannung: 115 kV		verwendeter Röhrenstrom:		15 mA		
Typ des Bildgüteprüfkörpers (BRK):	13 FE ISO	Mindestbildgütezahl (BZ):		D 13 erreichte Bildgütezahl D 13+		max. Ureschärfe:		0,08 mm		
Bermerkung:		einzelne Poren $\geq \varnothing 0,6$ mm; Porenzeilen rechts und links vom Stoß							Belichtungszeit: 20 s	
Prüfergebnis:		<input type="checkbox"/> keine oder nicht relevante Anzeigen		<input type="checkbox"/> Relevante Anzeigen		<input checked="" type="checkbox"/> Unzulässige Ungenzen		Datum der RT Prüfung: 25.07.2022		
Anforderungen:		<input type="checkbox"/> erfüllt <input checked="" type="checkbox"/> nicht erfüllt		Anlage: Röntgenaufnahme der Schweißnaht						
Prüfer:		Michael Thomeßen		Stufe nach DIN EN ISO 9712:		n. v.		Prüfaufsicht:		
Unterschrift & Stempel:				Unterschrift und Stempel:						
Ort und Datum:		Halstenbek 22.07.2022		Ort und Datum:						

	RT Prüfbericht DIN EN ISO 17636-2	Bericht Nr.: 007-RT-01-1.0038
		Berichtsdatum: 26.07.2022
Seite: 2 von 2		

Anlage: Röntgenaufnahme der Schweißnaht



Anhang L: Prüfbericht 2 - 1.4301



DIN EN ISO 13919-1 2020-03		Bewertungsgruppe			max. Abweichung	Bewertung
Merkmale	ISO 13919 ISO 6520	D	C	B	zulässig ist	e=erfüllt ne = nicht erfüllt
1. Oberflächenunregelmäßigkeiten						
	1.1 100	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.2 104	zulässig	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.3 2017/516	d≤0,3t; max 3 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.4 2025	hs0,4t	hs0,3t	hs0,2t	0,4 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.5 4013	ls0,25t max 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.6 4021	ls0,25t oder 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.7 5011/5012	hs0,15t; max 1 mm	hs0,1t; max. 0,5 mm	hs0,05t; max. 0,5 mm	0,1 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.8 515	hs0,3t max 1 mm	hs0,2t max. 0,5 mm	hs0,1t; max. 0,5 mm	0,2 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.9 502	hs0,2mm +0,3t o. 5 mm	hs0,2mm +0,2t o. 5 mm	hs0,2mm +0,15t o. 5 mm	0,5 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,5 mm	<input type="checkbox"/> ne
	1.10 504	hs0,2mm +0,3t o. 5 mm	hs0,2mm +0,2t o. 5 mm	hs0,2mm +0,15t o. 5 mm	0,5 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,3 mm	<input type="checkbox"/> ne
	1.11 506	hs0,2b	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.12 509/511	hs0,3t; oder 1 mm	hs0,2t; oder 0,5 mm	hs0,1t; oder 0,5 mm	0,2 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.13 510	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1.14 602	Abhängig von Verwendung, z. B. Werkstoff Korrosionsschutz			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					vorhanden	<input type="checkbox"/> ne
2. Innere Unregelmäßigkeiten						
	2.1 100	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.2 1001	zulässig	Abhängig v on Werkstoffart (Rissanfälligkeit)		nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.3 200	d≤0,5t; oder 5 mm	d≤0,4t; oder 3 mm	d≤0,3t; oder 2 mm	0,6 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,3 mm	<input type="checkbox"/> ne
	2.4 2013/2014	d≤0,5t; oder 5 mm	d≤0,4t; oder 3 mm	d≤0,3t; oder 2 mm	0,6 mm	<input type="checkbox"/> e
					Porenzeile	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	2.5 202	Es gelten die Grenzwerte für die Porosität			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.6 300	nicht relevant			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.7 4011	hs0,25t; oder 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.8 402	hs0,15t; oder 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2.10 403	Abhängig v on Kundenanforderungen ohne Unregelmäßigkeiten			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
3. Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie						
	3.1 507	hs0,2mm +0,25t	hs0,2mm +0,15t	hs0,2mm +0,1t	0,4 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,1 mm	<input type="checkbox"/> ne
	3.2 508	4°	2°	1°	1°	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,5°	<input type="checkbox"/> ne

Allgemeine Angaben	
Teilbezeichnung	ISO 9606-1 52 P BW FM5 S t2,0 PA ssnb
Prüfumfang	100 %
Werkstoff	X5CrNi 18-10 (1.4301)
OF-Zustand	kaltgewalzt (2B)

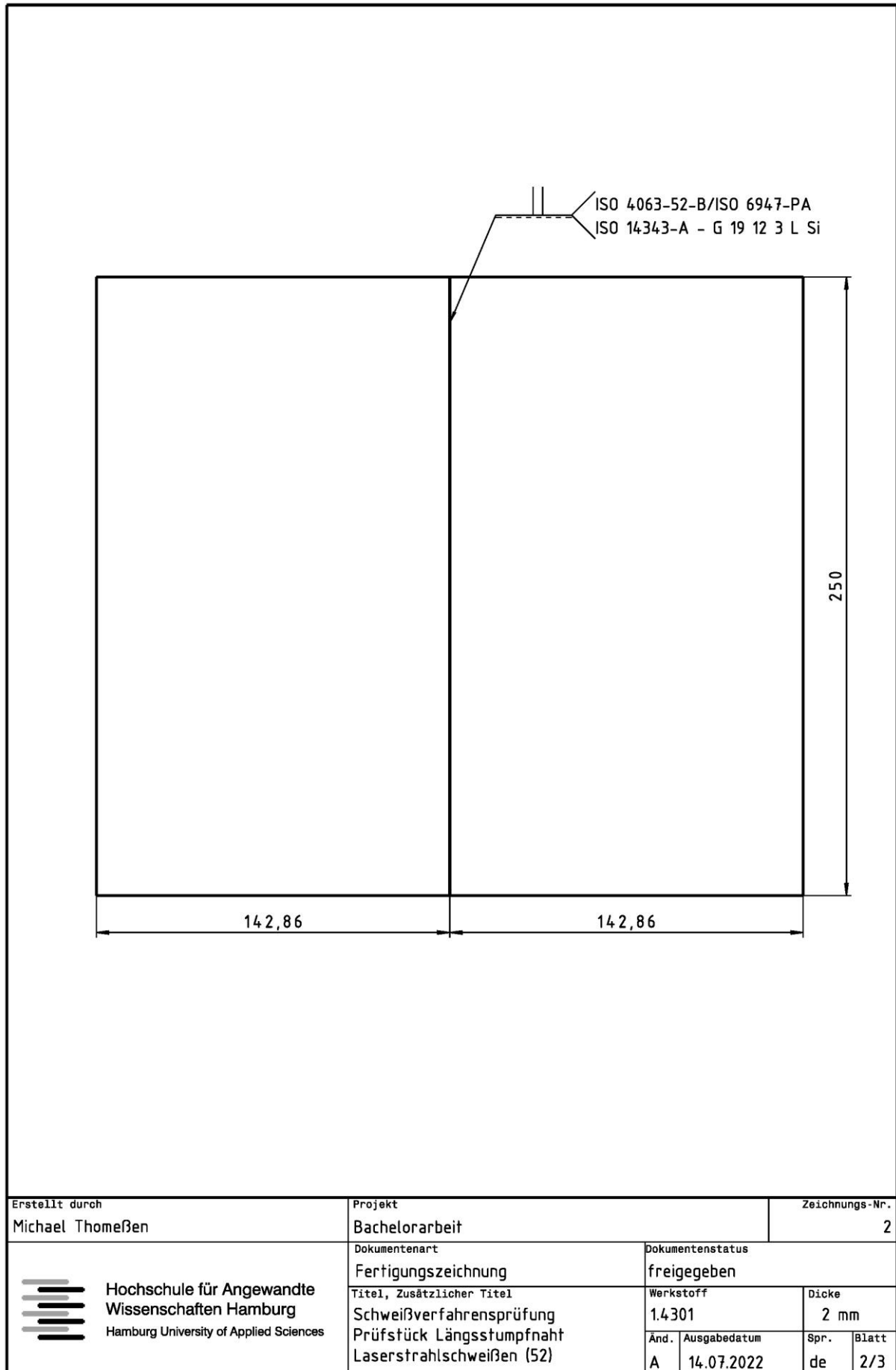
Angaben zum Prüftechnik	
Bewertungsnom	13919-1 / 3452-1 / 17636-2
Beleuchtungsstärke	630 lx
Betrachtungsmittel	n. v.
Hilfsmittel	4-Skalenlehre




