



Matthias Moschinger, BSc

# Elektronenstrahlschweißen dünnwandiger Aluminium Liner

## Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

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



Institut für Werkstofftechnik, Füge- und Umformtechnik  
Vorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech Christof Somitsch

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Graz, Februar 2021

# Affidavit

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

# Eidesstattliche Erklärung

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

---

Datum/Date

---

Unterschrift/Signature



# Abstract

**Keywords:** electron beam welding, aluminum 6082, pores, beam deflection

Electron beam welding of high-strength aluminum alloys, such as Al6082, is still a challenge. Depending on the application, e.g. automotive, aerospace, or aeronautical industry, the quality requirements for such welded joints are very high. In the case of porosity, there are clear limits that must be observed. Since these depend to a large extent on the sheet thickness, the defect tolerance in the thin sheet sector is relatively small.

Welds on thin-walled liners, such as those used in lightweight pressure tanks, can contain impermissible imperfections. The path from raw material to the liner ready for welding is long and cost-intensive. In order to avoid rejects and thus keep additional costs as low as possible, the process reliability of the welding operation is an essential factor.

This diploma thesis deals with the formation of pores in the molten pool and the influence of beam deflection on these pores. Concepts of beam deflection to avoid pores were devised, resulting in figures which the beam passes through during welding. These figures were analyzed and implemented in the electron welding equipment of the *IMAT* institute for experimental welds. A larger number of tests, with different parameters, were welded.

Existing welds, which were provided by *Peak Technology GmbH*, made it possible to carry out investigations on the weld structure and existing pores. These investigations, as well as the results of the welding tests, were evaluated and analyzed. The results obtained were discussed in this thesis and compared with existing literature.

# Kurzfassung

**Stichworte:** Elektronenstrahlschweißen, Aluminium 6082, Poren, Strahlablenkung

Elektronenstrahlschweißen hochfester Aluminiumlegierungen, wie sie die Al6082 ist, stellen noch immer eine Herausforderung dar. Je nach Anwendung z.B. Automobil-, Luft- oder Raumfahrtindustrie, ist die Anforderung an die Qualität solcher Schweißverbindungen sehr hoch. Im Fall der Porosität gibt es klare Grenzen welche eingehalten werden müssen. Da diese maßgeblich von der Blechdicke abhängig sind, ist die Fehlertoleranz im Dünoblechsektor relativ gering.

Schweißungen an dünnwandigen Linern, wie sie im Bereich von Drucktanks in Leichtbauweise eingesetzt werden, können unzulässige Ungenauigkeiten enthalten. Der Weg vom Rohmaterial bis zum schweißbarem Liner ist lange und kostenintensiv. Um Ausschuss zu vermeiden und somit Mehrkosten möglichst gering zu halten, ist die Prozesssicherheit des Schweißvorganges ein wesentlicher Faktor.

Diese Diplomarbeit befasst sich mit dem Entstehen von Poren im Schmelzbad und dem Einfluss der Strahlablenkung, auf eben diese. So wurden Konzepte der Strahlablenkung zur Porenvermeidung erdacht, was zu Figuren führte, welche der Strahl während des Schweißens durchläuft. Diese Figuren wurden analysiert und für Versuchsschweißungen in die Elektronenschweißanlage des *IMAT*-Institut implementiert. Es wurde eine größere Anzahl an Versuchen, mit verschiedenen Parametern, geschweißt und charakterisiert.

Durch bestehende Schweißnähte, welche seitens der *Peak Technology GmbH* zu Verfügung gestellt wurden, konnten Untersuchungen am Schweißnahtgefüge und bestehenden Poren durchgeführt werden. Diese Untersuchungen, sowie die Ergebnisse der Schweißversuche, wurden evaluiert und ausgewertet. Die Ergebnisse welche dadurch entstanden, wurden in dieser Arbeit diskutiert und mit bestehender Literatur verglichen.

# Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand am *Institut für Werkstofftechnik, Füge- und Umformtechnik* der *Technischen Universität Graz* und wurde zwischen Oktober 2019 und Jänner 2021 verfasst. Durch meine mehrjährige Arbeit als studentischer Mitarbeiter am *IMAT-Institut* fühle ich mich dem Institut und deren Mitarbeitern sehr verbunden. So erfreute es mich, dass **Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Norbert Enzinger** mit diesem Thema an mich getreten ist. Dies und meine Leidenschaft für die Schweißtechnik führten zum Entschluss der Bearbeitung dieser Arbeit.

So möchte ich mich bei meinem Betreuer **Norbert Enzinger** und dem gesamten Team des *IMAT* für die Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima danken. Ebenso möchte ich mich bei Herrn **Daniel Wimmer** und Frau **M.Sc. Karina Gonzalez** bedanken, die mich Seitens der *Peak Technology GmbH* unterstützt haben. Auch ein Dankeschön an Herrn **Mag.rer.nat. Dr.rer.nat Florian Mittermayer**, welcher diese Arbeit mit den EPMA-Analysen bereichert hat. Es war mir immer eine Freude mit zuvor genannten Personen zu arbeiten und fachlichen Diskurs zu halten.

Auch möchte ich allen meinen Freunden und Studienkollegen Danken, die mich die letzten Jahre durch mein Studium begleitet haben, allen voran meinem Freund **Thomas** der mir sowohl bei technischen Fragen als auch in allen anderen Lebenslagen zur Seite stand. Auch meiner Literaturreunde, welche als Lektoren dieser Arbeit dienten, sei mein Dank ausgesprochen.

Doch der größte Dank gilt meiner Familie, vor allem meinem Vater **Hannes** und meiner Mutter **Annemarie**, welche mich all die Jahre unterstützt haben und immer hinter mir und meinen Entscheidungen gestanden sind! Und nicht zuletzt **Kitty**, die mir Trost und Zuversicht gab.

Graz, am 2. Februar 2021

*Matthias Moschinger*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>IV</b>
<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemein . . . . .	1
1.2 Motivation . . . . .	2
<b>2 Literaturrecherche &amp; IST-Situation</b>	<b>3</b>
2.1 Material . . . . .	3
2.1.1 AL6082 . . . . .	3
2.1.2 Schweißnahtgeometrie . . . . .	6
2.2 Prozess . . . . .	8
2.2.1 Elektronenstrahlschweißen . . . . .	8
2.2.2 Strahlableitung . . . . .	11
2.2.3 Mehrbadtechnik . . . . .	14
2.2.4 Vorversuche . . . . .	16
2.3 Schweißnahtfehler . . . . .	17
2.3.1 Allgemeine Schweißnahtfehler . . . . .	17
2.3.2 Entstehung von Poren . . . . .	18
2.3.3 Analyse bestehender CT-Daten . . . . .	20
2.4 Forschungsfragen / „Knowledge gap“ . . . . .	22
<b>3 Ansatz zur Porenvermeidung</b>	<b>24</b>
3.1 Porenvermeidung durch Schmelzbadführung . . . . .	25
3.2 Manipulation der Energieeinbringung mittels Figur . . . . .	28
3.2.1 Analyse der Energieverteilung Fig24 . . . . .	29
3.2.2 Analyse der Energieverteilung der Vorversuche . . . . .	32

<b>4</b>	<b>Methoden</b>	<b>35</b>
4.1	Elektronenstrahlschweißen (EBW) . . . . .	35
4.1.1	Spannvorrichtung . . . . .	36
4.2	Temperaturmessung . . . . .	37
4.3	Visuelle Begutachtung . . . . .	38
4.4	Metallographie . . . . .	39
4.5	Röntgen Untersuchung (X-Ray) . . . . .	40
4.6	REM/EPMA . . . . .	40
4.7	Härteprüfung . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Versuche</b>	<b>43</b>
5.1	Schweißfiguren . . . . .	43
5.1.1	Zweibadtechnik . . . . .	45
5.1.2	Fig24 mit EV . . . . .	46
5.1.3	Tulpe . . . . .	47
5.1.4	Schmale Naht . . . . .	49
5.1.5	Heften der Probenbleche . . . . .	49
5.2	Vorversuche . . . . .	50
5.2.1	Durchführung . . . . .	50
5.2.2	Geschweißte Parameter . . . . .	51
5.3	Versuchsreihe A . . . . .	52
5.3.1	Durchführung . . . . .	54
5.3.2	Geschweißte Parameter . . . . .	55
5.3.2.1	Slope In/Out . . . . .	58
5.4	Versuchsreihe B . . . . .	59
5.4.1	Durchführung . . . . .	60
5.4.2	Geschweißte Parameter . . . . .	60
5.4.2.1	Slop In/Out . . . . .	63
5.5	Temperaturmessung . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>65</b>
6.1	Visuelle Begutachtung . . . . .	65
6.1.1	Vorversuche . . . . .	65
6.1.2	Versuchsreihe A/B . . . . .	66
6.2	Metallografische Schliffe . . . . .	67
6.2.1	Vorversuche . . . . .	67
6.2.2	Versuchsreihe A . . . . .	70
6.2.3	Härtemessung . . . . .	73

6.3	Röntgenuntersuchung . . . . .	74
6.3.1	Vorversuche . . . . .	75
6.3.2	Versuchsreihe A . . . . .	76
6.3.3	Versuchsreihe B . . . . .	79
6.4	REM/EPMA . . . . .	83
6.4.1	REM . . . . .	83
6.4.2	EPMA . . . . .	84
6.5	Temperaturmessung . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>89</b>
7.1	Allgemeine Ergebnisse . . . . .	89
7.2	Porosität der Schweißnaht . . . . .	90
<b>8</b>	<b>Conclusio</b>	<b>91</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	91
8.2	Ausblick . . . . .	92
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>95</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>96</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>
	<b>Materialzeugnis Ring04</b>	<b>i</b>
	<b>Simulation</b>	<b>ii</b>

# Nomenklatur

## Abkürzungen

BSE	<i>Backscattered Electrons</i>
CT	<i>Computertomografie</i>
EBW	<i>Electron Beam Welding</i>
ECSS	<i>European Cooperation for Space Standardization</i>
EDX	<i>Energy Dispersive X-ray spectroscopy</i>
EPMA	<i>Electron Probe Micro Analysis</i>
EV	<i>Energie-Verteilung</i>
GJS	<i>Gusseisen mit Kugelgraphit</i>
HV	<i>Härte Vickers</i>
LSND	<i>Low Stress No Distortion</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
REM	<i>Rasterelektronenmikroskop</i>
SE	<i>Sekundärelektronen</i>
SW	<i>Schwarz Weiß</i>
WDS	<i>Wavelength Dispersive Spectrometer</i>
WEZ	<i>Wärmeeinflusszone</i>
WIG	<i>Wolfram Inert Gas</i>

## Physikalische Konstanten

$c$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	299792458 $m/s$
$g$	Erdbeschleunigung	9.81 $m/s^2$
$\pi$	Kreiszahl	3.14159

## Symbole

$\Delta$	Differenz	[-]
$\mu$	Viskosität	[Pa * s]
$\nu$	Frequenzverhältnis	[-]
$\rho_F$	Dichte des Fluides	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_G$	Dichte des Gases	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Standardabweichung	[-]
$\phi$	Phasenverschiebung	[-]
$\omega$	Kreisfrequenz	[Hz]
$A$	Abstand	[mm]
$A_x$	Amplitude in x	[mm]
$A_y$	Amplitude in y	[mm]
$B$	Breite	[mm]
$d_{max}$	maximaler Porendurchmesser	[mm]
$E_p$	Energieeintrag pro Punkt	[J/Punkt]
$F$	Kraft	[N]
$f_F$	Durchlauffrequenz der Figur	[Hz]
$H$	Höhe	[mm]
$I_S$	Strahlstrom	[mA]
$L$	Länge	[mm]
$p$	Druck	[mbar]
$p_K$	Kammerdruck	[mbar]
$P_S$	Strahlleistung	[W]
$q_{add}$	Wärmemenge	[J]
$r$	Radius allgemein	[mm]
$R$	Radius einer Gasblase	[mm]
$Re$	Reynolds-Zahl	[-]
$R_m$	Zugfestigkeit	[MPa]
$t$	Zeit	[sec.]
$t_P$	Verweildauer pro Punkt	[sec./Punkt]
$u$	Blasenaufstiegsgeschwindigkeit	[W/Punkt]
$U_S$	Strahl-Spannung	[kV]
$V$	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
$v$	Vorschub, Schweißgeschwindigkeit	[mm/s]
$\bar{x}$	Mittelwert	[-]



# 1 Einführung

## 1.1 Allgemein

Das Streben der Menschen, den Weltraum zu erkunden, führt zu immer größeren technischen Herausforderungen. So wird der Anspruch an Materialien geringerer Dichte und hoher Festigkeit immer höher. Die Legierung Al6082 erfüllt diesen Anspruch. Nun stellen nicht nur das Material an sich, sondern auch die Verfahren zur Bearbeitung eine Herausforderung dar - oder wie im Fall dieser Arbeit das Fügen des Materials. So ergab es sich, dass die Firma *Peak Technology GmbH* mit dem Projekt „Elektronenstrahlschweißen von dünnwandigen Aluminium-Liner“ an das *IMAT*-Institut der *TU-Graz* heran getreten ist. Solche Liner stellen jenes Element dar, welches bei Druckbehältern (in Leichtbauweise) für die Dichtheit sorgt. Solche Druckbehälter finden mannigfaltigen Einsatz: ob vom Campinggrill über den F1-Boliden bis zur Trägerrakete Ariane. Dieses Projekt wurde von der *Dobeneck Technologie Stiftung* finanziert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Schweißung solcher Liner. Ein bekanntes Problem bei Aluminiumschweißungen ist die Porosität, welche viele Ursachen haben kann. Ziel dieser Arbeit ist es, Nähte guter Qualität zu schweißen, welche möglichst wenig bzw. keine Porosität aufweisen. Die *ECSS-Q-ST-70-39C* erlaubt hierbei einen maximalen Porendurchmesser, von einem viertel, der zu schweißenden Dicke des Materials. Es soll die Auswirkung der Strahlmanipulation mittels Strahl-Figur auf die Schweißnaht untersucht werden. Die Mechanismen der Porenbildung sind ebenfalls zu verstehen und nach Möglichkeit zu untersuchen. Anhand dieses Verständnisses sollen Methoden zur Porenvermeidung erdacht und unter anderem mittels Strahlmanipulation umgesetzt werden. So entstandene Schweiß-Figuren bilden die Grundlage der Schweißversuche auf der EBW-Anlage des *IMAT*-Instituts. Sich daraus ergebende Proben sollen auf geeignete Art und Weise untersucht werden, um die Mechanismen zu prüfen. Zudem sollen reproduzierbare Parameter gefunden werden, welche eine Prozesssicherheit gewährleisten. Diese Arbeit wird von der *Peak Technology GmbH* dahingehend unterstützt, indem benötigtes Material sowie technische Hilfsmittel und Untersuchungen ihrerseits bereit gestellt werden.

### 1.2 Motivation

Ein solcher Liner muss so gut wie keine mechanischen Kräfte absorbieren bzw. leiten, so kann dieser auf eine minimale Wandstärke von unter  $1\text{ mm}$  reduziert werden, um ein möglichst geringes Gesamtgewicht des Druckbehälters zu erzielen. Aus konstruktivem bzw. fertigungstechnischem Anlass wird der Liner aus zwei Hälften hergestellt. Diese zwei Hälften müssen nun mittels einer Schweißnaht gefügt werden.

Die Motivation dieser Arbeit ist es nun, Schweißungen im Dünoblech Bereich an der Legierung Al6082 durchzuführen. Mögliche Poren in der Naht sollten „zulässig“ sein, bzw. ist das Ziel dieser Arbeit porenfreie Nähte zu schweißen. Hier wird auf die Reglementierungen der *ECSS (The European Cooperation for Space Standardization)* eingegangen, welche die zulässige Fehlergröße sowie das Verfahren und das Material vorgibt. Um Poren vermeiden zu können, ist es wichtig deren Entstehung zu verstehen. So soll in dieser Arbeit auch ein Verständnis für die Mechanismen der Porenbildung geschaffen werden. Als Werkzeug zur Porenvermeidung soll der Elektronenstrahl selbst dienen.

# 2 Literaturrecherche & IST-Situation

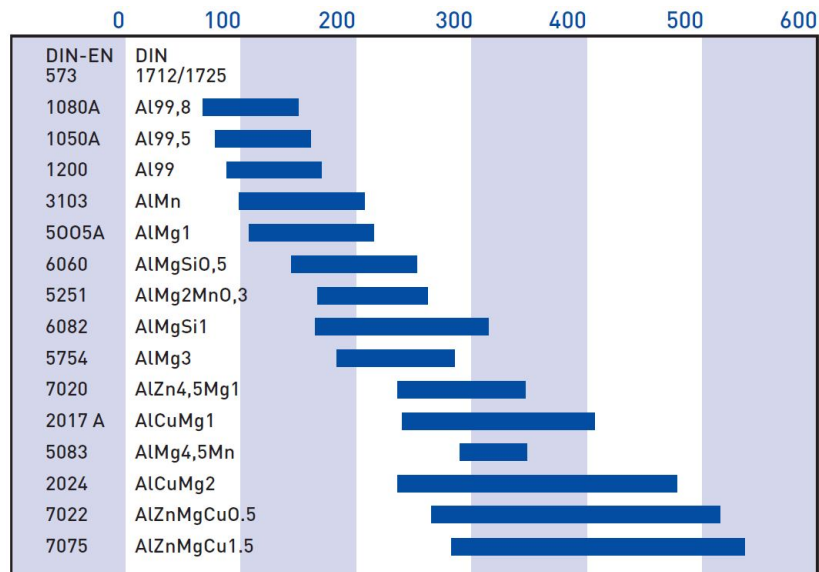
In diesem Kapitel wird auf die Ausgangssituation der bisherigen Versuche und Resultate von der *Peak Technology GmbH* sowie auf bestehende Erkenntnisse aus Literatur und Forschung eingegangen. Des Weiteren werden der Prozess des Elektronenstrahlschweißens sowie Begrifflichkeiten wie z.B.: Strahlablenkung, „Lissajous Figuren“, Fehler, Poren etc. erklärt. Es wird ebenso das zu schweißende Material und dessen Geometrie betrachtet. Diese Betrachtungen führen zu den Fragen mit welcher sich diese Diplomarbeit befasst und auf welche in nachfolgenden Kapiteln eingegangen wird.