Allgemeines Nahtaussehen	
Gleichmäßigkeit	<input checked="" type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> brauchbar <input type="checkbox"/> schlecht
Einbrandkerben	<input checked="" type="checkbox"/> keine (gut) <input type="checkbox"/> gering (brauchbar) <input type="checkbox"/> vorhanden (schlecht)
Aussehen der Wurzel	<input checked="" type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> brauchbar <input type="checkbox"/> schlecht


Allgemeine Notizen	
Prozess	Laserstrahl (52)
Arbeitsumgebung	Schweißzelle
Material	mit Tafelschere vorbereitet
Prüfung	VT (002-VT-01-1.4301) PT (005-PT-01-1.4301) RT (008-RT-01-1.4301)

Gesamtbewertung	
<input type="checkbox"/> Anforderungen wurden erfüllt	
<input checked="" type="checkbox"/> Anforderungen wurden nicht erfüllt	

Halstenbek den 27.01.2022, Michael Thomeßen
Ort und Datum, Name des Prüfers

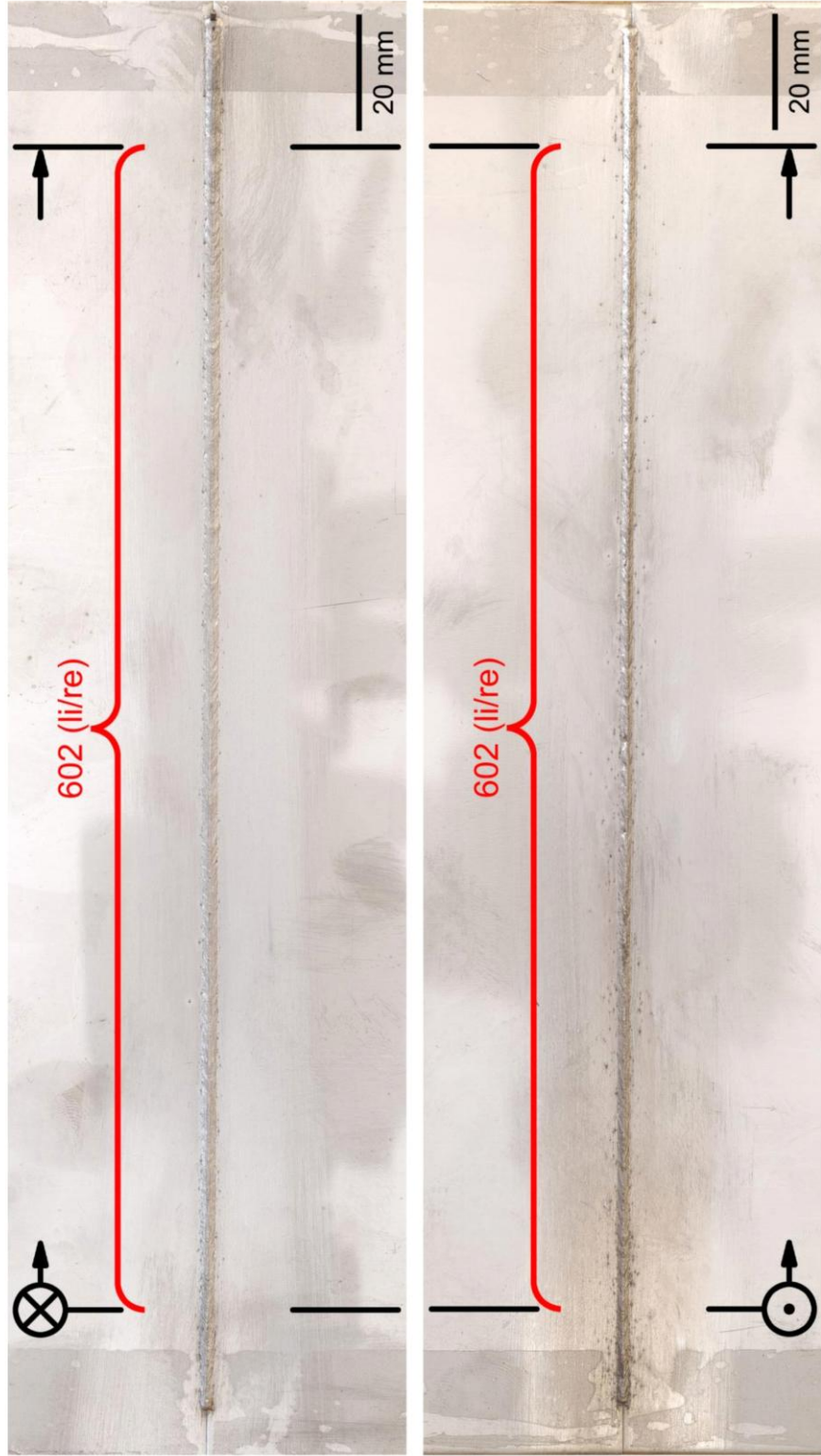




		VT Prüfbericht DIN EN ISO 13919-1		Bericht Nr.: 002-VT-02-1.4301 Berichtsdatum: 22.07.2022 Seite: 1 von 2			
Kunde:	Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.:	n. v.	Pos.-Nr.:	2/3	Projekt:	Be theoria fbeit
Zeichnungs-Nr. (Rev.):	Fertigungszeichnung 2	Fabrik-Nr.:	n. v.	Prüfgegenstand:	ISO 9806-1 S2 P BW FMS S 12,0 PA 55nb		
Prüfanweisung (Rev.):	n. v.	Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-B					
Grundwerkstoff:	X5CrNi 18-10 (1.4301)	Abmessungen (Dicke): 2 mm		Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063: Laserstrahlschweißen (S2)			
Oberflächenzustand:	<input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> gestraht <input type="checkbox"/> beschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt (2B)	<input type="checkbox"/> geschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt (2B)		Wärmebehandlung: <input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach			
Prüfbereich:	Schweißnaht (SN) + 1,0 mm Wärmeinflusszone (WIZ)	Prüfmessung:	100%	Schweißnahtgeometrie: Stumpfnaht (BW)			
Prüfbedingung / Technik:	<input checked="" type="checkbox"/> Direkte Sichtprüfung: <input type="checkbox"/> Indirekte Sichtprüfung: <input type="checkbox"/> Lichtdurchlässige Sichtprüfung: <input type="checkbox"/>	Prüfgerät (SN):	SLV	Betrachtungswinkel:	> 30°	Betrachtungsabstand:	> 600 mm
Prüfgerät:	4-Skalen-Lehre	Prüfgeräte Hersteller:	n. v.	Prüfgerät (SN):	n. v.	Kalibrierdatum:	n. v.
Weiteres Prüfgerät:	n. v.	Prüfgeräte Hersteller:	n. v.	Prüfgerät (SN):	n. v.	Kalibrierdatum:	n. v.
Beleuchtungsstärke:	630 lx	Lichtstärkemessgerät Hersteller:	Trotec BF06	Lichtstärkemessgerät (SN):	190604972	Kalibrierdatum:	12.05.2022
Abkürzungen (DIN EN ISO 6520-1)							
100 Riss	<input type="checkbox"/> 4013 Wurzelbindefehler	<input type="checkbox"/> 502 Nahtüberhöhung	<input type="checkbox"/> 510 Durchbrand	<input type="checkbox"/> 602 Schweißspritzer			
104 Endkateriss	<input type="checkbox"/> 4021 Ungenügender Wurzeleinbrand	<input type="checkbox"/> 504 Wurzelüberhöhung	<input type="checkbox"/> 506 Schweißüberlauf	<input checked="" type="checkbox"/> 507 Kanteneinsatz			
2017 Oberflächenpore	<input type="checkbox"/> 5011 Durchlaufende Einbrandkerbe	<input type="checkbox"/> 509 verlaufenes Schweißgut	<input type="checkbox"/> 508 Winkelversatz				
516 Wurzelporosität	<input type="checkbox"/> 5012 Nicht Durchlaufende Einbrandkerbe	<input type="checkbox"/> 511 Decklagenunterwölbung					
2025 offener Endkaterlunker	<input type="checkbox"/> 515 Wurzelrückfall						
Prüfergebnis:	<input checked="" type="checkbox"/> Keine Ungenzen <input type="checkbox"/> Zulässige Ungenzen <input type="checkbox"/> Unzulässige Ungenzen	Datum der VT Prüfung: 21.07.2022					
Anforderungen:	<input checked="" type="checkbox"/> erfüllt <input type="checkbox"/> nicht erfüllt	Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel					
Prüfer:	Michael Thomeßen	Stufe nach DIN EN ISO 9712:	n. v.	Prüfaufsicht:	Björn Rosenburg	Stufe nach DIN EN ISO 9712:	2
Unterschrift und Stempel:		Unterschrift und Stempel: 					
Ort und Datum:	Halstenbek den 22.07.2022	Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022					
Ziegelbergweg 6a - 25482 Apen Tel.: 04122 / 810 1000							

	VT Prüfbericht DIN EN ISO 13919-1	Report Nr.: 002-VT-02-1.4301
		Report date: 22.07.2022
		Page: 2 of 2

Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel

Anmerkung / Beschreibung und Lage aller unzulässigen Ergänzungen (Skizze oder Foto):





		PT Prüfbericht DIN EN ISO 3452-1		Bericht Nr.: 005-PT-02-1.4301	
				Berichtsdatum: 22.07.2022	
				Seite: 1 von 2	
Kunde:	Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.:	n. v.	Pos.-Nr.:	2/3
Zeichnungs-Nr. (Rev.):	Feißigungszeichnung 2	Fabrik-Nr.:	n. v.	Prüfgegenstand:	ISO 9606-1 S2 P BW FMS S 12,0 PA 55nb
Prüfanweisung (Rev.):	n. v.	Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-B			
Grundwerkstoff:	X5CrNi 18-10 (1.4301)	Abmessungen (Dicke):	2 mm	Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063: Laserstrahlschweißen (S2)	
Oberflächenzustand:	<input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> gestraht <input type="checkbox"/> geschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt (2B)	Wärmebehandlung: <input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach		Kalibrierdatum: -	
Prüfbereich:	Schweißnaht (SN) + 10 mm Wärmeeinflusszone (WEZ)	Prüfmfang:	100%	Beutelttemperatur:	25 °C
Vorreinigung:	<input checked="" type="checkbox"/> mit Zwischenreiniger: <input checked="" type="checkbox"/>	Dauer bis Aufbringen des Eindringmittels: 5 min		Eindringmittel Typ: <input checked="" type="checkbox"/> sichtbar <input checked="" type="checkbox"/> fluoreszierend	
Eindringmittel Hersteller:	Helling	Bezeichnung:	Nord-Test Rot 3000	Chargen-Nr.:	3494/01/2019
Eindringmittel-Typ gem. ISO 3452-1:	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input checked="" type="checkbox"/> III	Art der Aufbringung:	<input type="checkbox"/> sprühen <input checked="" type="checkbox"/> pinseln <input type="checkbox"/> tauchen	Eindringdauer:	20 min
Zwischenreiniger Hersteller:	Helling	Bezeichnung:	Reiniger U87	Chargen-Nr.:	R39838/01/2022
Zwischenreiniger-Verfahren gem. ISO 3452-1:	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> E	Dauer bis Aufbringen des Entwicklers:		5 min	
Entwickler Hersteller:	Helling	Bezeichnung:	Entwickler U89	Chargen-Nr.:	R39842/01/2022
Entwickler-Art gem. ISO 3452-1:	<input type="checkbox"/> a <input type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c <input type="checkbox"/> d <input checked="" type="checkbox"/> e	Halogen Gehalt ≤ 0,1 Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein		nachgewiesen durch Abnahmezeugnis Nr.: n. v.	
Analyse des Eindringensystem:	Schweiß Gehalt ≤ 0,1 Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein				
Beurteilung nach:	<input type="checkbox"/> sofort <input type="checkbox"/> 15 min <input checked="" type="checkbox"/> 30 min <input type="checkbox"/> 60 min <input type="checkbox"/> min	Beleuchtungseinrichtung: Hallenbeleuchtung		Augenaadaptionszeit: 60 min	
Beleuchtungsstärke:	630 lx	Lichtstärkemessgerät (SN):	Trotac BF06	Kalibrierdatum:	12.05.2022
Prüfergebnis:	<input checked="" type="checkbox"/> keine oder nicht relevante Anzeigen <input type="checkbox"/> Relevante Anzeigen <input type="checkbox"/> Unzulässige Ungenügen	Datum der PT Prüfung: 21.07.2022		Nachreinigung durchgeführt: <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
Anforderungen:	<input checked="" type="checkbox"/> erfüllt <input type="checkbox"/> nicht erfüllt	Anlage: Fotos der Deklage und der Wurzel			
Prüfer:	Michael Thomeßen	Stufe nach DIN EN ISO 9712:	n. v.	Prüfaufsicht:	Björn Rosenburg
Unterschrift und Stempel:		Unterschrift und Stempel:		Stufe nach DIN EN ISO 9712: 2	
Ort und Datum:	Halstenbek den 22.07.2022	Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022		Ziegleitweg 6a · 35482 Aypen Tel.: 04322 7 814 1000	

	PT Prüfbericht DIN EN ISO 3452-1	Bericht Nr.: 005-PT-02-1.4301
		Berichtsdatum: 22.07.2022
Seite: 2 von 2		