## 2.1 Material

Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen sind zu einem der wichtigsten Werkstoffe der heutigen Zeit geworden. Sie bieten viele Vorteile wie z.B.: hohe Korrosionsbeständigkeit aufgrund selbstständiger Passivierung durch Oxidation, eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit, gute mechanische Eigenschaften und Verarbeitbarkeit (je nach Legierung). Die jedoch interessanteste Eigenschaft von Aluminium ist seine geringe Dichte ( $2,7 \text{ kg/dm}^3$ ). Gepaart mit seiner Festigkeit von bis zu  $360 \text{ N/mm}^2$  ergibt sich ein ausgezeichnetes Verhältnis zwischen Festigkeit zu Dichte, welches seinen hohen Stellenwert in der Automobilindustrie sowie in der Luft- und Raumfahrt erklärt [1]. Im nachstehenden Kapitel wird auf die, in dieser Arbeit verwendete Aluminiumlegierung „AL6082“ näher eingegangen. Anschließend wird ein Blick auf die Geometrie der zu schweißenden Bauteile geworfen.

### 2.1.1 AL6082

Die Legierung „AL6082“ ist eine Al-Mg-Si Legierung (6xxx). Dieses Legierungssystem ist die Grundlage für viele Knetlegierungen, welche durch nachfolgende Auslagerprozesse sowie durch mechanische Umformung in ihrer Festigkeit beeinflusst werden können. Anwendungsbereich von Knetlegierungen sind Strangpress-, Walz-, Zieh-, sowie Schmiedeprodukte, welche einen wichtigen Platz in der produzierenden Industrie einnehmen. Diese Legierungen liegen im mittel- bis hochfestem Bereich der Aluminiumlegierungen (siehe Abbildung 2.1), bieten hohe Umformbarkeit und sind zudem gut schweißbar [2]. Letzterer Punkt ist von großer Bedeutung für diese Arbeit.



**Abbildung 2.1:** Festigkeitsbereiche verschiedener Aluminium-Knetlegierungen, Zugfestigkeit  $R_m$  in MPa [3]

Hauptverfestigungsmechanismus dieser Legierung ist das Auslagern von fein verteilten Ausscheidungen ( $Mg_2Si$ ) im Gefüge, welche Versetzungshindernisse darstellen. Es kann ebenfalls noch mit Mischkristallverfestigung und Kaltverfestigung eine Festigkeitssteigerung erzielt werden, jedoch ist und bleibt der Hauptmechanismus die Ausscheidung dieser feinen Teilchen auch, „Dispersionsverfestigung“ genannt [2]. Die anschließende Tabelle zeigt die Grenzen der chemischen Zusammensetzung dieser Legierung, welche gewährleistet, dass die beschriebenen Ausscheidungen auch tatsächlich gebildet werden können.

**Tabelle 2.1:** Bereich der chemischen Zusammensetzung der Legierung AL6082 [4]

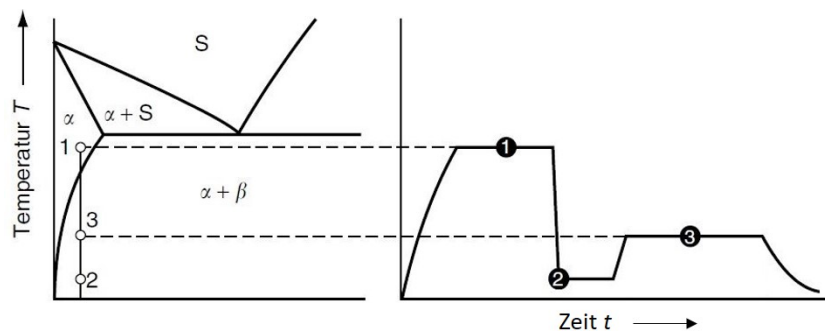
	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Andere
untere Grenze [Massen%]	95,2	0	0	0	0,6	0,4	0,7	0	0	0
obere Grenze [Massen%]	98,3	0,25	0,1	0,5	1,2	1	1,3	0,1	0,2	0,15

Magnesium und Silicium bilden zusammen die wichtigsten Ausscheidungen, wobei Silicium einen leichten Überschuss in dieser Legierung aufweist, welches die Löslichkeit von  $Mg_2Si$  und so die Verteilung der Ausscheidungen begünstigt. Auch Kupfer bildet Ausscheidungen ( $Al_4Mg_8Si_7Cu_2$ ), welche ebenfalls als Blockaden für Versetzungen dienen (hier aufgrund der niedrigen Kupferkonzentration zweitrangig). Andere Legierungsbestandteile, speziell Mangan, Chrom und Eisen bilden dispersive Teilchen, welche nicht zur Festigkeit beitragen. Diese dispersiven Teilchen haben Einfluss auf Kristallisationsverhalten, Löslichkeit, Aufnahme von überschüssigem Si und andere metallurgische Prozesse, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird [2]. Um aber die besprochenen Ausscheidungen und somit auch

die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erzielen, ist eine genaue Prozessführung der Wärmebehandlung von höchster Wichtigkeit. Der grundlegende Prozess teilt sich in drei Schritte [3]:

1. **Lösungsglühen:** Die Legierungselemente werden bei 450 – 550 °C im Aluminiumkristall gelöst.
2. **Abschrecken:** Durch große Abkühlgeschwindigkeit wird die Bildung von Ausscheidungen unterdrückt, die Legierungselemente bleiben im Aluminiumkristall fein verteilt (übersättigter Zustand).
3. **Auslagern:** Es bilden sich fein verteilte Ausscheidungen, welche die Festigkeit steigern. Dies kann kalt bei Raumtemperatur oder warm bei ca. 140 – 190 °C geschehen.

Eine weitere wichtige Größe in der Prozessführung ist die Zeit, da Aufgrund der Reaktionskinetik Bildungs- bzw. Lösungsprozesse unterschiedliche Zeiträume zum Ablaufen benötigen. Natürlich können mit zu kurzen Zeiträumen auch Reaktionen unterbunden werden, wie z.B. beim Abschrecken. Anschließende Grafiken sollen den Faktor Zeit veranschaulichen:

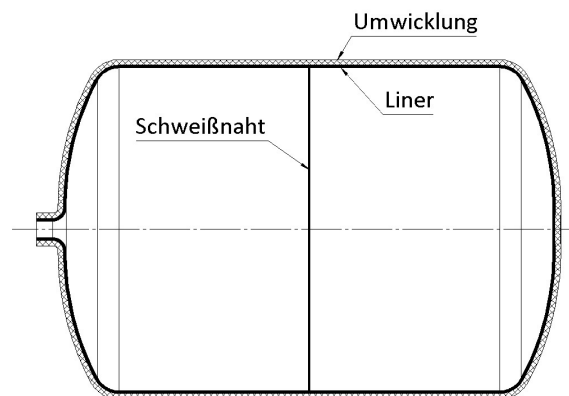


**Abbildung 2.2:** Schematische Prozessführung der Wärmebehandlung [5]

Um die Wärmebehandlung des Werkstoffes zu dokumentieren bzw. reglementieren wird nach der Legierungsbezeichnung ein Kennbuchstabe/eine Kennnummer gesetzt welche/r die Prozesshistorie des Werkstoffes wiedergibt. Die in dieser Arbeit verwendete Legierung, wird beispielsweise wie folgt gekennzeichnet: Al6082 **T651**, was laut Norm (DIN EN 515) auf die Art der Wärmebehandlung und auf die mechanische Behandlung (ebenfalls Einfluss auf die Eigenschaften) des Werkstoffes verweist. Nun ist klar, dass eine Wärmeeinbringung wie z.B. beim Schweißen die zuvor erläuterten Prozesse umkehrt bzw. beeinflusst. So ist die Festigkeit im Schweißnahtbereich bzw. in der Schweißnaht wesentlich geringer als im Grundwerkstoff, was natürlich im Einsatz berücksichtigt werden muss. Weiters entspricht das Schweißnahtgefüge nicht mehr dem des Grundwerkstoffes, weshalb die zuvor erläuterten Eigenschaften hier nicht mehr gelten.

## 2.1.2 Schweißnahtgeometrie

Das zu schweißende Bauteil welches der Anstoß dieser Arbeit ist, stellt einen „Liner“ vom Durchmesser 600 mm dar. Dieser Liner ist Teil eines Druckbehälters der *Peak Technology GmbH*, welcher Anwendung in der Raumfahrt findet. Bestandteil dieses Druckbehälters ist zum einen der Liner, welcher die **Dichtheit** gewährleistet und zum anderen eine Kohlefaserumwicklung (siehe Abbildung 2.3), welche die Kräfte des Druckbehälters aufnimmt (bis zu 300 bar).



**Abbildung 2.3:** Schematische Darstellung eines Drucktanks bestehend aus Liner und Umwicklung

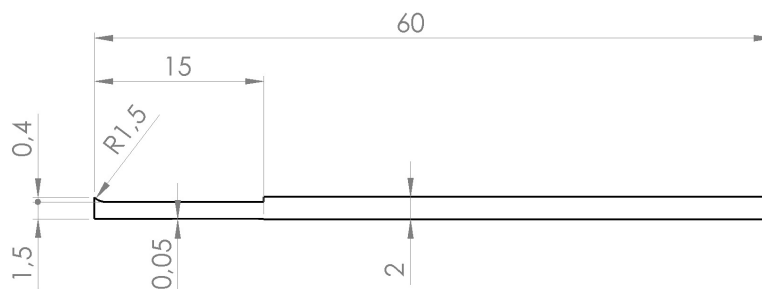
Seitens der *Peak Technology GmbH* wurden parallel zu dieser Arbeit diverse Versuche durchgeführt. Diese dienen als Grundlage der Versuche dieser Arbeit, sowie der verwendeten Probengeometrie. Da der Rohling eines solchen Liner viele vorgelagerte Arbeitsschritte benötigt, welche sehr kosten- und zeitintensiv sind, kommt dieser nicht als Probengeometrie in Frage. Daher wurden Ringe gefertigt, welche nur den Bereich der Fügestelle imitieren. Diese Ringe (siehe Abbildung 2.4) stellen den Vorversuch für den Liner dar. In dieser Arbeit wurden Bleche verwendet, welche dieselbe Kantenvorbereitung wie die Ringe und in weiterer Folge die des Liners aufweisen. Diese Bleche sind die Hauptversuchsproben dieser Arbeit. Sie werden von der *Peak Technology GmbH* für die Schweißung angearbeitet und zur Verfügung gestellt. Diese Bleche bieten mehrerer Vorteile:

- Einfache Bereitstellung
- Einfaches Rüsten in der Maschine (im Vergleich zu einer Rundnaht)
- Einfaches Handling
- Einfachere Probenentnahme und Untersuchung



**Abbildung 2.4:** Geschweißte Versuchsringe

Durch die *Peak Technology GmbH* wurden in Vorstudien verschiedene Schweißnahtanarbeitungen getestet. Die in der Arbeit verwendete Kantenanarbeitung ist ein Stumpfstoß mit „Nase“ und sieht wie folgt aus:



**Abbildung 2.5:** Querschnitt einer Probenplatte mit Kantenanarbeitung

Durch die spanende Bearbeitung an allen Seiten der Kante wird ein Entfernen der Oxidschicht des Aluminiums gewährleistet. Zur Vermeidung einer zu starken, neuerlichen Oxidierung werden die Probenplatten direkt nach dem Fräsprozess luftdicht verpackt. Die an der Stoßkante befindliche „Nase“ dient der Materialbereitstellung beim Schweißprozess. Dies gewährleistet eine von der *ECSS* geforderte Nahtüberhöhung bzw. einen ausreichenden Wurzeldurchhang zur Vermeidung von Einfällen/Kerben. Der Steg von 1,5 mm repräsentiert die tatsächliche Wandstärke im Bereich der Schweißnaht. Der restliche Querschnitt ergibt sich aus dem Grundmaterial, welches zur Probenherstellung verwendet wird. Für die in der Arbeit durchgeführten Schweißversuche wurde ausschließlich diese Geometrie verwendet. Es sei jedoch erwähnt, dass für Vorversuche und Parameterstudien auf einfachem Aluminiumblech der Stärke 2 mm ebenfalls geschweißt wurde („bead on plate“).

### 2.2 Prozess

Es wird nun nach der Definition des Materials und der Schweißnahtgeometrie auf den wohl wichtigsten Part dieser Arbeit eingegangen, den Prozess. Zuerst wird ein Überblick über das Elektronenstrahlschweißen und seinen Einsatz gegeben. In weiterer Folge wird über die Strahlmanipulation und die daraus entstehende Möglichkeit verschiedene „Figuren“ zu schweißen eingegangen. Durch besagte Strahlmanipulation ergibt sich auch die Möglichkeit der „Mehrbadtechnik“, welche ebenfalls erläutert wird. Zudem werden durchgeführte Vorversuche und deren Hintergründe erklärt.

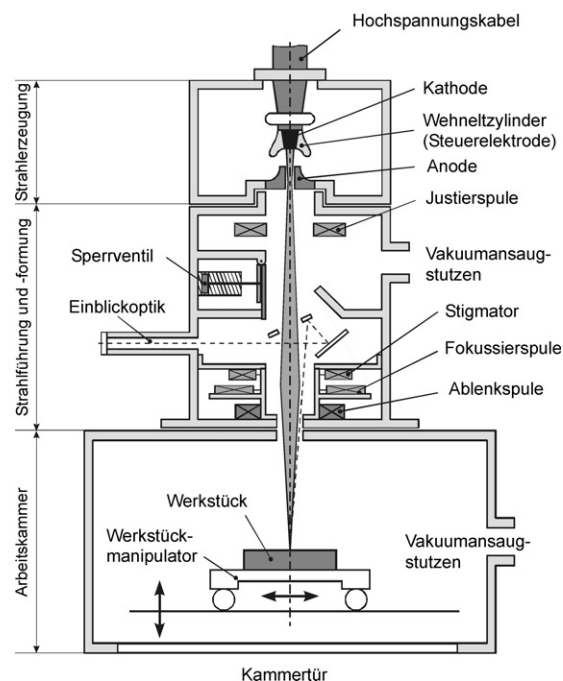
#### 2.2.1 Elektronenstrahlschweißen

Das Elektronenstrahlschweißen kurz EBW (Electron-beam welding) ist eine Technik, die bereits seit Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts existiert. Durch verbesserte Leistungselektronik und Steuerungssoftware hat sich das Elektronenstrahlschweißen von einem Laborverfahren zu einem universell einsetzbaren Schweißverfahren in diversen Industriezweigen entwickelt. Es eignet sich sowohl für Einzelteile als auch für Großserien und für ein mannigfaltiges Materialspektrum [6].

Das Verfahren nutzt als einziges Schmelzschweißverfahren rein das physikalische Prinzip der Umwandlung von kinetischer Energie in Wärme. Hierzu trifft ein gebündelter Strahl aus freien, beschleunigten Elektronen auf feste Materie. Zur Gewinnung der freien Elektronen wird eine Wolframkathode beheizt, dadurch werden die Elektronen durch thermische Emission von dieser gelöst. Dies kann einerseits durch direktes Heizen der Elektrode, andererseits durch indirekten Elektronenbeschuss einer Hilfskathode geschehen. Diese freien Elektronen werden nun durch die Beschleunigungsspannung (30 – 150 kV [7]) zwischen Kathode und einer Anode auf ca. 60 – 70 % der Lichtgeschwindigkeit  $c$  beschleunigt. Zwischen Kathode und Anode befindet sich der sogenannte „Wehneltzylinder“, welcher den Elektronen ein Sperrfeld entgegen setzt (siehe Abbildung 2.6). Durch dieses Sperrfeld, welches über die Steuerspannung geregelt wird, werden die freien Elektronen zu einer Elektronenwolke kumuliert. Der Wehneltzylinder lässt nun durch Beeinflussung des Sperrfeldes gezielt eine gewisse Anzahl an Elektronen passieren, welche dann schlussendlich zur Anode beschleunigt werden. Diese Menge an Elektronen stellt den Strahlstrom dar. Diese beschleunigten Elektronen passieren aufgrund der hohen Geschwindigkeit die Anode und werden dann über Justier-, Fokussier- und Ablenkspulen zu einem dünnen Strahl geformt bzw. bewegt. Diese Spulen kann man mit Linsen/Prismen aus der Lasertechnik vergleichen, mit dem Unterschied, dass die Spulen über Magnetfelder den Strahl manipulieren. Dadurch lässt sich der Strahl mit enormen Geschwindigkeiten bewegen, da es keine mechanischen Teile bzw. Trägheiten in der Strahlführung gibt. Dem Strahl wird nun eine Optik überlagert,



um das Positionieren in der Arbeitskammer zu erleichtern. Hier sei erwähnt, dass der Stahlerzeuger und die Arbeitskammer beim Schweißen unter einem Hochvakuum ( $10^{-5} Pa$ ) stehen. Den Atome, wie die von Gasen, stellen ein Hindernis für die Elektronen dar und würden so den Strahl schwächen bzw. zerstreuen [8]. Zum Rüsten eines Werkstückes werden der Stahlerzeuger und die Arbeitskammer mittels eines Sperrventils von einander getrennt (siehe Abbildung 2.6), damit sich der Stahlerzeuger permanent im Vakuum (zum Schutz der Kathode) befindet. Beim Schweißen wird das Werkstück mittels eines Maschinentisches manipuliert bzw. können durch spezielle Spannvorrichtungen wie z.B. einem Rundtisch auch andere Nahtformen geschweißt werden.