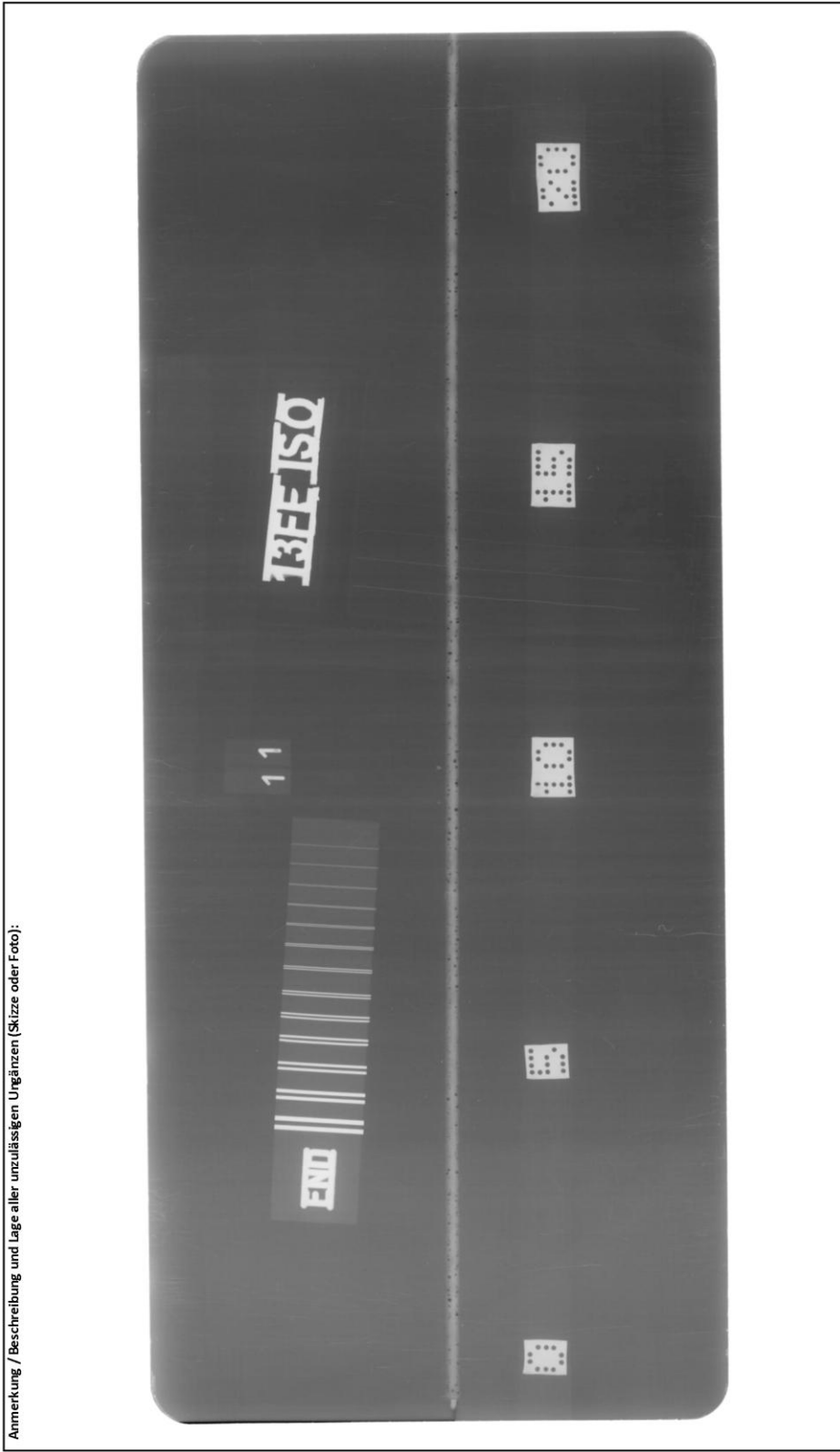
Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel



		RT Prüfbericht DIN EN ISO 17636-2		Bericht Nr.: 008-RT-02-1.4301	
				Berichtsdatum: 26.07.2022	
				Seite: 1 von 2	
Kunde:	Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.:	n. v.	Pos.-Nr.:	2/3
Zeichnungs-Nr. (Rev.):	Fertigungszeichnung 2	Fabrik-Nr.:	n. v.	Prüfgegenstand:	ISO 9806-1 S2 P BW FMS S 12,0 PA 55nb
Prüfanweisung (Rev.):	n. v.	Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-B			
Grundwerkstoff:	X5CrNi 18-10 (1.4301)	Abmessungen (Dicke):	2 mm	Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063:	Laserstrahlschweißen (S2)
Oberflächenzustand:	<input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> geschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt (2B)	Wärmebehandlung: <input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach			
Prüfbereich:	Schweißnaht (SN) + 10 mm Wärmeeinflusszone (WEZ)	Prüfumfang:	100 %	Schweißnahtgeometrie: Stumpfnah (BW)	
<input checked="" type="checkbox"/> RT Technik – Grundtechnik	<input type="checkbox"/> Klasse A	Strahlenerreger:	Yxlon Y.MG226	Röntgenröhrentyp:	Metall-Keramik
<input type="checkbox"/> RT Technik – verbesserte Prüftechnik	<input checked="" type="checkbox"/> Klasse B	Art des Brennflecks:	variabel	Größe des Brennflecks (d):	0,4 mm x 1mm
Strahlenquelle Seriennummer:	n. v.	Scanner:	HD-CR 35	Filmgröße:	250 x 100 mm
Film Hersteller:	Dürr NDT	Filmtyp:	Speicherfolie	Auflösung:	1270 x 1270 DPI
Abkürzungen (DIN EN ISO 6520-1)					
100	Risse	<input type="checkbox"/> 200 Hohlraum	<input checked="" type="checkbox"/> 2014 Porenzelle	<input checked="" type="checkbox"/> 300 fester Einschluss	<input type="checkbox"/> 402 ungenügende Durchschweißung
1001	Mikroriss	<input type="checkbox"/> 2013 Porennest	<input type="checkbox"/> 202 Lunker	<input type="checkbox"/> 4001 Bindefehler	<input type="checkbox"/> 403 Spokebildung
Filmidentifikation:	11	Aufnahmeanordnung (Bild) nach DIN EN ISO 1	verwendete Röhrenspannung	145 kV	verwendeter Röhrenstrom: 18 mA
Typ des Bildgüteprüfkörpers (BRK):	13 FE ISO	Mindestbildgütezahl (BGZ):	D 13	erreichte Bildgütezahl	D 13+
Bemerkung:		Porenzelle rechts und links vom Stoß			
Prüfergebnis:	<input type="checkbox"/> keine oder nicht relevante Anzeigen <input type="checkbox"/> relevante Anzeigen	<input checked="" type="checkbox"/> Unzulässige Ungenzen	Datum der RT Prüfung: 25.07.2022		
Anforderungen:	<input type="checkbox"/> erfüllt <input checked="" type="checkbox"/> nicht erfüllt	Anlage: Röntgenaufnahme der Schweißnaht			
Prüfer:	Michael Thomeßen	Stufe nach DIN EN ISO 9712:	n. v.	Prüfaufsicht:	Stufe nach DIN EN ISO 9712:
Unterschrift & Stempel:		Unterschrift und Stempel:			
Ort und Datum:	Hals...	Ort und Datum:			

	RT Prüfbericht DIN EN ISO 17636-2	Report Nr.: 008-RT-02-14301
		Report date: 26.07.2022
Seite: 2 von 2		

Anlage: Röntgenaufnahme der Schweißnaht



Anhang M: Prüfbericht 3 - 3.3535

DIN EN ISO 13919-2 2020-03		Bewertungsgruppe			max. Abweichung	Bewertung
Merkmale	ISO 13919 ISO 6520	D	C	B	zulässig ist	e=erfüllt ne = nicht erfüllt
Oberflächenunregelmäßigkeiten						
	1 100	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	2 104	örtliche Endkrater- risse zulässig		nicht zulässig	nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	3 2017/516	ds0,5t; max. 6 mm	ds0,4t; max. 5 mm	ds0,3t; max. 4 mm	0,6 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	6 2024	hs0,15t max. 2 mm	hs0,1t max. 1,5 mm	hs0,05t max. 1 mm	0,1 mm	<input type="checkbox"/> e
					0,3 mm	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	8 4013	hs0,25s max. 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input type="checkbox"/> e
					vorhanden	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	8 4021	hs0,25s max. 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	11/18 5011-5013	hs0,15t max. 2 mm	hs0,1t; max. 1,5 mm	hs0,05t; max. 1,0 mm	0,1 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	12 502	hs0,2mm +0,3t o. 5 mm	hs0,2mm +0,2t o. 5 mm	hs0,2mm +0,15t o. 5 mm	0,5 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,2 mm	<input type="checkbox"/> ne
	13 504	hs0,2mm +0,3t o. 5 mm	hs0,2mm +0,2t o. 5 mm	hs0,2mm +0,15t o. 5 mm	0,5 mm	<input type="checkbox"/> e
					0,8 mm	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	15/16 509/511	hs0,15t max. 2 mm	hs0,1t; oder 1,5 mm	hs0,05t; oder 1,0 mm	0,1 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	17 515	hs0,3t max. 1 mm	hs0,2t; max. 0,5 mm	hs0,1t; max. 0,5 mm	0,2 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	20 602	Abhängig von Verwendung, z. B. Werkstoff, Korrosionsschutz			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					Oberseite	<input type="checkbox"/> ne
	506	hs0,2b	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	510	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
Innere Unregelmäßigkeiten						
	1 100	nicht zulässig			nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	1 1001	Rissfläche < 1 mm²			< 1 mm²	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	3 200	ds0,5t; max. 6 mm	ds0,4t; max. 5 mm	ds0,3t; max. 4 mm	0,6 mm	<input type="checkbox"/> e
					Ø > 0,6 mm	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	4 2013/2014	ds0,5t; max. 6 mm	ds0,4t; max. 5 mm	ds0,3t; max. 4 mm	0,6 mm	<input type="checkbox"/> e
					Porenzeile	<input checked="" type="checkbox"/> ne
	5 202	Es gelten die Grenzwerte für die Porosität			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	7 300	Es gelten die Grenzwerte für die Porosität (nur Oxideinschlüsse zul.)			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	8 4011	hs0,25t max. 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	9 402	hs0,25t max. 1 mm	nicht zulässig		nicht zulässig	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
	403	Abhängig von Kundenanforderungen ohne Unregelmäßigkeiten			nicht relevant	<input checked="" type="checkbox"/> e
					n. v.	<input type="checkbox"/> ne
Unregelmäßigkeiten in der Nahtgeometrie						
	14 507	hs0,25t max. 3 mm	hs0,15t max. 2 mm	hs0,1t max. 1 mm	0,2 mm	<input checked="" type="checkbox"/> e
					0,2 mm	<input type="checkbox"/> ne
	508	4°	2°	1°	1°	<input checked="" type="checkbox"/> e
					1°	<input type="checkbox"/> ne



Allgemeine Angaben	
Teilbezeichnung	ISO 9606-2 52 P BW 22 S t2,0 PA ssnb
Prüfumfang	100 %
Werkstoff	AW 5754 (3.3535 / AlMg3)
OF-Zustand	kaltgewalzt

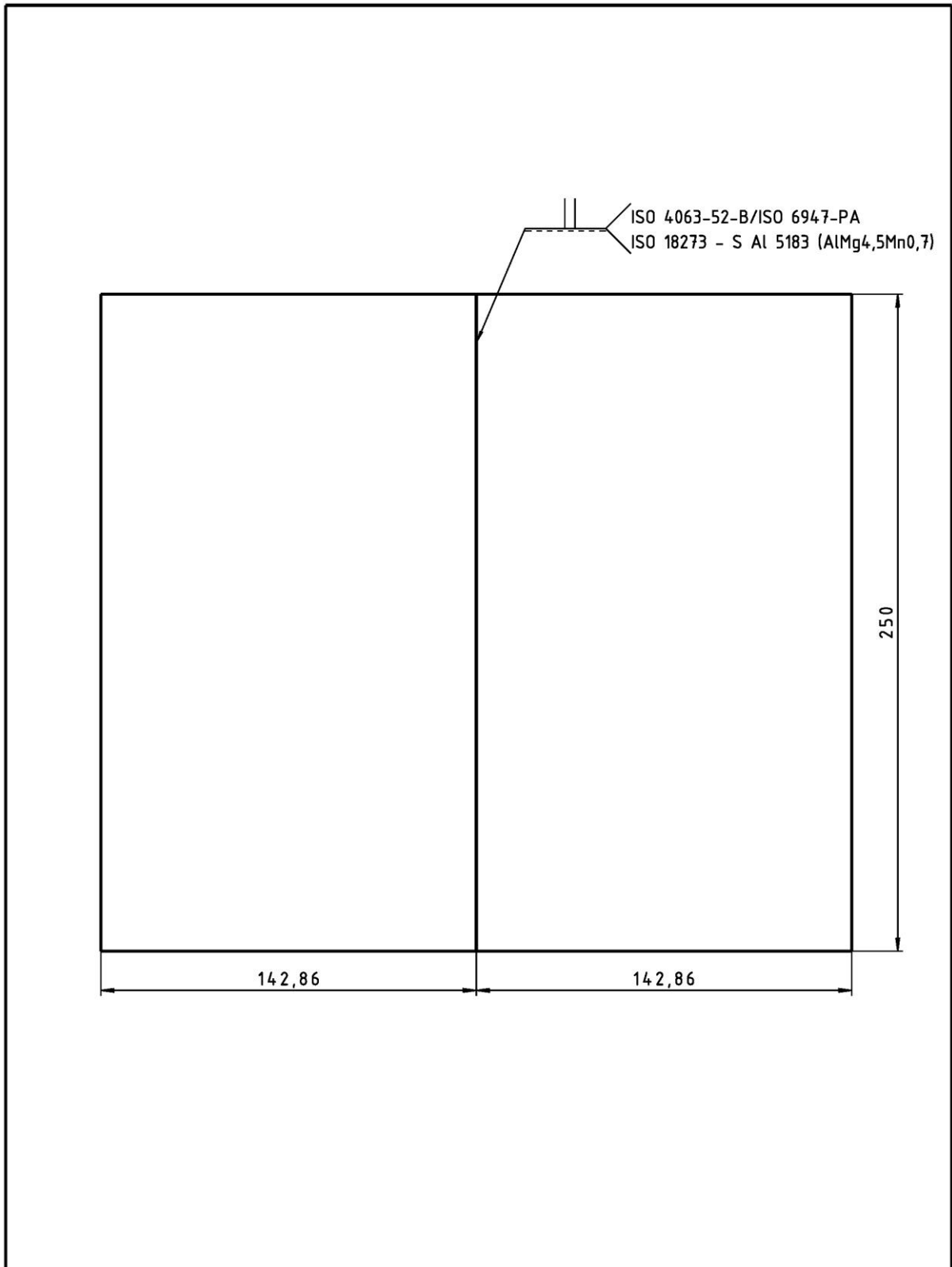
Angabe zur Prüftechnik	
Bewertungsnorm	13919-2 / 3452-1 / 17636-2
Beleuchtungsstärke	630 lx
Betrachtungsmittel	n. v.
Hilfsmittel	4-Skalen-Lehre