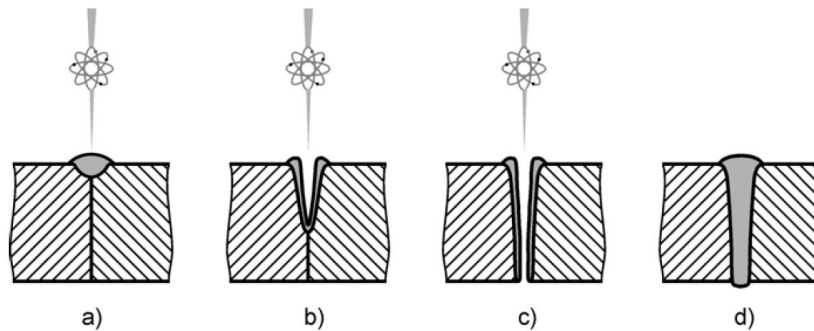


**Abbildung 2.6:** Schematische Darstellung einer Elektronenstrahlschweißanlage [6]

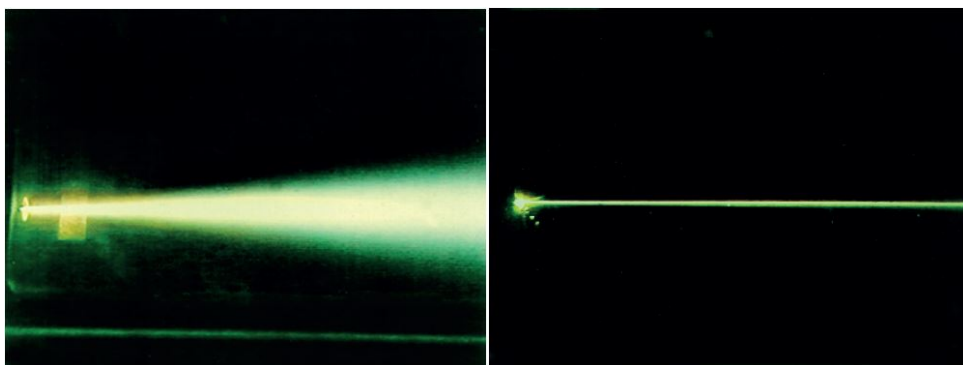
Beim Schweißprozess trifft der Elektronenstrahl, wie bereits erwähnt, auf das Werkstück und die kinetische Energie der Elektronen wird in Wärmeenergie umgewandelt. Abhängig vom Material und der Spannung dringen die Elektronen jedoch nur wenige  $\mu m$  in das Material ein (siehe Tabelle 2.2). Durch die radikale Abbremsung der Elektronen werden diese ersten  $\mu m$  aber sofort verdampft und nachfolgende Elektronen können tiefer in den Werkstoff eindringen. So entwickelt sich eine Kapillare. Dieser Vorgang wird auch „Tiefschweißeffekt“ genannt (siehe Abbildung 2.7 a-c). Die Kapillare auch „Keyhole“ genannt, wird von der flüssigen Schmelze umgeben. Durch den Vorschub des Schweißens wandert das Keyhole durch den Werkstoff. Dadurch umströmt die flüssige Schmelze die Kapillare und beginnt auf der Rückseite (gesehen in Schweißrichtung) zu erstarren (siehe Abbildung 2.7 d)[8]. Durch den Tiefschweißeffekt lassen sich Schweißnahtdicken von  $150 mm$  in Stahl und  $300 mm$  in Aluminium erzielen [6].

**Tabelle 2.2:** Eindringtiefe der Elektronen in verschiedene metallische Werkstoffe [8]

	Mg	Al	Ti	Cu	Fe	W
60 kV	35 $\mu\text{m}$	23 $\mu\text{m}$	14 $\mu\text{m}$	7 $\mu\text{m}$	8 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$
120 kV	112 $\mu\text{m}$	72 $\mu\text{m}$	43 $\mu\text{m}$	22 $\mu\text{m}$	25 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$

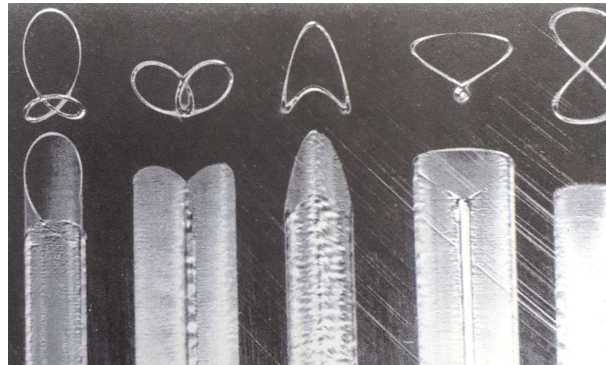
**Abbildung 2.7:** Schematische Darstellung des Tiefschweißeffektes [6]

Mit niedrigen Spannungen und geringeren Stromstärken kann die Energie des Strahles reduziert werden. Wird nun sehr schnell geschweißt bzw. der Strahl sehr schnell bewegt, hat das Keyhole keine Zeit und nicht die nötige Energie um sich zu bilden. Hier wird dann von „Wärmeleitungsschweißen“ gesprochen, was sich auch auf die Nahttiefe und das Nahtaussehen auswirkt. Dies wird speziell bei dünnwandigen Bauteilen und bei Oberflächenbearbeitung ausgenutzt. Hier spielt auch die Fokusslage des Strahles eine wichtige Rolle, da sie die „Schärfe“ des auftreffenden Strahles bestimmt [6]. Ebenso hat das in der Kammer erzeugte Vakuum einen großen Einfluss auf die Qualität des Strahles. Je höher das Vakuum desto feiner und präziser der Strahl, welcher auf das Werkstück trifft (siehe Abbildung 2.8)[8]. Auch der aufsteigende Metalldampf kann den Strahl in seiner Qualität beeinträchtigen.

**Abbildung 2.8:** Einflusses des Vakuums auf die Strahlqualität. Links 500 *mbar* Restdruck, rechts 50 *mbar* Restdruck [8]

### 2.2.2 Strahlableitung

Wie in Kapitel 2.2.1 bereits erwähnt, lässt sich der Elektronenstrahl mittels Magnetfeldern sehr exakt und schnell bewegen. Somit lassen sich komplexe Linienzüge und Formen mit dem Elektronenstrahl durchlaufen. Dies wird für verschiedenste Anwendungen wie z.B. Schweißen, Nahtglättung, Wärmebehandlungen, Oberflächenstrukturierung etc. genutzt. Beim herkömmlichen Schweißen wird oft ein „Punkt“ verwendet, welcher mittels Fokusslage „weicher“ oder „schärfer“ gestellt werden kann. Dies hat direkten Einfluss auf das Aussehen bzw. den Querschnitt der Naht. Diese Art der Schweißung bietet viele Vorzüge, wie eine schlanke Naht mit geringer Wärmeeinflusszone, jedoch benötigt man einen „sauberen“ Nahtstoß [9]. Ist eine breitere Naht erwünscht, wird in der Praxis gerne ein Kreis gewählt. Es sind jedoch so gut wie alle erdenklichen Formen möglich, weshalb auch gerne von Strahlfiguren gesprochen wird. Einige Beispiele solcher Figuren finden sich in Abb. 2.9.



**Abbildung 2.9:** Beispiele möglicher Strahlfiguren [10]

Die Form der Strahlfigur hat nicht nur Einfluss auf das Aussehen der Schweißnaht, sondern ist auch maßgeblich verantwortlich für die Wärmeverteilung im Schmelzbad bzw. die dadurch entstehenden Schmelzbadströmung. Dies hat in weiterer Folge Einfluss auf das Erstarren des Schmelzbades und auf die Entstehung möglicher Poren, was den Kern dieser Arbeit darstellt. Dies führt zu dem Schluss, dass der Einfluss verschiedener Strahlfiguren auf das Schmelzbad im Fall dieser Arbeit essentiell ist und daher genauer betrachtet wird. Einflussfaktoren der Strahlfigur sind:

- Form/Gestalt der Figur [11]
- Größe der Figur (Amplitude in x,y) [12]
- Frequenz mit welcher die Figur durchlaufen wird [13]
- Wie die Figur durchlaufen wird [14]
- Auflösung der Figur (Anzahl der Punkte aus der die Figur besteht)

All diese Parameter stehen miteinander in Wechselwirkung und haben ebenfalls Einfluss auf die verwendete Strahlleistung. In der Literatur wird mehrmals die Figur der stehenden bzw. liegenden Acht ( $8, \infty$ ) betrachtet. So z.B. in dem Artikel von Kabasakaloglu [13], in welchem die Auswirkungen von verschiedenen Frequenzen und Fokuslagen auf die Porosität in der Legierung Al5083 untersucht wird, jedoch mittels Laserschweißen. Die hierzu verwendete Figur ist eine „8“, die Figur steht senkrecht zur Schweißtrajektorie ( $-8 \rightarrow$ ). Auch Chen untersucht in seinem Artikel [12] die Acht als Schweißfigur, jedoch liegt sie auf der Schweißtrajektorie ( $-\infty \rightarrow$ ). Wie auch Kabasakaloglu untersucht Chen die Einflüsse der Frequenz und Fokussierlage auf die Porosität, ebenfalls mittels Laserschweißen an der Legierung Al5052. In beiden Artikeln sieht man gut die Wechselwirkung der einzelnen Parameter und ihre Auswirkung auf die Nahtform sowie Porosität. Im Artikel von Wang [14] wird nicht eine Schweißfigur untersucht, sondern die generellen Auswirkungen von transversaler, longitudinaler und zirkularer Schwingung eines Schweißpunktes beim Laserschweißen. Dadurch wird ein Verständnis für die Bewegung im Schweißbad und die daraus folgende Erstarrung der Schweißnaht geschaffen. Jedoch wurde hier Material der Stärken  $3\text{ mm} - 5\text{ mm}$  verwendet. Anders beim Artikel von Dinda [15], welcher den Einfluss der Strahloszillation von einem Elektronenstrahl auf Porosität in der Schweißnaht untersucht. Jedoch wurde diese Untersuchung anhand einer artfremden Materialpaarung (AL5754 mit DP600) durchgeführt.

Parallel zu dieser Diplomarbeit wurden im Zuge eines „Student Project Marathon“ in Kooperation mit der *Polytechnischen Peter-der-Große-Universität Sankt Petersburg* die Unterschiede von Laserstrahl- und Elektronenstrahlschweißen anhand der Legierung Al6082-T6 untersucht und verglichen [16]. Weiters wurde aufbauend auf diesem Projekt eine weitere Untersuchung zum Thema „*Influence of beam figures on bead on plate welding of aluminium*“ [11] durchgeführt (siehe Kapitel 2.2.4). Diese Arbeit stellt ein gutes Bindeglied zu der erwähnten Literatur dar und soll helfen das Verständnis für die Strahlfiguren zu verbessern. Zudem wurde eine Schweißfigur, welche von der *Peak Technology GmbH* in Ihren Versuchen verwendet wird, ebenfalls genauer betrachtet. Hierbei handelt es sich um eine **Lissajousche Figur**, welche sich aus zwei aufeinander senkrecht stehenden Schwingungen ergibt [17]. Dies Bahn wird durch folgende Gleichungen beschrieben [18]:

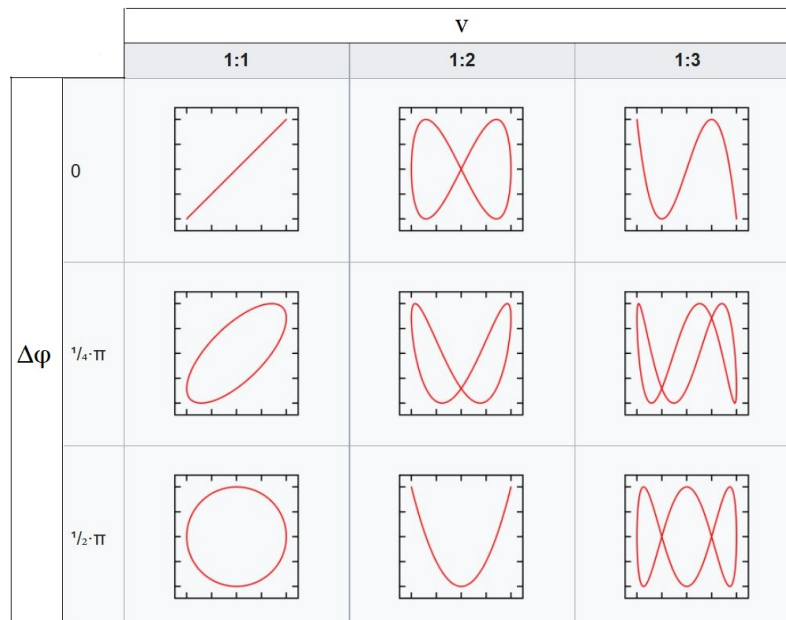
$$t \mapsto \begin{pmatrix} A_x \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ A_y \sin(\omega_2 t + \phi_2) \end{pmatrix}, \quad t \in [0, \infty) \quad (2.1)$$

Gleichung 2.1 stellt die zwei Einzelschwingungen  $(x, y)$  parametrisiert über die Zeit  $t$  dar, wobei  $A$  die Amplitude  $(x, y)$ ,  $\omega$  die Kreisfrequenz und  $\phi$  die Phasenverschiebung darstellen. Die Figur ist dann periodisch, wenn das Frequenzverhältnis  $\nu$  rational ist (z.B. 1).

$$\nu = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2.2)$$

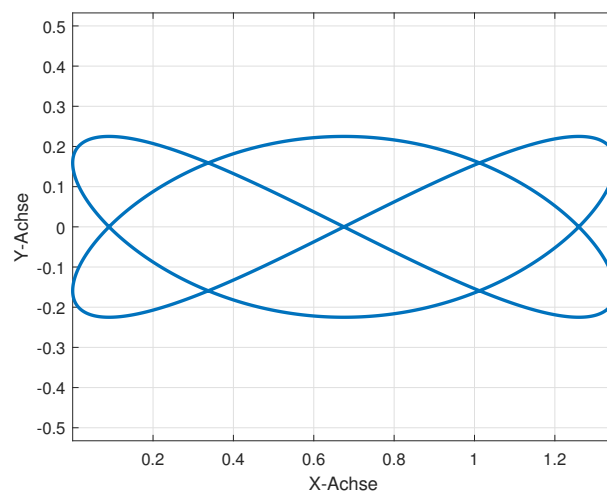
$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.3)$$

Durch  $\Delta\phi$  wird die Phasenverschiebung der beiden Schwingungen zueinander definiert. Somit wird die Bahn der Lissajoussche Figur durch  $\nu$  und  $\Delta\phi$  definiert, ihre Größe hängt von  $A_x$  und  $A_y$  ab. Nachstehend einige Bsp. für Lissajoussche Figuren.



**Abbildung 2.10:** Beispiele Lissajoussche Figuren [18]

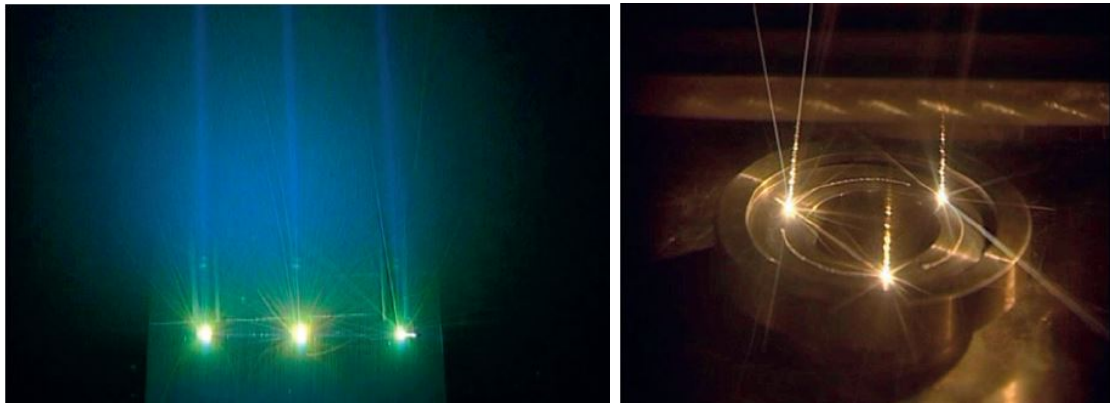
Eine auch von der *Peak Technology GmbH* verwendete Lissajoussche Figur (siehe Abbildung 2.11), definiert sich durch ein Frequenzverhältnis  $\nu$  von 2:3 und einem  $\Delta\phi$  von 0. Die Größe der Figur beträgt in Schweißrichtung ( $x$ -Achse)  $1,35\text{ mm}$  und in  $y$   $0,45\text{ mm}$ . Sie trägt auch die Bezeichnung **Fig24**, welche des öfteren in dieser Arbeit verwendet wird.