Allgemeines Nahtaussehen	
Gleichmäßigkeit	<input checked="" type="checkbox"/> gut <input type="checkbox"/> brauchbar <input type="checkbox"/> schlecht
Einbrandkerben	<input checked="" type="checkbox"/> keine (gut) <input type="checkbox"/> gering (brauchbar) <input type="checkbox"/> vorhanden (schlecht)
Aussehen der Wurzel	<input type="checkbox"/> gut <input checked="" type="checkbox"/> brauchbar <input type="checkbox"/> schlecht




Allgemeine Notizen	
Prozess	Laserstrahl (52)
Arbeitsumgebung	Schweißzelle
Material	mit Tafelschere vorbereitet
Prüfung	VT (003-VT-01-3.3535) PT (006-PT-01-3.3535) RT (009-RT-01-3.3535)


Gesamtbewertung	
<input type="checkbox"/> Anforderungen wurden erfüllt	
<input checked="" type="checkbox"/> Anforderungen wurden nicht erfüllt	

Halstender Gew 27.07.2022, Michael Thomeßen
Ort und Datum, Name des Prüfers



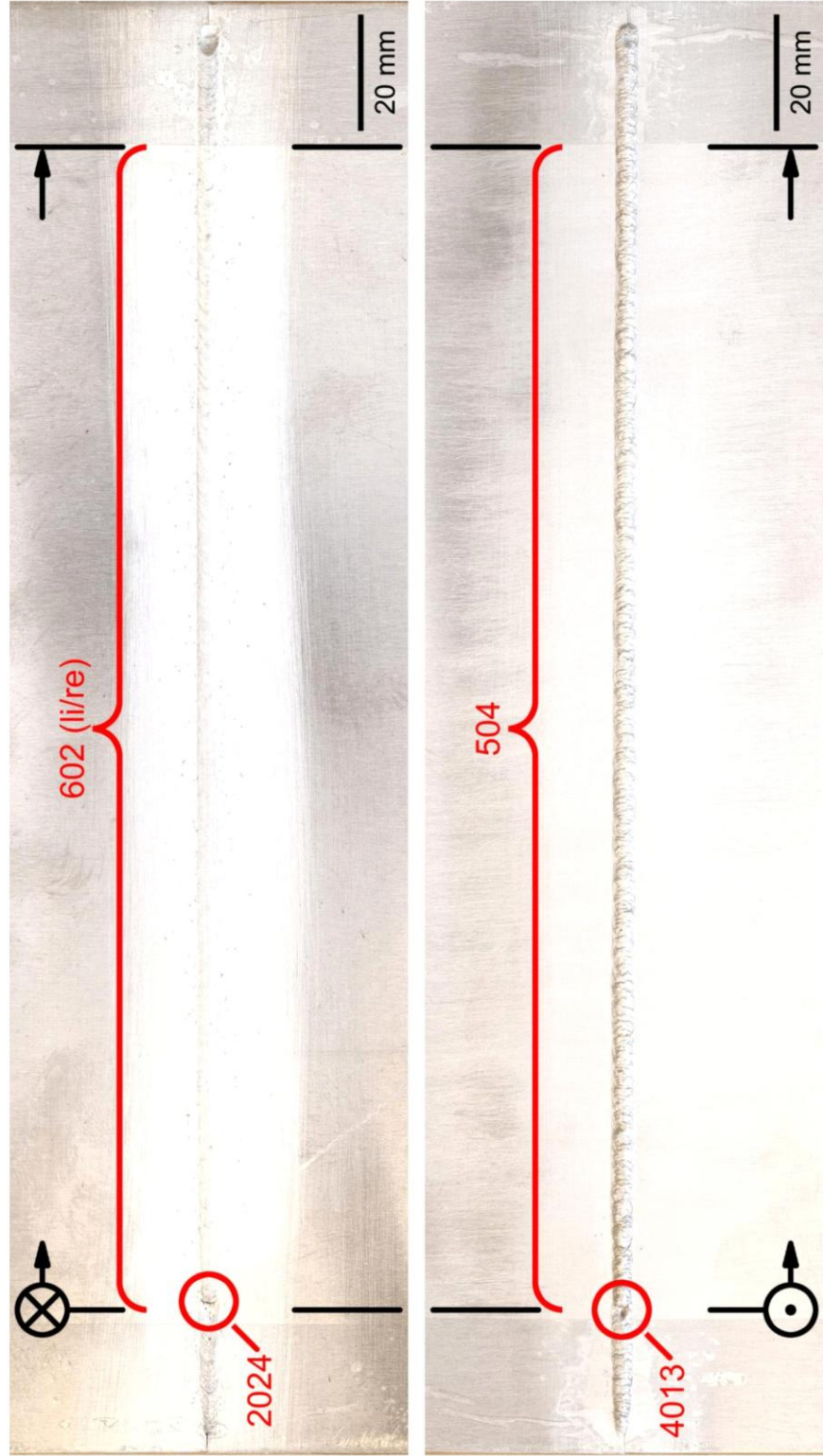
Erstellt durch Michael Thomeßen	Projekt Bachelorarbeit	Zeichnungs-Nr. 3	
 <p>Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences</p>	Dokumentenart Fertigungszeichnung	Dokumentenstatus freigegeben	
	Titel, Zusätzlicher Titel Schweißverfahrensprüfung Prüfstück Längsstumpfnah Laserschweiß (52)	Werkstoff 3.3535	Dicke 2 mm
	And. A	Ausgabedatum 14.07.2022	Spr. de




		VT Prüfbericht DIN EN ISO 13919-2		Bericht Nr.: 003-VT-03.3.3535	
				Berichtsdatum: 22.07.2022	
				Seite: 1 von 2	
Kunde: Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.: n. v.	Pos.-Nr.: 3/3	Projekt: Be theora fbeit		
Zeichnungs-Nr. (Rev.): Fertigungszeichnung 3	Fabrik-Nr.: n. v.	Prüfgegenstand: ISO 9606-2 S2 P BW 22 St2.0 Passnb			
Prüfanweisung (Rev.): n. v.	Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-B				
Grundwerkstoff: AW 5754 (3.3535 / AlMg3)	Abmessungen (Dicke): 2 mm		Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063: Laserstrahlschweißen (S2)		
Oberflächenzustand: <input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> gestraht <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt	<input type="checkbox"/> geschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt		Wärmebehandlung: <input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach		
Prüfbereich: Schweißnaht (SN) + 1.0 mm Wärmeeinflusszone (WEZ)	Prüfmessung: 100%		Schweißnahtgeometrie: Stumpfnah (BW)		
Prüfbedingung / Technik: <input checked="" type="checkbox"/> Direkte Sichtprüfung: <input type="checkbox"/> Indirekte Sichtprüfung: <input type="checkbox"/> Lichtdurchlässige Sichtprüfung:	Prüfergerät (SN): SLV		Betrachtungsabstand: > 600 mm		
Prüfergerät: 4-Skalen-Lehre	Prüfergeräte Hersteller:		Kalibrierdatum: n. v.		
Weiteres Prüfergerät: n. v.	Prüfergeräte Hersteller:		Kalibrierdatum: n. v.		
Beleuchtungsstärke: 630 lx	Lichtstärkemessgerät Hersteller: Trotec BF06		Kalibrierdatum: 12.05.2022		
Abkürzungen (DIN EN ISO 6520-1)					
100 Riss	<input type="checkbox"/> 4013 Wurzelbindefehler	<input checked="" type="checkbox"/> 502 Nahtüberhöhung	<input type="checkbox"/> 602 Schweißspritzer	<input checked="" type="checkbox"/>	
104 Endkateriss	<input type="checkbox"/> 4021 Ungenügender Wurzeleinbrand	<input type="checkbox"/> 504 Wurzelüberhöhung	<input checked="" type="checkbox"/> 506 Schweißgütablauf	<input type="checkbox"/>	
2017 Oberflächenpore	<input type="checkbox"/> 5011 Durchlaufende Einbrandkerbe	<input type="checkbox"/> 509 verlaufenes Schweißgut	<input type="checkbox"/> 510 Durchbrand	<input type="checkbox"/>	
516 Wurzelporosität	<input type="checkbox"/> 5012 Nicht Durchlaufende Einbrandkerbe	<input type="checkbox"/> 511 Decklagenunterverwölbung	<input type="checkbox"/> 507 Kantenversatz	<input checked="" type="checkbox"/>	
2024 Endkaterlunker	<input checked="" type="checkbox"/> 5013 Wurzelkerbe	<input type="checkbox"/> 515 Wurzelrückfall	<input type="checkbox"/> 508 Winkelversatz	<input checked="" type="checkbox"/>	
Prüfergebnis: <input type="checkbox"/> Keine Ungenzen <input type="checkbox"/> Zulässige Ungenzen <input checked="" type="checkbox"/> Unzulässige Ungenzen	Datum der VT Prüfung: 21.07.2022				
Anforderungen: <input type="checkbox"/> erfüllt <input checked="" type="checkbox"/> nicht erfüllt	Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel				
Prüfer: Michael Thomeßen	Stufe nach DIN EN ISO 9712: n. v.	Prüfaufsicht: Björn Rosenburg	Stufe nach DIN EN ISO 9712: 2		
Unterschrift und Stempel:					
Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022	Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022		Unterschrift und Stempel:		
Unterschrift und Stempel:					
Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022					

	VT Prüfbericht DIN EN ISO 13919-2	Bericht Nr.: 003-VT-03-3.3535
		Berichtsdatum: 22.07.2022
	Seite: 2 von 2	

Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel

Anmerkung / Beschreibung und Lage aller unzulässigen Ungängen (Skizze oder Foto):



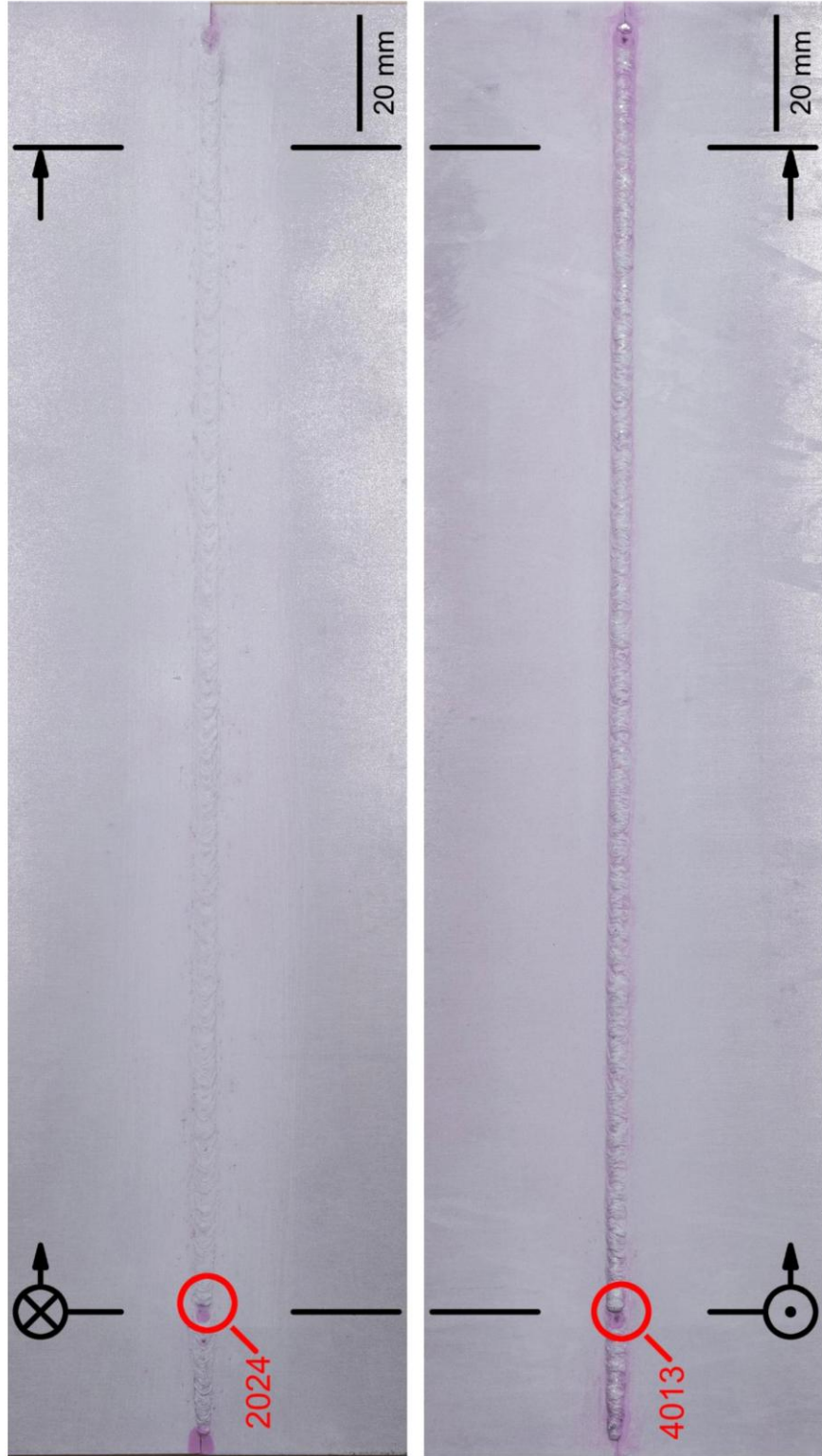
		PT Prüfbericht DIN EN ISO 3452-1		Bericht Nr.: 0016-PT-03-3-3535	
				Berichtsdatum: 22.07.2022	
				Seite: 1 von 2	
Kunde:	Michael Thomeßen	Auftrag-Nr.:	n. v.	Pos.-Nr.:	3/3
Zeichnungs-Nr. (Rev.):	Feißigungszeichnung 3	Fabrik-Nr.:	n. v.	Prüfgegenstand:	ISO 9606-2 S2 P BW 22 S2.0 Passnb
Prüfanweisung (Rev.):	n. v.	Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-B			
Grundwerkstoff:	AW 5754 (3.3535 / AlMg3)	Abmessungen (Dicke):	2 mm	Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063: Laserstrahlschweißen (S2)	
Oberflächenzustand:	<input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> gestraht <input type="checkbox"/> geschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt	Wärmebehandlung: <input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach			
Prüfbereich:	Schweißnaht (SN) + 10 mm Wärmeeinflusszone (WEZ)	Prüfmfang:	100%	Beutelttemperatur:	25 °C
				Thermometer-Serial-Nr.:	-
Vorreinigung:	<input checked="" type="checkbox"/> mit Zwischereiniger: <input type="checkbox"/> Helling	Dauer bis Aufbringen des Eindringmittels: 5 min		Eindringmittel Typ: <input checked="" type="checkbox"/> sichtbar <input checked="" type="checkbox"/> fluoreszierend	
Eindringmittel-Hersteller:	Helling	Bezeichnung:	Nord-Test Rot 3000	Chargen-Nr.:	3494/01/2019
Eindringmittel-Typ gem. ISO 3452-1:	<input type="checkbox"/> I <input type="checkbox"/> II <input checked="" type="checkbox"/> III	Art der Aufbringung:	<input type="checkbox"/> sprühen <input checked="" type="checkbox"/> pinseln <input type="checkbox"/> tauchen	Eindringdauer:	20 min
Zwischenreiniger-Hersteller:	Helling	Bezeichnung:	Reiniger U87	Chargen-Nr.:	R39838/01/2022
Zwischenreiniger-Verfahren gem. ISO 3452-1:	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/> E	Dauer bis Aufbringen des Entwicklers: 5 min			
Entwickler-Hersteller:	Helling	Bezeichnung:	Entwickler U89	Chargen-Nr.:	R39842/01/2022
Entwickler-Art gem. ISO 3452-1:	<input type="checkbox"/> a <input type="checkbox"/> b <input type="checkbox"/> c <input type="checkbox"/> d <input checked="" type="checkbox"/> e	Entwicklungsdauer: 20 min			
Analyse des Eindringensystems:	Schweißgehalt ≤ 0,1 Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	Halogengehalt ≤ 0,1 Gew.-% <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein		nachgewiesen durch Abnahmezeugnis Nr.: n. v.	
Beurteilung nach:	<input type="checkbox"/> sofort <input type="checkbox"/> 15 min <input checked="" type="checkbox"/> 30 min <input type="checkbox"/> 60 min <input type="checkbox"/> min	Beleuchtungseinrichtung: Hallenbeleuchtung		Augenaadaptionszeit: 60 min	
Beleuchtungsstärke:	630 lx	Lichtstärkemessgerät (SN):	Trotac BF06	Kalibrierdatum:	12.05.2022
Prüfergebnis:	<input type="checkbox"/> keine oder nicht relevante Anzeigen <input type="checkbox"/> erfüllte Anzeigen <input checked="" type="checkbox"/> Relevante Anzeigen <input checked="" type="checkbox"/> Unzulässige Ungenügen	Datum der PT Prüfung: 21.07.2022		Nachreinigung durchgeführt: <input checked="" type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
Anforderungen:	<input type="checkbox"/> erfüllt <input checked="" type="checkbox"/> nicht erfüllt	Anlage: Fotos der Deklage und der Wurzel			
Prüfer:	Michael Thomeßen	Stufe nach DIN EN ISO 9712:	n. v.	Prüfaufsicht:	Bp'm Rosenburg
Unterschrift und Stempel:		Unterschrift und Stempel:			
Ort und Datum:	Halstenbek den 22.07.2022	Ort und Datum:		Halstenbek den 22.07.2022	