**Abbildung 2.11:** Lissajoussche Figur (Fig24):  $\nu = 2:3$ ;  $\Delta\phi = 0$

### 2.2.3 Mehrbadtechnik

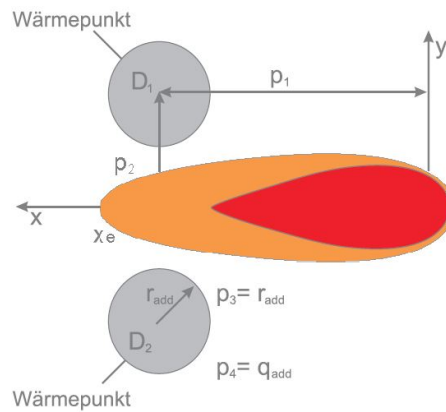
Wie schon mehrfach erwähnt lässt sich der Elektronenstrahl ohne bemerkbare Trägheiten bewegen und manipulieren. Nun liegt der Gedanke nahe simultan an mehreren Stellen zu schweißen, was aufgrund der schnellen Strahlablenkung durchaus möglich wäre. Der Strahl wird dabei so schnell zwischen mehreren Schweißstellen oszilliert, dass es möglich ist, die thermische Trägheit des Werkstoffes zu überwinden, sodass das Schmelzbad bzw. das Keyhole die Abwesenheit des Strahles nicht bemerkt (siehe Abbildung 2.12) [8] [6].



**Abbildung 2.12:** links: drei Linienähte, rechts drei Rundnähte [8]

Durch diese über das Bauteil verteilte Wärmeeinbringung lässt sich z.B. der Verzug vermindern bzw. lassen sich Wärmestaus vermeiden. Die Mehrbadtechnik eignet sich aber nicht nur um simultan zu schweißen, sondern es können auch gezielte Wärmebehandlungen durchgeführt werden. Sei es das Vorwärmen vor der eigentlichen Schweißnaht oder das Nachwärmen um z.B. den Nahtsaum zu glätten. Es können auch Wärmequellen außerhalb der Naht geführt werden, wie es z.B. das LSND-Verfahren (Low Stress No Distortion) nutzt. Wie der Artikel von Li [19] zeigt, können durch Einbringung von Wärme parallel zur Schweißnaht Schweißspannungen und Verzug deutlich vermindert werden. Es wurden hier aber mit einem Hybridverfahren bestehend aus einem MIG- und zwei WIG-Brennern gearbeitet. Zusätzlich wurde eine separate Kühlung verwendet.

Es ist aber durchaus denkbar, aufgrund der hohen Energiedichte des Elektronenstrahles, ähnliche Effekte auf geringerem Raum zu erzielen. Daher wird dieser Prozess in der Elektronenstrahltechnologie bereits zur Vermeidung von Heißrissen verwendet. Hier werden mittels zwei Wärmepunkten, welche hinter bzw. neben dem Schmelzbad liegen, Spannungen in den Werkstoff induziert. Diese Spannungen führen zu einem „zusammen-drücken“ des erstarrenden Schmelzbades und minimieren so die Gefahr von Heißrissen. Wie in Abbildung 2.13 ersichtlich, ergeben sich zusätzlich zu den Schweißnahtparametern weitere vier Parameter ( $p_1$ - $p_4$ ).



**Abbildung 2.13:** Schema einer Wärmeführung zur Vermeidung von Heißbrissen [8]

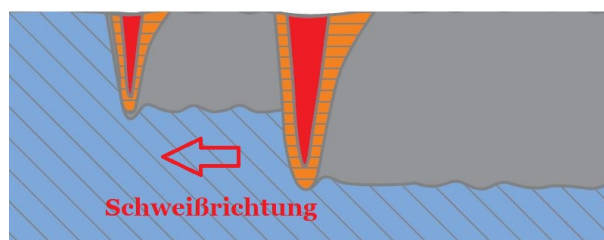
$p_1$ : Abstand von Schweißwärmequelle zu Wärme Punkt in Schweißrichtung

$p_2$ : Abstand vom Wärme Punkt zur Schweißnahtmitte

$p_3$ : Größe des Wärme Punktes  $r_{add}$

$p_4$ : Wärmemenge  $q_{add}$ , welchem dem Wärme Punkt mittels Strahl zugeführt wird.

Eine weitere Möglichkeit der Mehrbadtechnik, ist es gezielt vor- bzw. nachzuwärmen. Dies wird mittels zweier oder mehrerer nacheinander geführter Schmelzbäder erzielt (siehe Abbildung 2.14). In dem Bericht von Eibisberger [20] wurde gezeigt, dass durch eine Mehrbadschweißung das Ausgasen von Poren (aus GJS) begünstigt wurde, wenn mittels dreier nacheinander folgender Schmelzbäder mit absteigender Intensität geschweißt wurde. Ebenso wird diese Technik beim Aluminiumdruckguss angewandt [8].



**Abbildung 2.14:** Schema des Vorwärmens mittels zweiten Schmelzbades [8]

Die Mehrbadtechnik kann zum einen durch Softwaretools bzw. einem zweiten Elektronenstrahl (zweite Strahlenkanone) realisiert werden und zum anderen über die Figur selbst. Dies erreicht man durch Zusammenführen einzelner Figuren zu einer Schweißfigur. Hier muss auf die Skalierung und den maximalen Bereich geachtet werden, in dem der Strahl ausgelenkt werden kann. Durch die Strahlfrequenz, welche angibt wie oft der Strahl die Figur durchläuft, lässt sich die Verweildauer des Strahles pro Punkt berechnen und in weiterer Folge die eingebrachte Energie der Einzelfiguren.

## 2.2.4 Vorversuche

Der Bericht von Kuzicheva [11] zu einer am *IMAT-Institut* verfassten Projektarbeit wurde im Zuge dieser Diplomarbeit mitbetreut und dient als Grundlage für einige Entscheidungen. Zudem diente er als Einstieg in die Parameterfindung und in den Umgang mit dem Prozess sowie dem Material. Es sei jedoch angemerkt, dass der Bericht völlig entkoppelt zu dieser Arbeit entstanden ist und es keinen Austausch von Informationen mit der *Peak Technology GmbH* gab. Inhalt dieser Projektarbeit ist der Einfluss von verschiedenen Strahlfiguren und Frequenzen auf die Nahtform (Querschnitt) bzw. das Nahtaussehen. Geschweißt wurden Blindnähte auf 2 mm dicken Al6082-T6 Platten. Als Figuren wurden die folgenden gewählt (siehe Abbildung 2.15). Schweißrichtung entspricht hier der  $x$ -Achse (links→rechts):

- Kreis, als Referenzfigur, da sehr gebräuchliche Schweißfigur
- Stehende Acht (stehend im Bezug auf Schweißrichtung)
- Liegende Acht (liegend im Bezug auf Schweißrichtung)
- Fischfigur (Eigenname, eigentlich *vivianisches Fenster* [21])

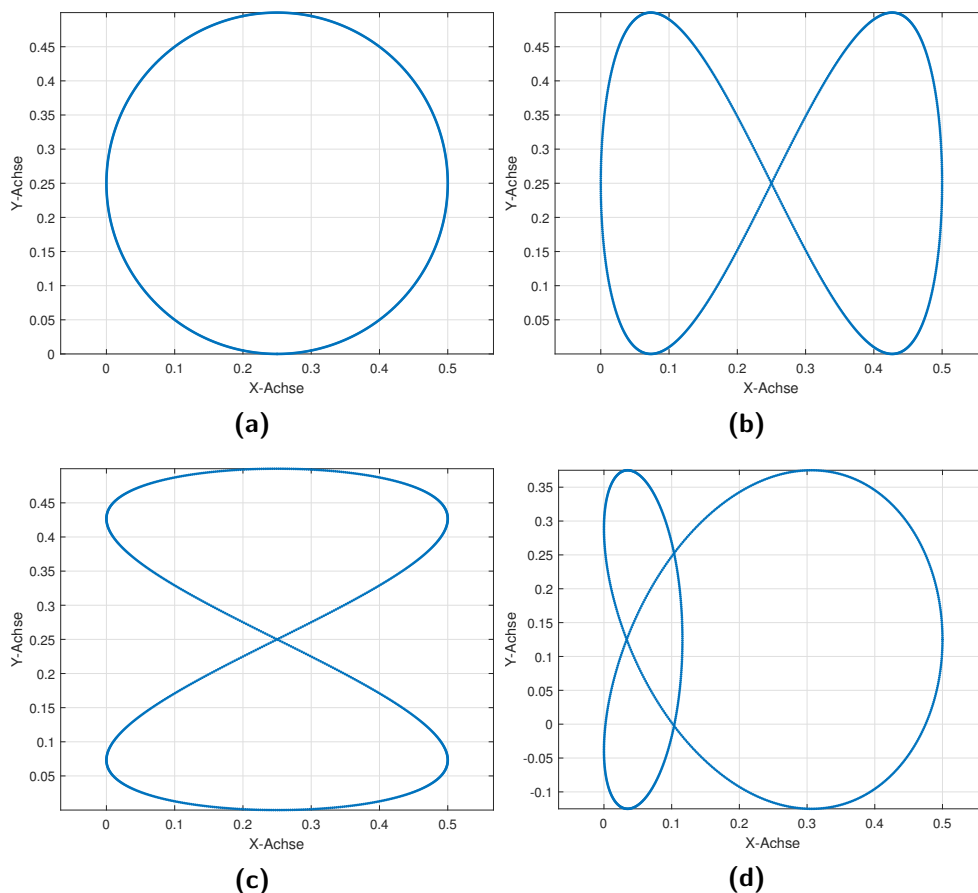


Abbildung 2.15: Verwendete Figuren der Projektarbeit [11]



## 2.3 Schweißnahtfehler

Da es in dieser Arbeit im Allgemeinen um das Vermindern von Poren geht, wird im nachfolgenden Abschnitt auf den Begriff der „Schweißnahtfehler“ eingegangen. Hierzu wird ein Überblick über Definitionen laut Norm gegeben und erläutert. Im Speziellen wird dann die Entstehung von Poren in der Schweißnaht betrachtet. Dies wird anhand bestehender Schweißnähte der *Peak Technology GmbH* analysiert.

### 2.3.1 Allgemeine Schweißnahtfehler

Schweißen ist ein in der Praxis etabliertes Fügeverfahren und unterliegt daher einer Reihe von Gesetzen und Normen. So ist es wichtig beim Schweißprozess gewisse Qualitätskriterien zu erfüllen, um eine Prozesssicherheit zu gewährleisten. Nicht jede Schweißnaht ist in der Praxis gleich und erfüllt die gleichen Ansprüche, weshalb es Grenzen der Zulässigkeit gibt. Laut DIN EN ISO 6520 wird bei Schweißungen nicht von Fehlern gesprochen, sondern von „Unregelmäßigkeiten“ [22]. Eine Unregelmäßigkeit wird in dieser Norm als „*Fehlstelle in der Schweißung oder eine Abweichung von der vorgesehenen Geometrie*“ definiert. Entspricht eine Unregelmäßigkeit nicht den vorgegebenen Kriterien, gilt diese als „*unzulässig*“. In dieser Arbeit wird für unzulässige Unregelmäßigkeiten der umgangssprachliche Begriff „Fehler“ verwendet. In der DIN EN ISO 6520-1 werden Unregelmäßigkeiten in sechs Hauptgruppen unterteilt:

1. Risse
2. Hohlräume
3. feste Einschlüsse
4. Bindefehler und ungenügende Durchschweißung
5. Form- und Maßabweichungen
6. sonstige Unregelmäßigkeiten

Aus diesen Hauptgruppen folgen Ordnungsnummern, welche Untergruppen der Unregelmäßigkeiten bezeichnen (zB. 2011-2018 für Poren/Porenformen). Es wird im Weiteren nur mehr auf Poren eingegangen, da sie das Kernthema dieser Arbeit sind. In der Norm EN ISO 13919-2 werden den Ordnungsnummern unter Berücksichtigung der entsprechenden Bewertungsgruppe (je nach Anforderung: D-Niedrig, C-Mittel, B-Hoch) die entsprechenden maximalen Abmessungen der Unregelmäßigkeiten zugewiesen [23]. Die EN ISO 13919-2 bezieht sich hierbei auf das Elektronenstrahlschweißen von Aluminium. Nachdem die *Peak*

*Technology GmbH* auch Produkte für die Raumfahrt produziert, muss wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, zusätzlich die ECSS-Q-ST-70-39C herangezogen werden. Welche ihre eigenen Reglementierungen im Bezug auf Unregelmäßigkeiten aufweist, aber in Anlehnung an die Bereits erwähnten Normen [24]. Diese gibt im Bezug auf das Elektronenstrahlschweißen (511) unter Betrachtung des Werkstoffes Aluminium (Materialgruppe D) folgenden maximalen Porendurchmesser vor:

$$d_{max} = t * 0.25 \quad (2.4)$$

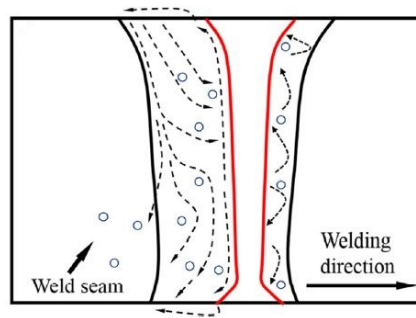
Wenn man nun für  $t$  die Wandstärke der Schweißnahtgeometrie ( $1.5 \text{ mm}$ , siehe Kapitel 2.1.2) einsetzt, erhält man:

$$d_{max} = 1.5 \text{ mm} * 0.25 = \mathbf{0.375 \text{ mm}}$$

Dieser Wert stellt den maximal zulässigen Porendurchmesser für folgende Untersuchungen und Analysen dar. Auf weitere Abmessungen von Unregelmäßigkeiten wird nicht weiter eingegangen.

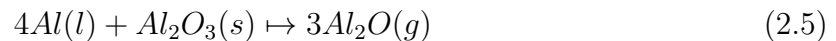
### 2.3.2 Entstehung von Poren

Poren entstehen durch Gasblasen in der Schmelze, welche es nicht schaffen diese zu verlassen (Ausgasen), bevor das Schmelzbad erstarrt. Somit bleiben in der Schweißnaht leere Hohlräume zurück. Im Gegensatz zu z.B. Einschlüssen. Da beim Elektronenstrahlschweißen im Hochvakuum geschweißt wird, ist ein Eindringen von Gas in die Schmelze ausgeschlossen. Das Gas muss also während des Schweißens in der Schmelze entstehen. Dies geschieht durch den Prozess an sich, da durch die hohe Energie des Strahles der Werkstoff sofort verdampft (sublimiert). Dieser Effekt wird (wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben) für den Tiefschweißeffekt genutzt. Das daraus entstehende Keyhole besteht de facto aus Metaldampf. Die Strömungen im Schmelzbad sind, sehr komplex, da mehrere physikalische Effekte zusammenspielen, wie Chen in dem Artikel [25] beschreibt. Diese Strömungen haben Einfluss auf die Blasenbewegung in der Schmelze wie Abbildung 2.16 zeigt. Hier wird allerdings ein Keyhole vorausgesetzt, was nicht die Situation des Wärmeleitungsschweißens wiedergibt. Es gibt jedoch noch andere Möglichkeiten wie Gas in der Schmelze entsteht. Eine davon ist die Entstehung einer Gasphase, welche Aluminium (Al) mit Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) bildet, wie im Artikel von Fujii beschrieben [26].

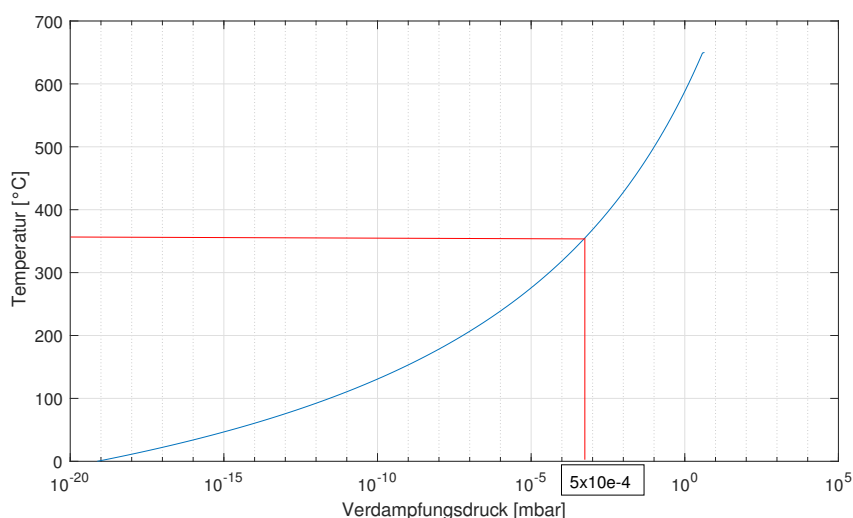


**Abbildung 2.16:** Einfluss von Schmelzbadströmungen auf Porenbewegung [25]

Hierbei geht das flüssige (liquid) Aluminium mit dem festen (solid) Aluminiumoxid in eine Gasphase (gas) über, wie in folgender Gleichung gezeigt wird:



Diese Art der Porenbildung ist stark vom Vorhandensein der Oxidschicht des Aluminiums abhängig, denn je mehr Aluminiumoxid vorhanden ist, desto mehr Reaktionspartner stehen zur Verfügung. Eine weitere Art der Gasbildung stellt die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes selbst dar. Al6082 enthält  $Mg_2Si$ -Ausscheidungen, welche als Verfestiger dienen (siehe Kapitel 2.1.1). Wenn man sich nun die physikalischen Eigenschaften von Mg ansieht, erkennt man dass die Verdampfungstemperatur bei Atmosphärendruck bei  $1083^\circ\text{C}$  liegt [27]. Da die Verdampfungstemperatur eine Funktion des Druckes ist, muss der Einfluss des Hochvakuums ebenfalls berücksichtigt werden. In nachstehender Abbildung ist diese Funktion als Graph abgebildet. Zudem wurde das Vakuum von  $5 \cdot 10^{-4}$  mbar (durchschnittlich erreichtes Vakuum beim Schweißen) eingetragen. Daraus lässt sich eine Verdampfungstemperatur von ca.  $350^\circ\text{C}$  ablesen.



**Abbildung 2.17:** Verdampfungstemperatur (Mg) als Funktion von Druck  $p$  [27]

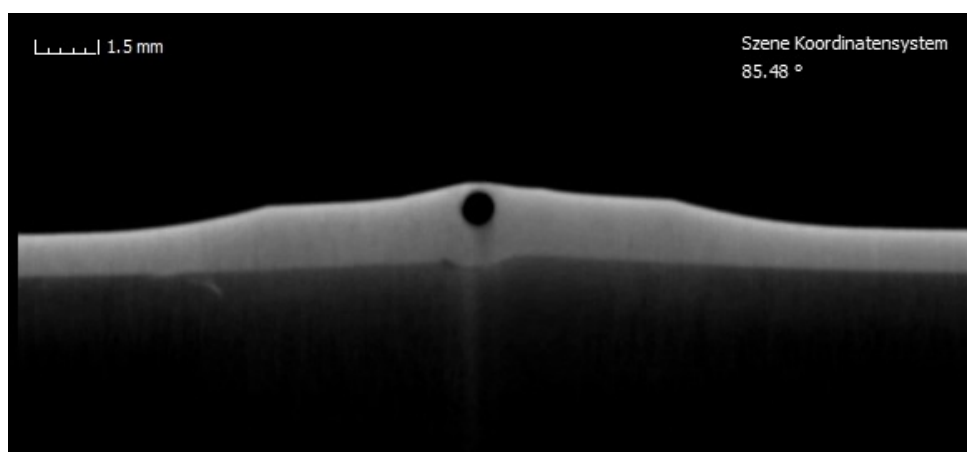
Somit liegt der Verdampfungspunkt von Magnesium deutlich unter der Schmelztemperatur von Aluminium, was bei der Erstarrung eine wichtige Rolle spielt. Bei allen anderen Legierungselementen liegt die Verdampfungstemperatur deutlich über der Schmelztemperatur von Aluminium (siehe Tabelle 2.3). Dadurch geht das Magnesium aus dem Schmelzbad aus, was zu einer Reduktion von Mg in der Schweißnaht führt. Diesen Effekt thematisiert Zhan in seinem Artikel [28], in welchem er auf die Gefügestruktur und die Festigkeit der Schweißnaht eingeht.

**Tabelle 2.3:** Dampftemperaturen der relevanten Elemente bei  $5e-4$  mbar [27]

	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si
Dampftemperatur [°C]	1053.7	1219.2	1077.6	1283.5	352.49	1410.2	1527.7

### 2.3.3 Analyse bestehender CT-Daten

Zu Beginn dieser Arbeit wurden seitens der *Peak Technology GmbH* zwei geschweißte Ringe (Ring04, Ring20) für Untersuchungszwecke zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 2.4). Es wird in weiterer Folge nur mehr Ring04 betrachtet, da dieser mehr Poren aufweist. Für diese Ringe standen CT-Daten zur Verfügung, welche in diesem Kapitel nun ausgewertet und analysiert werden. Da die CT-Daten sehr umfangreich sind, wurden für nachfolgende Analysen die Poren-position in der Schweißnaht und deren Volumen herangezogen. Bild 2.18 zeigt eine Pore, welche mittels CT im Ring04 detektiert wurde und veranschaulicht die Größe mancher Poren im Verhältnis zur Nahtdicke.

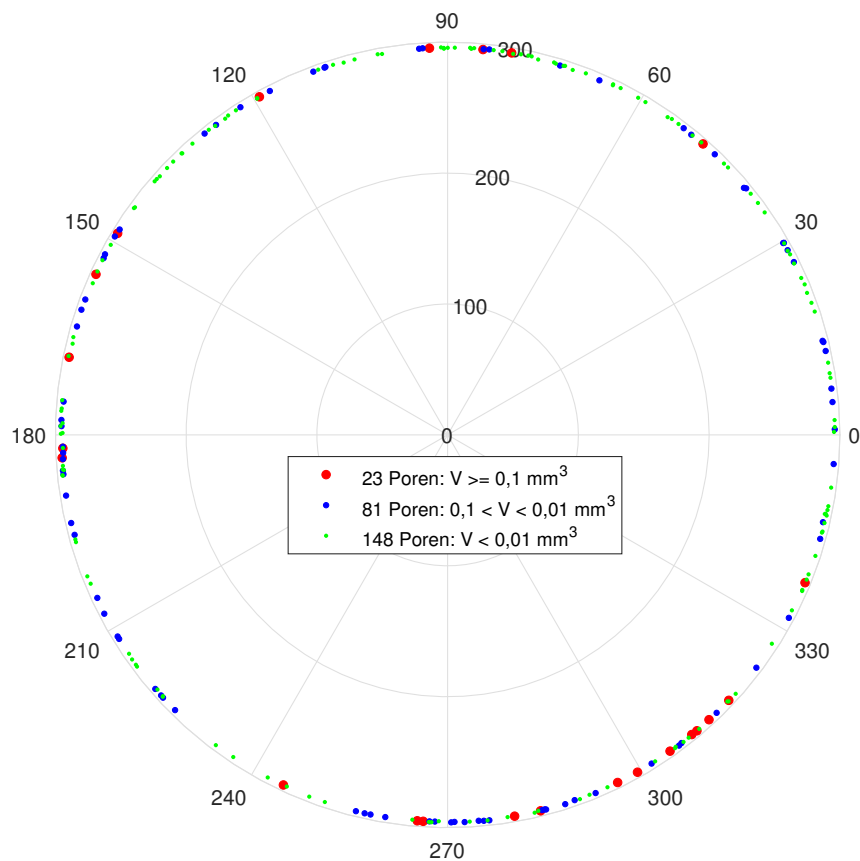


**Abbildung 2.18:** Pore in Schweißnaht bei  $85.5^\circ$  (Quelle: *Peak Technology GmbH*)

Um ein Gefühl für die Größe der Poren in der Naht zu bekommen, wurden diese in drei Größengruppen nach ihrem Volumen unterteilt (der zuvor erwähnte maximal zulässige Porendurchmesser wurde hier nicht berücksichtigt):

$$V \leq 0.01 \text{ mm}^3, \quad 0.01 \text{ mm}^3 < V < 0.1 \text{ mm}^3, \quad 0.1 \text{ mm}^3 \leq V$$

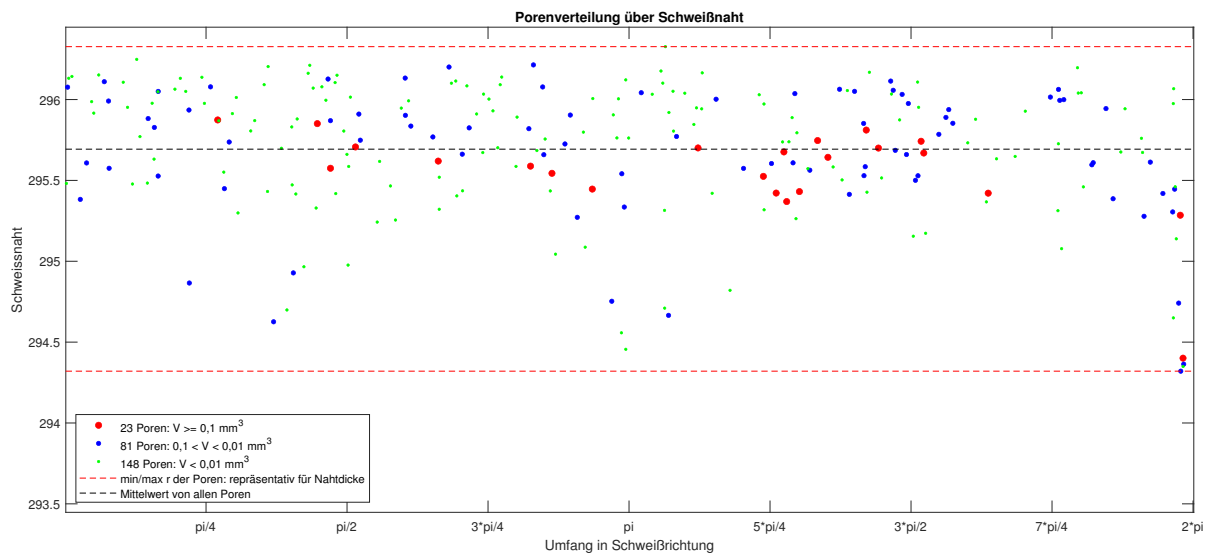
Um die Position der Poren sichtbar zu machen, wurden sie in polarer Form dargestellt.  $r$  entspricht dabei der Ringgröße, der Nullpunkt des Winkels entspricht dem Schweißnahtanfang bzw. -ende. Auf die axiale Position wurde verzichtet, somit bezieht sich dieser 2D-Plot auf die Mittellage der Schweißnaht. Wie Abbildung 2.19 zeigt, befinden sich Poren gleichmäßig über den ganzen Ring verteilt. Es finden sich in jedem Quadranten Poren aller Größen, im vierten Quadranten ( $270 - 0^\circ$ ) jedoch mehr Poren der größten Kategorie.



**Abbildung 2.19:** Position verschieden großer Poren am Ringumfang

In der zweiten Auswertung (Abbildung 2.20) wurde nun die Lage der Poren in der Schweißnaht beurteilt. Hierzu wurde die Naht abgewickelt ( $0 - 2\pi$ ) und dem Radius der Poren gegenübergestellt. Die zwei roten Linien repräsentieren zum einen den kleinsten Radius der Schweißnaht (Wurzel) und zum anderen den größten Radius der Schweißnaht (Schweißnahtoberfläche). Bei der schwarzen Linie handelt es sich um den Mittelwert des Radius aller Poren. Wie deutlich ersichtlich ist, liegt die Mehrheit der Poren im oberen

Drittel der Schweißnaht (hierbei wurde alle Poren gleichermaßen berücksichtigt). Nach Durchsicht der CT-Daten wurde zudem festgestellt, dass es sich immer um Einzelporen handelt. Porennester und Schlauchporen wurden nicht detektiert. Auch optisch wurden keine anderen Unregelmäßigkeiten gefunden. Die Naht hatte eine saubere Oberfläche, wie auch eine gleichmäßig durchgeschweißte Wurzel.



**Abbildung 2.20:** Porenverteilung und Porengröße über Nahtdicke

## 2.4 Forschungsfragen / „Knowledge gap“

In den vorangegangenen Kapiteln wurden einige Aspekte zu dem Thema „Poren in Aluminiumschweißnähten“ beleuchtet. Es zeigte sich, dass dieses Problem bekannt ist und es einige Untersuchungen zu diesem Thema gibt. Jedoch deckt die bestehende Literatur nur teilweise bzw. nicht alle Aspekte der Aufgabenstellung ab. Somit lassen sich drei wichtige Fragen definieren, welche Kern dieser Arbeit sind:

- 1) Welchen Einfluss hat die Strahlfigur auf die Porosität der Schweißnaht?

Die erwähnte Literatur bietet zwar Ansätze für die Beantwortung dieser Fragestellung, jedoch entspricht es nicht dem bestehenden Aufgabenstellung. Es wurden andere Verfahren und auch „einfachere“ Strahlfiguren bzw. Oszillationsmuster verwendet [13][14][12]. Zudem wurden andere Blechstärken oder Materialpaarungen untersucht [15]. Auch wurden die unterschiedlichsten Schweißparameter in den bestehenden Untersuchungen verwendet.

### 2) Wie wirkt sich eine Mehrbadtechnik auf die Porosität der Schweißnaht aus?

Wie bekannt ist, sind Mehrbadtechniken etablierte Werkzeuge in der Schweißtechnik. Gerne werden sie zum Minimieren von Verzug und Spannungen eingesetzt [19], jedoch findet sich keine Untersuchung von Porosität. Anders beim Vor-Nachwärmen von Schweißnähten, Hier wird sogar ausdrücklich auf die Porosität eingegangen. Doch unterscheiden sich diese Untersuchungen in Material und Schweißnahtdicke von bestehender Aufgabenstellung [8][20].

### 3) Was sind im konkretem Fall die treibenden Mechanismen zur Porenbildung?

Es wurde bereits festgestellt, dass Poren durch mehrere Effekte entstehen können. Sei es durch bestehendes Aluminiumoxid [26] oder durch das Ausgasen von Legierungsbestandteilen [28]. Diese Effekte wurden jedoch separat von einander betrachtet, was für die Aufgabenstellung unzureichend ist. Ebenfalls sind die Auswirkungen der Schmelzbadströmung von Bedeutung [25] und um welche Art der Schweißung es sich handelt (Keyhole oder Wärmeleitungsschweißen).

# 3 Ansatz zur Porenvermeidung

Es lassen sich nun verschiedene Ansätze zur Vermeidung von Poren wählen. Grundlegend kann das Problem der Porenbildung von zwei Seiten betrachtet werden:

- Material
- Prozess

Es wurde bereits gezeigt, dass Aluminium beim Schweißen zu Porenbildung neigt. Es wäre möglich, eine andere Legierung oder sogar ein anderes Metall in Erwägung zu ziehen. Da sich diese Arbeit aber auf besagte Liner der *Peak Technology GmbH* bezieht sind Überlegungen einer Materialänderung nicht weiter zu betrachten. Ähnlich verhält es sich mit der Wahl des Prozesses, es wäre durchaus denkbar, einen anderen Prozess zu untersuchen. Dies steht in dieser Arbeit aber auch nicht zur Debatte, da sich die Vorarbeit und Unterstützung der *Peak Technology GmbH* auf den EBW-Prozess bezieht, jedoch seien diese Möglichkeiten der Vollständigkeit halber erwähnt. Materialeitig kann zwar nichts am Grundwerkstoff geändert werden, jedoch kann die Oxidation an der Fugestelle weitgehend vermindert werden (jedoch nicht vollständig). Dies wird durch spanende Bearbeitung und anschließend luftdichtes Verschweißen erreicht (siehe Kap 2.1.2). Zudem wird durch schnelles Rüsten der Proben in der Arbeitskammer der EBW-Anlage eine weitere Oxidation möglichst gering gehalten. Betrachtet man nun die Prozessseite, kann diese in drei weitere Ebenen aufgeteilt werden:

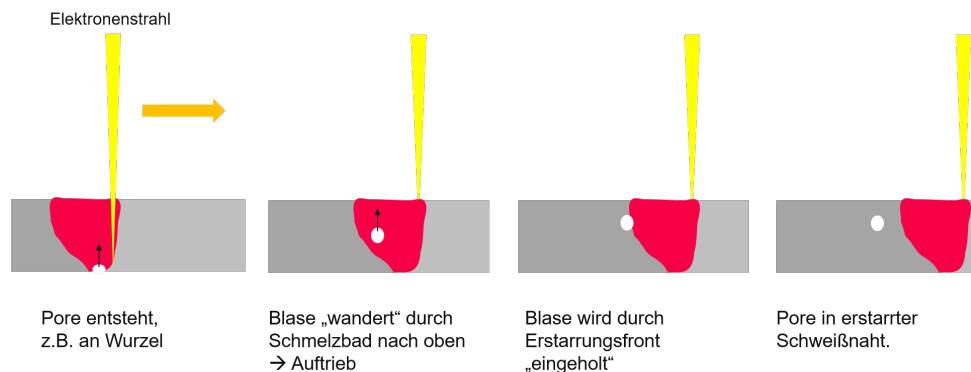
- Schweißparameter: Strahlstrom, Spannung, Schweißgeschwindigkeit, Fokuslage
- Schweißfigur: Aussehen, Größe, Frequenz
- Anzahl der Schweißbäder: Abstand zueinander, Energieverteilung

Die Einflüsse der einzelnen Punkte auf die Porosität ist noch wenig bekannt und Fragestellung dieser Arbeit. Jedoch lässt sich sagen, dass die einzelnen Punkte in Wechselwirkung zueinander stehen. Um die Auswirkungen zu untersuchen, muss nun ein geeignetes Versuchssetup gewählt werden, da die Kombination der einzelnen Punkte ein enormes Feld an Untersuchungsmöglichkeiten bietet. Es wurde entschieden, sich auf die Strahlfigur zu konzentrieren, weshalb einige der genannten Parameter konstant gehalten werden können. So wurde die Fokuslage auf der Nahtoberseite festgelegt und eine Schweißgeschwindigkeit von  $20\text{ mm/s}$  gewählt. Dieser Wert wurde von vorgegangenen Versuchen der *Peak Technology GmbH* übernommen. Die andere Parameter und deren Wahl wird erst zu einem späteren Zeitpunkt betrachtet.