 MetalMechnik
 Plawky GbR
 Metzgerweg 6a · 25482 Apen
 TEL: 04122 / 8101000

	PT Prüfbericht DIN EN ISO 3452-1	Report Nr.: 006-PT-03-3-3535
		Report date: 22.07.2022
		Page: 2 of 2

Anlage: Fotos der Decklage und der Wurzel

Anmerkung / Beschreibung und Lage aller relevanten Anzeigen (Skizze oder Foto):



		RT Prüfbericht DIN EN ISO 17636-2				Bericht Nr.: 009-RT-03-3:3535	
		Kunde: Michael Thomeßen		Auftrag-Nr.: n. v.		Berichtsdatum: 26.07.2022	
		Zeichnungs-Nr. (Rev.): Fertigungszeichnung 3		Pos.-Nr.: 3/3		Projekt: Baueinheit	
Prüfanweisung (Rev.): n. v.		Fabrik-Nr.: n. v.		Prüfgegenstand: ISO 9806-2 S2 P BW 22 S 12,0 PA ssnb		Seite: 1 von 2	
Zulässigkeitsgrenzen nach Regelwerk (Ausgabe) / Kundenspez. (Rev.) / Prüfanweisung: ISO 13919-1-8		Abmessungen (Dicke): 2 mm		Schweißverfahren gem. DIN EN ISO 4063: Laserstrahlschweißen (S2)		Wärmebehandlung: <input checked="" type="checkbox"/> ohne <input type="checkbox"/> vor <input type="checkbox"/> nach	
Grundwerkstoff: AW 5754 (3:3535 / AlMg3)		Oberflächenzustand: <input type="checkbox"/> unbehandelt <input type="checkbox"/> geschliffen <input type="checkbox"/> mech. bearbeitet <input checked="" type="checkbox"/> kaltgewalzt		Prüfbereich: Schweißnaht (SN) + 10 mm Wärmeeinflusszone (WEZ)		Schweißnahtgeometrie: Stumpfnah (BW)	
<input checked="" type="checkbox"/> RT Technik – Grundtechnik <input type="checkbox"/> RT Technik – verbesserte Prüftechnik		Strahlenerdientyp: Yxlon Y.MG226		max. Röhrenspannung: 226 kV		Datum der RT Prüfung: 21.07.2022	
Strahlenquelle Seriennummer: n. v.		Art des Brennflecks: variabel		Größe des Brennflecks (d): 0,4 mm x 1mm		Film Hersteller: Dürr NDT	
Filmtyp: Speicherfolie		Scanner: HD-CR 35		Filmauflösung: 1270 x 1270 DPI		Filmgröße: 250 x 100 mm	
Abkürzungen (DIN EN ISO 6520-1)							
100	Risse	<input type="checkbox"/> 200	Hohlraum	<input checked="" type="checkbox"/> 2014	Porenzelle	<input checked="" type="checkbox"/> 300	festen Einschluss
1001	Mikrorisse	<input type="checkbox"/> 2013	Porennebst	<input type="checkbox"/> 202	Lunker	<input type="checkbox"/> 4001	Binderfehler
402	ungenügende Durchschweißung	<input type="checkbox"/> 403	Spindelbildung				
Filmidentifikation: 35		Aufnahmeanordnung (Bild) nach DIN EN ISO 1		verwendete Röhrenspannung: 43 kV		verwendeter Röhrenstrom: 6 mA	
Typ des Bildgüteprüfkörpers (BK): 13 ALEN		Mindestbildgütezahl (BG): D 13		erreichte Bildgütezahl: D 13+		max. Unscharfe: 0,08 mm	
Bemerkung: einzelne Poren $\geq \phi$ 0,6 mm; Porenzellen rechts und links vom Stoß		erzielte Bildgütezahl: D 13+		max. Basis-Ortsauflösung: 0,04 mm		Belichtungszeit: 20 s	
Prüfergebnis: <input type="checkbox"/> keine oder nicht relevante Anzeigen <input type="checkbox"/> relevante Anzeigen <input checked="" type="checkbox"/> Unzulässige Ungenzen		Datum der RT Prüfung: 25.07.2022					
Anforderungen: <input type="checkbox"/> erfüllt <input checked="" type="checkbox"/> nicht erfüllt		Anlage: Röntgenaufnahme der Schweißnaht					
Prüfer: Michael Thomeßen		Stufe nach DIN EN ISO 9712: n. v.		Prüfaufsicht:		Stufe nach DIN EN ISO 9712:	
Unterschrift & Stempel:		Unterschrift und Stempel:					
Ort und Datum: Halstenbek den 22.07.2022		Ort und Datum:					

	RT Prüfbericht DIN EN ISO 17636-2	Report Nr.: 009-RT-03-3.3535
		Report date: 26.07.2022
		Page: 2 of 2

Anlage: Röntgenaufnahme der Schweißnaht

Anmerkung / Beschreibung und Lage aller unzulässigen Ergänzungen (Skizze oder Foto):





Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Thomeßen

Vorname: Michael

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Qualifizierung typischer metallischer Konstruktionswerkstoffe für das Laserstrahlschweißen

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

12.09.2022

Datum

 Unterschrift im Original