### 3.1 Porenvermeidung durch Schmelzbadführung

Da es materialeseitig schwer ist, Poren zu vermeiden, muss den sich gebildeten Blasen die Möglichkeit gegeben werden, aus der Schmelze auszugasen, bevor diese von der Erstarrungsfront in der Schweißnaht „eingefroren“ werden. Dieser Vorgang des „Einfrierens“ wird in nachstehender Abbildung 3.1 dargestellt.



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der Porenentstehung

Da die Schmelzbadströmungen äußerst komplex sind und sich aus mehreren Effekten wie zB. dem Marangonieffekt bilden, kann eine genaue Blasenbewegung in der Schmelze nicht vorhergesagt werden. Um ein Gefühl für den Blasenanstieg bzw. die Aufstiegs- geschwindigkeit zu bekommen, wurden mehrere Vereinfachungen getroffen, um diesen darzustellen:

- Man geht von einer „schleichenden Strömung“ aus  $Re \ll 1$  (*Reynolds-Zahl*)
- Die Schmelze wird als ruhendes Fluid betrachtet.
- Es wird eine einzelne Blase betrachtet, welche ihren Aufstieg an der Wurzel beginnt. Das kumulieren von Blasen, welches zu einem Anstieg des Durchmessers führen würde, wird aufgrund der geringen Wegstrecke nicht betrachtet.

Betrachtet man die Blase in ihrem Freischnitt, wirken drei Kräfte auf die Blase (siehe Abbildung 3.2). Zum einen die Auftriebskraft  $F_A$ , welche die treibende Kraft des Blasenanstieges ist, und zum anderen die Gewichtskraft  $F_G$  sowie die Strömungswiderstandskraft  $F_W$ , welche dem Auftrieb entgegen gerichtet sind (siehe Gleichung 3.1 - 3.3). Im Kräftegleichgewicht heißt das:

$$F_A = F_W + F_G$$

$$F_A = \frac{4}{3}R^3\pi * \rho_F * g \quad (3.1)$$

Die Auftriebskraft  $F_A$  setzt sich aus dem Blasenvolumen (mit dem Blasenradius  $R$ ), der Dichte des Fluides  $\rho_F$  und der Erdbeschleunigung  $g$  ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) zusammen.

$$F_W = 4\pi * \mu * u * R \quad (3.2)$$

Der Strömungswiderstand  $F_W$  ergibt sich aus der Viskosität des Fluides  $\mu$ , der Aufstiegs-  
geschwindigkeit  $u$  und dem Blasenradius  $R$ .

$$F_G = \frac{4}{3}R^3\pi * \rho_G * g \quad (3.3)$$

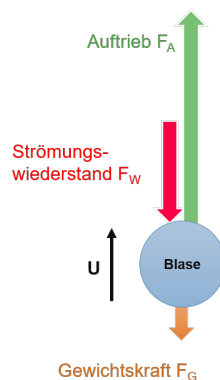
Die Gewichtskraft  $F_G$  der Blase ist zwar vernachlässigbar klein, wird aber der Vollständigkeit halber ebenfalls dargestellt. Sie setzt sich gleich wie der Auftrieb zusammen mit dem Unterschied, dass die Dichte des Gases  $\rho_G$  eingesetzt wird. Da diese aber vernachlässigbar klein ist, kann folgende Annahme getroffen werden:

$$\rho_F \gg \rho_G$$

Setzt man die drei Gleichungen in das Kräftegleichgewicht -unter der Annahme, dass die Dichte des Fluides viel größer als die Dichte des Gases ist- erhält man durch Umformen folgende Gleichung:

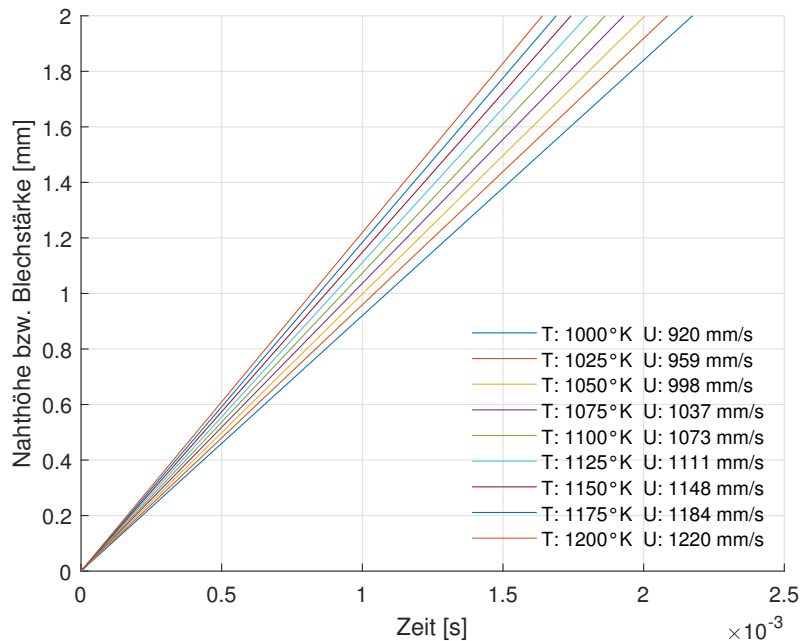
$$u = \frac{R^2 * \rho_F * g}{3 * \mu} \quad (3.4)$$

Nun erhält man Gleichung 3.4, welche den Blasenauftstieg beschreibt. Die Werte der Dichte sowie der Viskosität der Aluminiumschmelze sind Temperaturabhängig und wurden dem Artikel von Assael entnommen [29]. Die Werte, welche für die Rechnung herangezogen werden, liegen in einem Bereich von 1000 – 1200 °K. Da diese Berechnung nur eine Näherung ist, soll dies genügen.



**Abbildung 3.2:** Wirkende Kräfte an einer Blase in einer Flüssigkeit

Nimmt man nun Gleichung 3.4 und setzt die Werte der Dichte und Viskosität der Aluminiumschmelze für die verschiedenen Temperaturen ein, so erhält man folgendes Diagramm, in welchem zum einen der zurückgelegte Weg der Blase über die Zeit und zum anderen die Blasengeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen eingetragen ist. Als Blasendurchmesser wurde der maximal zulässige Porendurchmesser lt. Norm gewählt ( $0.25 * 1.5 \text{ mm}$ ).



**Abbildung 3.3:** Blasenaufstiegsgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen und zugehöriges Weg-Zeit-Diagramm

Geht man nun von der langsamsten Blasengeschwindigkeit ( $920 \text{ mm/s}$ ) bei  $1000 \text{ K}$  aus, erhält man bei einer Nahthöhe von  $1.8 \text{ mm}$  ca.  $0.002 \text{ sec}$  Aufstiegszeit (die Nahthöhe ist aufgrund der Stoßgeometrie dicker). Dies entspricht bei einer Schweißgeschwindigkeit von  $20 \text{ mm/s}$  einem Vortrieb von  $0.04 \text{ mm}$  des Schmelzbades. Bei anschließender Betrachtung der Reynolds-Zahl, wurde allerdings ersichtlich, dass die Bedingung der „schleichenden Strömung“ nicht erfüllt wurde ( $Re \ll 1$ ). Somit ist eine solche Betrachtung des Blasen-aufstieges unzulässig und die Ergebnisse der Aufstiegs geschwindigkeit gelten nicht. Auf Korrekturen des Modells wurde verzichtet, da die Strömung im Schmelzbad wesentlich komplexer sind. So würde die Blase nicht nur die Auftriebskraft erfahren, was eine genauere Untersuchung des Auftriebes hinfällig werden lässt.

Es sei hier noch erwähnt, dass die Möglichkeit bestehen würde, „sichere“ Poren (kleiner dem kritischen Durchmesser) zu erzeugen. Diese würden den Vorgaben der Norm entsprechen, ist jedoch nicht Ziel dieser Arbeit.

## 3.2 Manipulation der Energieeinbringung mittels Figur

Da in dieser Arbeit die Auswirkungen der Figur auf die Porosität untersucht werden soll, muss zuerst überlegt werden, was die Figur bewirkt. Eine Schweißfigur ist der Linienzug, welchen der Elektronenstrahl durchläuft. Wie in Kapitel 2.2.2 schon kurz angedeutet, besteht dieser Linienzug aus Punkten, welche als Maschineninkremente dienen. Diese Inkremente stellen in der Maschinensteuerung die Wegbahn, welche der Strahl abfährt, dar. Diese Inkremente können direkt an der Maschine noch skaliert werden. Nun kann -wie anhand des Bsp. in Kapitel 2.2.3 Abbildung 2.12 erwähnt (Seite 15)- die Energieeinbringung des Elektronenstrahles im Schmelzbad durch diese Punkte gesteuert bzw. beeinflusst werden. Als Parameter hierfür dienen:

- Lage der Punkte: wo findet der Energieeintrag statt
- Anzahl der Punkte: wie „fein“ wird die Figur aufgelöst
- Durchlauffrequenz  $f_F$ : wie lange ist die Strahlaufenthaltsdauer pro Punkt

Die Anzahl der Punkte hat wie die Durchlauffrequenz (weilers  $f_F$ ) ebenfalls Einfluss auf die Aufenthaltsdauer des Strahles. So wird z.B. bei doppelt so vielen Punkten bei gleicher Durchlauffrequenz die Aufenthaltsdauer halbiert. Da über den Einfluss der Energieeinbringungen mittels Figur wenig bekannt ist, wird nachfolgend die Energieverteilung (kurz EV) der geschweißten Fig24 (siehe Kapitel 2.2.2) und die EV der Vorversuche untersucht. Um eine Figur zu analysieren wird nun die Punkteverteilung bzw. die Punktedichte betrachtet. Denn jeder Punkt entspricht einem Energieeintrag  $E_P$ . Dieser lässt sich errechnen aus der Strahlleistung ( $P_S$ ) und der Verweildauer pro Punkt  $t_P$ .

$$P_{Strahl} = U_S * I_S \quad (3.5)$$

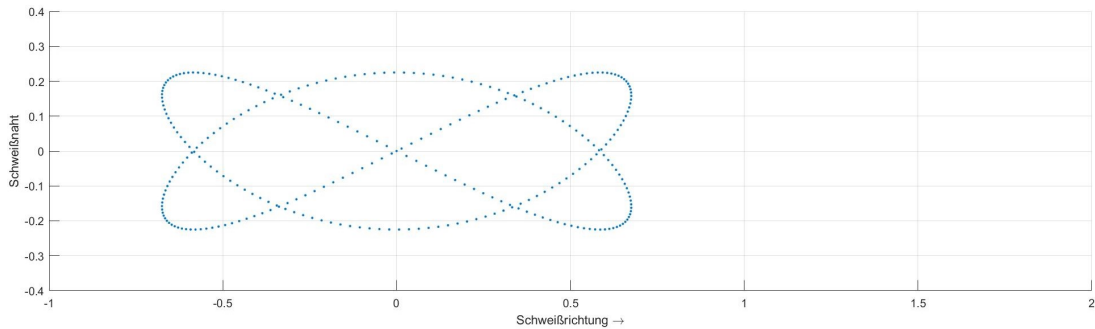
$$t_P = \frac{1 \text{ Punkt}}{f_F * \text{Anzahl Punkte}} \quad (3.6)$$

$$E_P = U_S * I_S * f_F * \text{Anzahl Punkte} \quad (3.7)$$

Da die Leistung pro Punkt beim Schweißen wenig Aussagekraft hat, wird diese nicht weiter betrachtet. Die nachfolgenden Analysen beziehen sich deshalb nur auf relative Energien, diese könnten aber anhand der Gleichung 3.7 einfach umgerechnet werden. In weiterer Betrachtung wird nun von Punkteverteilungen gesprochen, welche aber der relativen Energieverteilung gleich ist.

### 3.2.1 Analyse der Energieverteilung Fig24

Betrachten man nun die Fig24 in Abbildung 3.4, so sehen wir, dass diese aus 300 Einzelpunkten besteht. Würde der Elektronenstrahl diese Figur nun einmal pro Sekunde durchlaufen ( $f_F = 1 \text{ Hz}$ ), ohne dass diese bewegt wird (Schweißvorschub  $v = 0$ ), würde die Schweißbahn des Strahles jener in Abbildung 3.4 entsprechen.

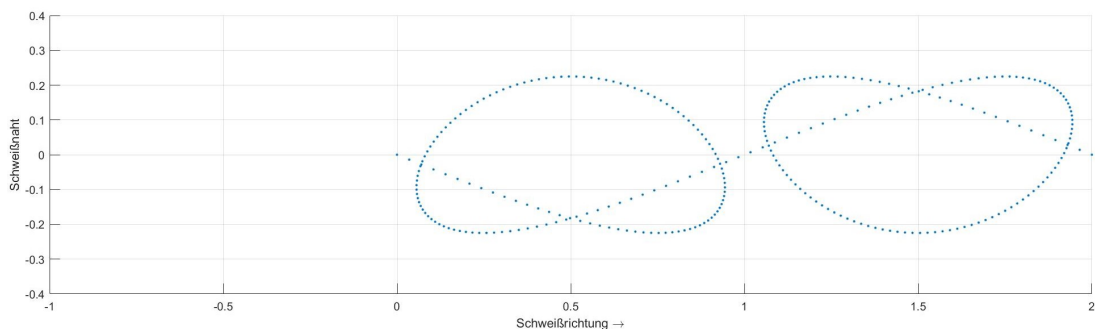


**Abbildung 3.4:** Fig24 ( $x = 1.35 \text{ mm}$   $y = 0.45 \text{ mm}$ ),  $f_F = 1 \text{ Hz}$ ,  $v = 0, \text{ mm/s}$

Um eine Schweißung zu erhalten muss die Strahlbewegung mit dem Schweißvorschub überlagert werden. Dies ist einfach eine Vektoraddition der beiden Bewegungen, wie in nachstehender Gleichung ersichtlich:

$$\vec{v}_{\text{Gesamt}} = \vec{v}_{\text{Figur}} + \vec{v}_{\text{Vorschub}} \quad (3.8)$$

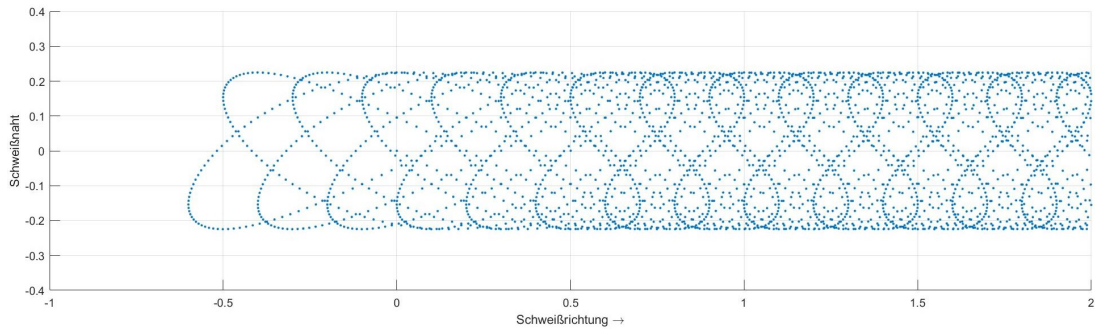
In Abbildung 3.5 wird die Figur wieder genau einmal ( $f_F = 1 \text{ Hz}$ ) durchlaufen, jedoch wird sie währenddessen mit  $v = 2 \text{ mm/s}$  entlang der Schweißbahn bewegt. Man erkennt, dass die Figur aus zwei gespiegelten aber symmetrischen Kurvenzügen besteht. Start- und Endpunkt beginnen bzw. enden bei der Mittellinie der Schweißnaht mit einem Versatz von  $2 \text{ mm}$ .



**Abbildung 3.5:** Fig24 ( $x = 1.35 \text{ mm}$   $y = 0.45 \text{ mm}$ ),  $f_F = 1 \text{ Hz}$ ,  $v = 2, \text{ mm/s}$

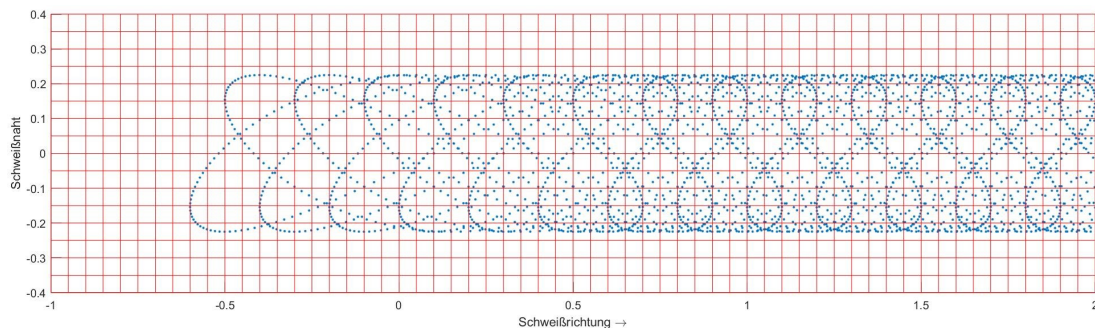
Erhöht man nun die  $f_F$  auf  $100 \text{ Hz}$  und  $v$  auf  $20 \text{ mm/s}$ , welches Werte von Vorversuchen der *Peak Technology GmbH* entspricht, erhält man eine Bahnkurve, die der Elektronen-

strahl beim Schweißen dieser Parameter durchlaufen würde (siehe Abbildung 3.6). Dies entspricht nun dem Beginn der Schweißnaht und wir sehen, dass der Linienzug bereits nach  $1\text{ mm}$  eine konstante Erscheinung aufweist, weswegen diese Analyse bei  $2\text{ mm}$  endet. Nun



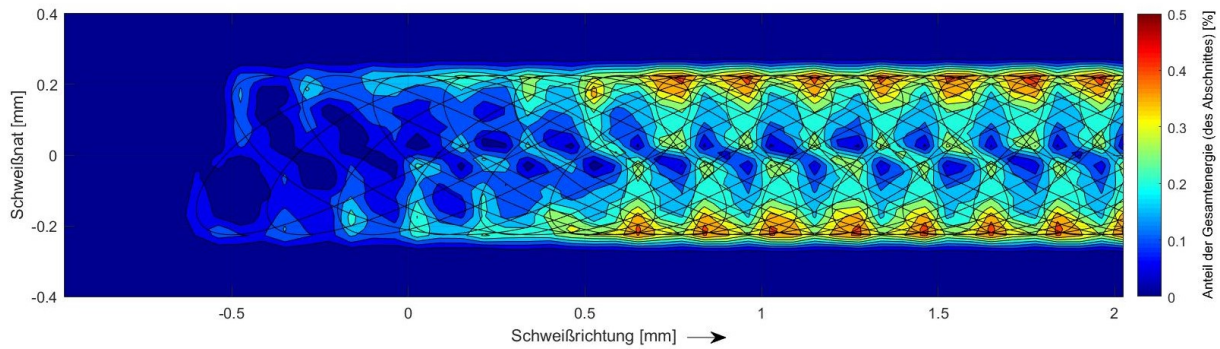
**Abbildung 3.6:** Fig24 ( $x = 1.35\text{ mm}$   $y = 0.45\text{ mm}$ ),  $f_F = 100\text{ Hz}$ ,  $v = 20, \text{ mm/s}$

können zwar deutlich Punktescharen erkannt werden, welche auch der Energieverteilung entsprechen, jedoch ist diese Darstellung noch zu abstrakt. Deshalb wurde über bestehende Schweißbahnkurve ein Raster ( $\Delta x = \Delta y = 0.05\text{ mm}$ ) gelegt (siehe Abbildung 3.7). Nun wurden in allen entstandenen Rasterquadraten die Punkte erfasst und gezählt. Dieser Wert geteilt durch die Gesamtpunktezahl aller Quadrate ergibt eine relative Punkteverteilung bzw. Energieverteilung. Um diese darstellen zu können, wurde jedem Quadrat ( $x, y$



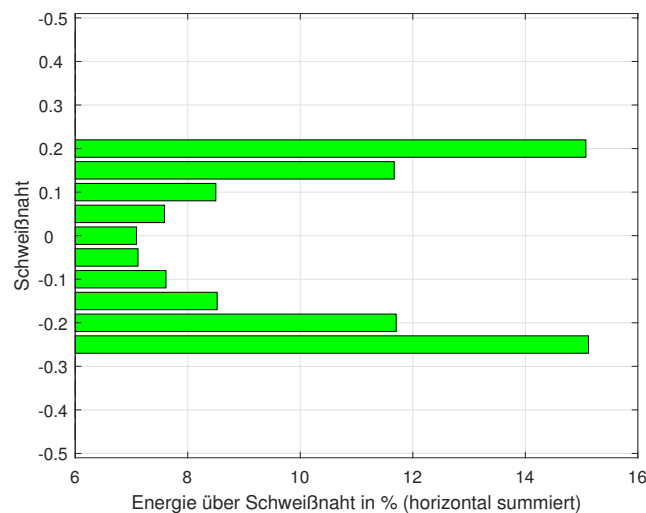
**Abbildung 3.7:** Raster über Schweißbahnkurve

Koordinate) ein  $z$ -Wert zugewiesen, welcher der Energie dieses Quadrates entspricht. Mit Hilfe eines 3D-Polynom Fit konnten diese  $z$ -Werte zu einem „Surfaceplot“ zusammengefasst werden. Blickt man nun aus der Vogelperspektive auf diese „Berg-Tallandschaft“, ergibt sich ein Relief wie in Abbildung 3.8 ersichtlich. Zu dieser Abbildung muss noch gesagt werden, dass die Punktezah der Grundfigur auf 1000 Punkte erhöht wurde. Diese 1000 Punkte stellen die Standardfigurengröße der EBW dar, da die Maschine die Figur mit einer Abtastrate von 1000 Punkten arbeitet. Der vorher beschriebene Linienzug bleibt der gleiche ( $f_F = 100\text{ Hz}$ ,  $v = 20, \text{ mm/s}$ ), nur wurde die Auflösung der Figur erhöht. Dies führt zu einer genaueren Auswertung der EV, da nun die Verteilung der Punkte genauer erfasst wird. Zur optischen Unterstützung wurde die Schweißbahnkurve über den Plot



**Abbildung 3.8:** relative Energieverteilung über Fig24

gelegt (diesesmal als Linie, nicht als Punkte) -diese hat aber keinen Einfluss auf die zuvor beschriebene Energieauswertung. Betrachtet man nun die Energieverteilung, wird deutlich, dass an den Rändern die meiste Energie (rot) in das Schmelzbad eingebracht wird. In der Mitte erkennt man nur kleinere „Hotspots“. Der umliegende Bereich (blau) enthält keine Punkte (eingebrachte Energie = 0). Gut zu sehen ist, dass die Schweißbahnkurve das Muster der Energieverteilung deutlich wiedergibt. Ebenfalls erkennt man, dass die Energieverteilung ab ca. 1 mm konstant ist, was auch der Logik des Schweißens entspricht. Deshalb wurde in einer weiteren Betrachtung die Energieverteilung quer zur Schweißnaht analysiert, sprich es wurden die Punkte im Raster horizontal aufsummiert und wieder relativ zueinander betrachtet (siehe Abbildung 3.9).

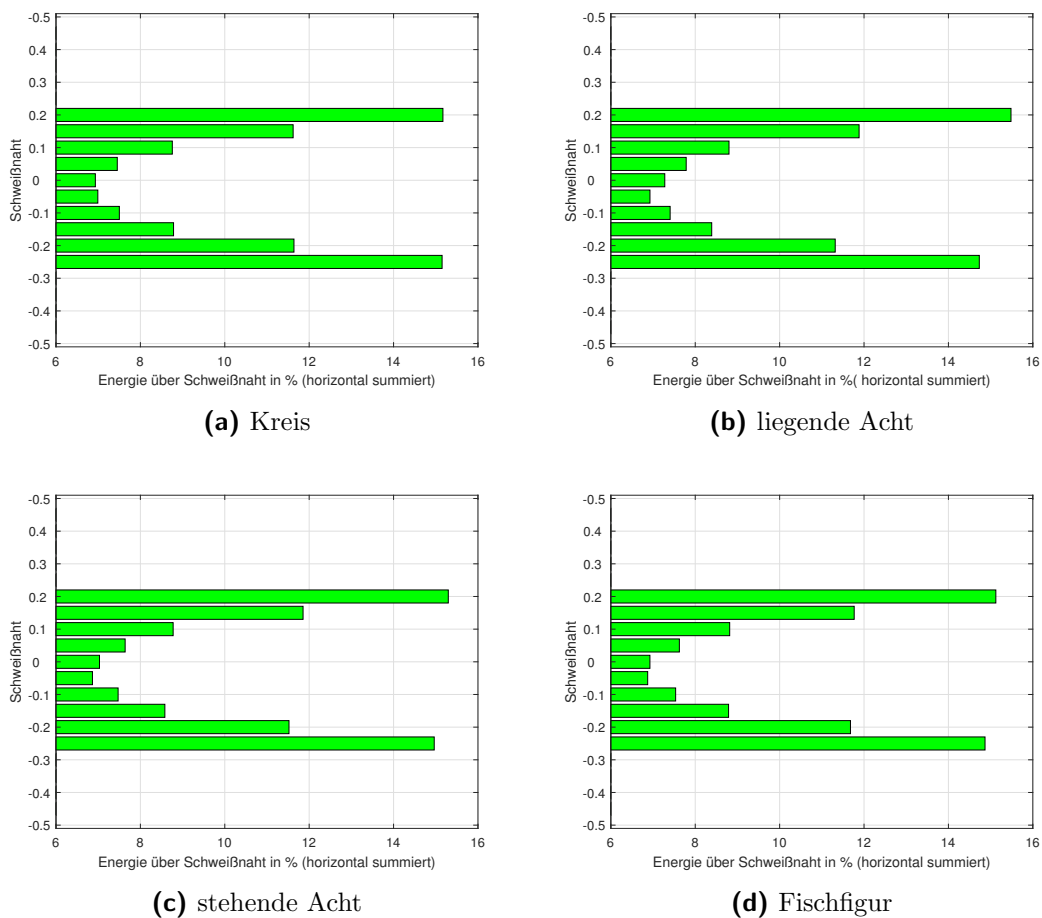


**Abbildung 3.9:** relative Energieverteilung quer zu Naht, Fig24

Betrachtet man nun die Energieverteilung quer zur Naht, so wird deutlich, was in 3.8 schon ersichtlich war. Die meiste Energie, nämlich ca. 15% der Gesamtenergie wird dem Schmelzbad an den Rändern zugeführt. Zur Schweißnahtmitte hin nimmt die Energie stark ab. Die Energieverteilung ist so gut wie symmetrisch zur Schweißnahtmitte.

### 3.2.2 Analyse der Energieverteilung der Vorversuche

In diesem Abschnitt werden die Figuren, welche in den Vorversuchen geschweißt wurden (Kapitel 2.2.4), bezüglich ihrer Energieverteilung analysiert. Die Figuren (siehe Abbildung 2.15) werden wieder als Linienzug mittels Punkten dargestellt und analysiert. Es wird hier auf eine Darstellung der Punktebahnen verzichtet und nur auf die Energieverteilungen über und quer zur Schweißnaht eingegangen. Um die Figuren der Vorversuche mit der Fig24 vergleichen zu können, wurden die gleichen Parameter zur Erstellung der Schweißbahn verwendet ( $x = 1.35 \text{ mm}$   $y = 0.45 \text{ mm}$ , 1000 Punkte pro Figur,  $v = 20 \text{ mm/s}$ ,  $f_F = 100 \text{ Hz}$ ).

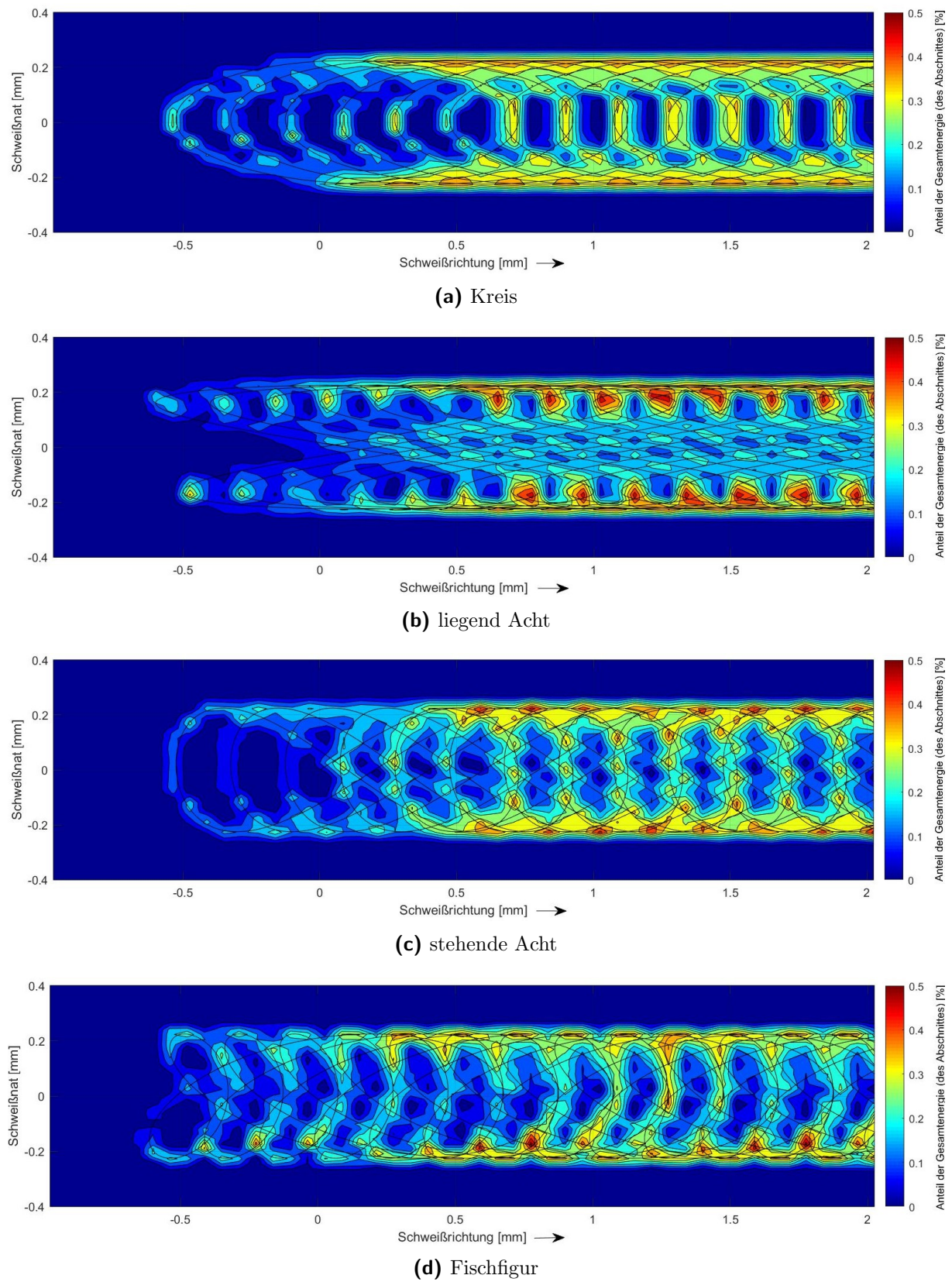


**Abbildung 3.10:** Vergleich der Energieverteilung der Vorversuche, quer zur Naht

Es fällt sofort auf, dass sich die Energieverteilungen quer zur Naht kaum voneinander unterscheiden, weder in der Verteilung noch in der maximalen Energie am Rand. Dies liegt daran, dass die Figuren in ihrer Beschreibung auf Schwingungen aufbauen. Anders ist es bei der Energieverteilung der Schweißnahtbahn (Abbildung 3.11).



### 3 Ansatz zur Porenvermeidung



**Abbildung 3.11:** Vergleich der Energieverteilung der Vorversuche

Nachfolgende Punkte fassen die Erkenntnisse, aus zuvor gezeigten Analysen der Energieverteilungen, zusammen.

**Vergleichbarkeit:** Es ist zulässig, die Energieverteilung der Figuren untereinander zu vergleichen, da jede Schweißbahnkurve aus  $10^5$  Punkten besteht -so gelten die Farbskalierungen der Einzelnen Auswertungen auch für die jeweils anderen.

**Frequenz:** Es wurde die Energieverteilung auch mit anderen Werten für  $f_F$  durchgeführt ( $v = 20\text{ mm/s}$  wurde zuvor festgelegt). Es änderte sich jedoch nichts an der Gesamtbetrachtung, außer es wurden untere Grenzen unterschritten, sodass die Figur nicht mehr ordentlich durchlaufen wird sondern wie in Abbildung 3.5 zu verzerrt wird. Eine zu hohe Frequenz hat keinen Vorteil, da die Figur nur schneller durchlaufen wird und so die Schweißnahtbahn zunehmend glatter wird, sprich:  $\Delta x$  zwischen zwei Figuren-Durchläufen wird kleiner. Dadurch wird  $t_P$  zwar kürzer, aber es entstehen mehr Punkte, was sich energetisch wieder ausgleicht.

**Energieverteilung:** Wie schon mit Abbildung 3.10 gezeigt, befindet sich bei allen Figuren die meiste Energie am Rand. Dies geht auch aus Abbildung 3.11 hervor, jedoch mit dem Unterschied, dass sich die „Hotspots“ anders verteilen. Dies hat mit den unterschiedlichen Kreuzungspunkten der Figuren zu tun. Es kann gezeigt werden, dass die Form der Figur sehr wohl Auswirkung auf die Energieeinbringung hat, dass es aber quer zur Naht betrachtet bei zyklischen Schwingungen keine großen Unterschiede gibt.

Diese Erkenntnisse bieten eine gute Grundlage für die Erstellung weiterer Figuren. Zudem können mit diesem Werkzeug Figuren und Parameter (in logischen Grenzen) untereinander verglichen werden.

# 4 Methoden

Nun wird auf die angewandten Methoden dieser Arbeit eingegangen. Dies soll eine Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit gewährleisten. Es wird ein Überblick über verwendete Arbeits-, Mess- und Hilfsmittel sowie Softwaretools gegeben.

## 4.1 Elektronenstrahlschweißen (EBW)

Das wichtigste Werkzeug dieser Arbeit, stellt die Elektronenstrahlschweißanlage des IMAT-Institut dar. Die Anlage (EBG 45-150K14) ist eine sogenannte „Kammeranlage“, welche schweißen unter Vakuum erlaubt (siehe Abbildung 4.1). Hergestellt wurde die Anlage von der Firma *Pro-beam GmbH & Co. KGaA*. Hier werden einige der wichtigsten Maschinendaten angeführt:

- Hochspannung: bis zu  $150\text{ kV}$
- Strahlstrom:  $0,1 - 300\text{ mA}$
- Vakuum:  $10^{-4}\text{ mbar}$
- Vorschub: max.  $100\text{ mm/s}$

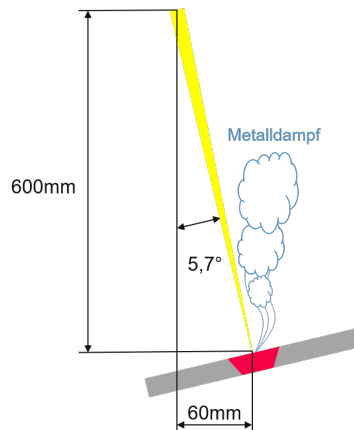
Die minimalste erreichte Hochspannung beträgt bei der montierten Kathode  $80\text{ kV}$ . Ein Kathodentausch wäre zu aufwendig bzw. benötigt die Mehrheit anderer Arbeiten, welche auf der EBW stattfinden, eine höhere Spannung. Dies wird aber durch niedrige Strahlströme ausgeglichen, um eine geringere Strahlleistung zu erzielen (siehe hierzu Gleichung 3.5).



**Abbildung 4.1:** Elektronenstrahlschweißanlage (EBG 45-150K14) des IMAT

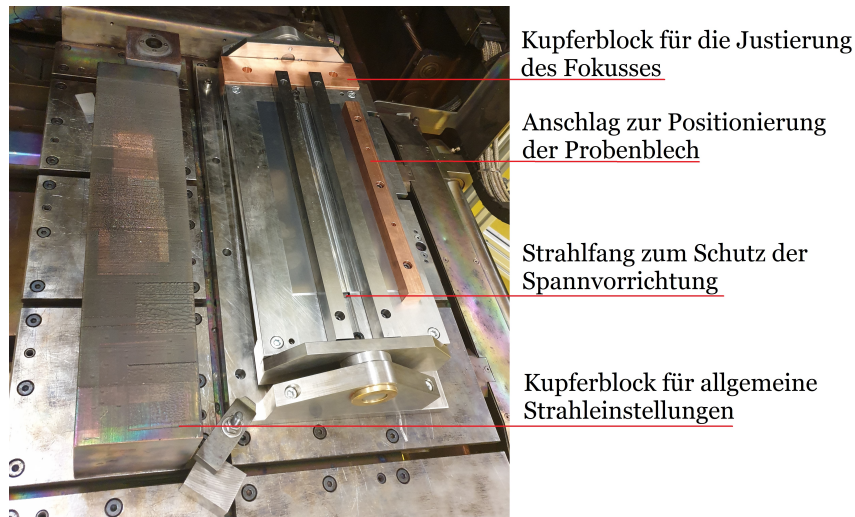
### 4.1.1 Spannvorrichtung

Gemeinsam mit *Peak Technology GmbH* wurde eine Spannvorrichtung konstruiert und gebaut. Natürlich ist das Spannen der Probenbleche die Hauptaufgabe einer solchen Vorrichtung, jedoch erfüllte sie einen weiteren konkreten Zweck, die Schrägstellung der Probe. Wie schon mehrfach erwähnt, verdampft das Metall in der Schmelze schlagartig und steigt auf. Da es sich bei Dampf um eine Phase handelt, welche aus Atomen besteht, kann diese den Elektronenstrahl deutlich beeinträchtigen (speziell bei so geringen Strahlleistungen, siehe Kapitel 2.2.1). Die Strahlsteuerung lässt es zu, den Elektronenstrahl zu „knicken“. Dadurch kann erzielt werden, dass der aufsteigende Metaldampf neben dem Strahl vorbeiziehen kann (siehe Abbildung 4.2). Um diesen Effekt möglichst gut zu nutzen, wurde mit einem Strahloffset von max. 60 mm und einem max. Arbeitsabstand von 600 mm (begrenzt durch die Maschine) gearbeitet. Durch diese Auslenkung ergibt sich ein Knickwinkel des Strahles von 5,7°.



**Abbildung 4.2:** Schematische Darstellung der Strahlknickung

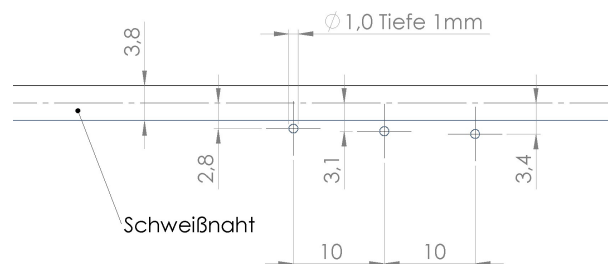
Damit die geschweißte Figur auch ihre tatsächliche Form behält, muss das Werkstück senkrecht zum Strahl stehen, sprich um diese 5,7° geneigt werden. Dies wurde in der Konstruktion der Spannvorrichtung berücksichtigt. Ebenso berücksichtigt wurde, dass die Drehachse genau der Schweißnahtachse entsprechen muss. Zudem wurde noch ein Anschlag montiert, welcher die genaue Position der Probenbleche und somit auch die des Schweißnahtstoßes gewährleistet. Der Schweißstoß liegt frei über einer Nut, in welcher ein Strahlfang eingelegt werden kann, welcher die Spannvorrichtung schützt. Am Ende der Spannvorrichtung wurde ein kleiner Kupferblock eingearbeitet, welcher auf gleicher Höhe mit der Nahtoberfläche liegt, dies erleichtert das Einstellen der Fokusslage (siehe Abbildung 4.3). Um eine Magnetisierung der Spannvorrichtung auszuschließen, wurde diese aus austenitischem Stahl gefertigt. Somit besteht auch keine Gefahr der Strahlbeeinflussung durch Magnetfelder.



**Abbildung 4.3:** Bild der Spannvorrichtung montiert auf den Maschinentisch

## 4.2 Temperaturmessung

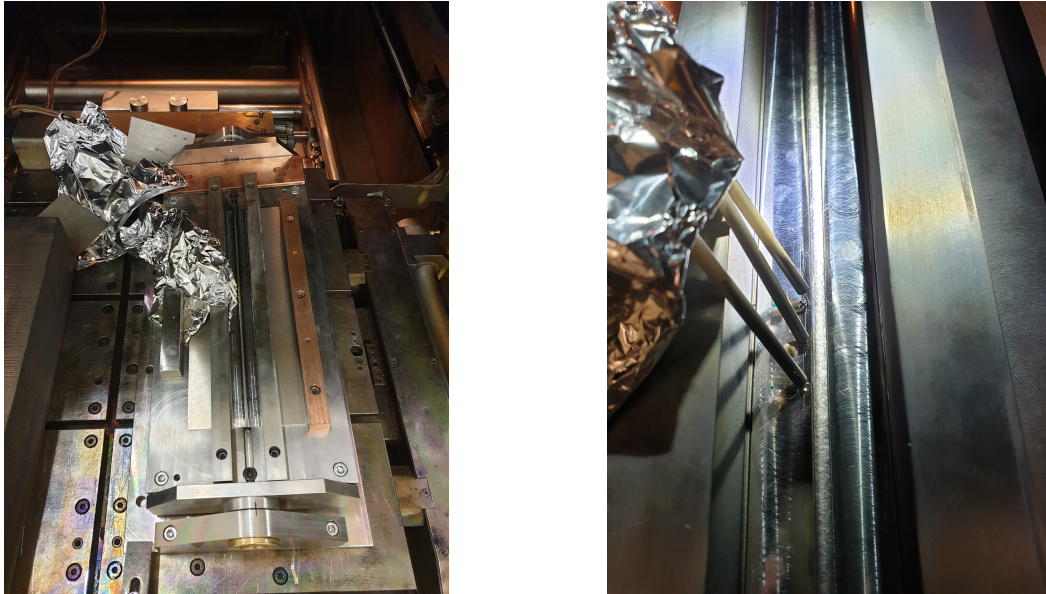
Um ein Gefühl für den Wärmefluss ausgehend von der Schweißnaht zu bekommen, wurde eine Temperaturmessung an der EBW durchgeführt. Dies gibt Aufschluss über Zwischenlagentemperaturen (zwischen Heftern und Schweißen) und kann zum Evaluieren der Simulation verwendet werden. Die EBW-Anlage bietet die Möglichkeit zur simultanen Messung der Temperatur an drei Messstellen mittels Thermoelementen sowie mittels eines Pyrometer. In dieser Arbeit wurde ein Versuchsaufbau für die Messung mittels Thermoelemente durchgeführt. Abbildung 4.4 (a) zeigt die Positionierung der Thermoelemente zur Schweißnahtmitte. Die Abstände wurden anhand einer bestehenden Schweißung so nah wie möglich an dieser gewählt. Verwendet wurden Thermoelemente des Typ-K. Diese besitzen an ihrer Spitze eine Kalotte mit einem Durchmesser von ca.  $0.5\text{ mm}$ , welcher als Messstelle dient. Die Kalotten wurden in den Bohrungen versenkt und anschließend durch Verkörnung des Loches gesichert. Das Erste Thermoelement wurde in einem Abstand von  $130\text{ mm}$  zum Nahtbeginn positioniert, somit wird auch der Einzelheftung in der Mitte detektiert.



**Abbildung 4.4:** Position der Thermoelemente



Durch diese Art der Positionierung ist natürlich eine exakte Bestimmung des Messpunktes unmöglich. So wurde davon ausgegangen, dass die Kalotte durch das Verkönnen (in Richtung der Schweißnaht) an der nächstgelegenen Stelle des Bohrloches angedrückt wird. In nachfolgender Abbildung 4.5 sieht man den Versuchsaufbau nach der Schweißung, wobei keines der Thermoelemente verloren ging. Zum Schutz der Drähte wurden Keramikhülsen, welche in Textilummantelungen übergehen, verwendet. Um das Messsignal nicht durch gestreute Elektronen zu verfälschen, wurde der Aufbau mittels Aluminiumfolie umhüllt.



**Abbildung 4.5:** Aufbau der Temperaturmessung nach Schweißung

### 4.3 Visuelle Begutachtung

Die Visuelle Betrachtung ist ein wichtiger Aspekt einer jeden Untersuchung, die jedoch als selbstverständlich angesehen wird. In dieser Arbeit wurde jeder geschweißte Parametersatz, sei es nur ein Test/Studie oder eine finale Schweißnaht, visuell begutachtet. Dies erfolgte direkt nach der Probenentnahme aus der Schweißkammer, wo die Probe unter ausreichend Licht mit freiem Auge begutachtet wurde. Anhand dieser ersten Beurteilung wurden oft mehrere Entscheidungen getroffen, z.B. ob ein Parameter geändert werden muss oder ob eine weitere Begutachtung mittels Hilfsmittel von Nöten ist. Solche Hilfsmittel waren unter anderem ein Lichtmikroskop (Zeiss Axio Observer Inverted) bzw. Stereomikroskop (Discovery V20) der Firma *Zeiss*. Makroskopische Aufnahmen wurden mittels einer *Nikon* (D90) Spiegelreflexkamera angefertigt.

## 4.4 Metallographie

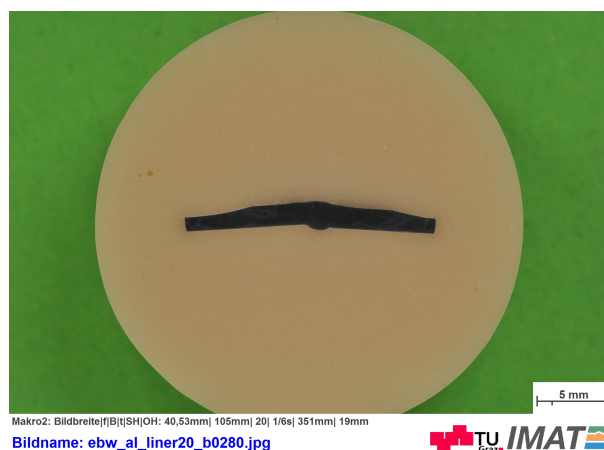
Die metallographische Untersuchung ist ein bewährtes Hilfsmittel zur Untersuchung von Schweißnähten, womit sich Gefüge sowie die WEZ (Wärmeeinflusszone) untersuchen und analysieren lassen. So wurden auch in dieser Arbeit Schlitze hergestellt, welche anschließend untersucht und ausgewertet wurden. Zur Herstellung eines solchen Schliffes wurden Proben mittels Kaltschnittverfahren (Band-, Kappsäge oder Trennschneidgerät mit Kühlstrahl) aus den Schweißnähten entnommen und mittels Kalteinbettverfahren eingefasst. Anschließend wurden diese maschinell oder von Hand geschliffen und bis auf  $1\mu\text{m}$  poliert (siehe Abbildung 4.6). Je nach nachfolgender Untersuchungen wurden die Proben noch mittels Ätzverfahren nach *Barker* elektrochemisch geätzt (siehe Tabelle 4.1).

**Tabelle 4.1:** Werte der verwendeten Barker-Ätzung

Ätzmittel	Spannung	Volumsstrom	Zeit
Barker	25.0 V	15 l/min	120 sec

Mittels polarisiertem Licht, welches unter einem Winkel von  $3.5^\circ$  auf die Probenoberfläche trifft, lassen sich die Orientierungen der einzelnen Körner deutlich darstellen (RGB-Aufnahmen). Um eine deutliche Abgrenzung zwischen Grundwerkstoff und Schweißnaht sichtbar zu machen, wurde kein polarisiertes Licht verwendet (SW-Aufnahmen). Zur Herstellung der Schlitze wurden folgende Verbrauchsmittel der Firma *Struders* verwendet:

- Kalteinbettmittel: LevoCit Kit
- SIC-Folien der Körnung: 120, 320, 500, 800, 1200, 2000, 4000
- Poliertücher:  $3\mu\text{m}$  MD-Mol,  $1\mu\text{m}$  MD-Nat (mit zugehöriger Emulsion)



**Abbildung 4.6:** Bild eines Querschliffes (ungeätzt)

## 4.5 Röntgten Untersuchung (X-Ray)

Da der Kern dieser Arbeit die Auswirkungen der Strahlfigur auf die Porosität ist, musste ein Verfahren gewählt werden, welches sich eignet, Poren in einer Schweißnaht zu detektieren. Wie in Kapitel 2.3.3 erwähnt, wurden die ersten zerstörungsfreien Untersuchungen der *Peak Technology GmbH* mittels CT durchgeführt. Da diese Untersuchungen aber sehr kostspielig sind, wurde überlegt, ein anderes Verfahren zur Poren-Detektierung heranzuziehen. So wurde entschieden, dass Röntgten-Durchstrahlverfahren, auch X-Ray genannt, zur Porenfindung zu verwenden. Da zu anfangs noch nicht klar war, ob das Verfahren die nötige Auflösung bietet, um feinste Poren abzubilden, wurden die Vorversuche als Evaluierungsobjekt getestet. Es zeigte sich, dass auch feinste Poren detektiert werden können. Der Nachteil dieses Verfahren ist, dass die Poren nur projiziert dargestellt, anders als beim CT, bei dem die Poren im 3D-Raum dargestellt werden. Da die Lage der Poren in der Schweißnaht aber nur zweitrangig ist, wurde das Röntgtenverfahren für ausreichend und zweckdienlich befunden. Die Proben wurden im Auftrag der *Peak Technology GmbH* zur Röntgenprüfung vergeben, wobei folgende Prüfparameter zum Einsatz kamen:

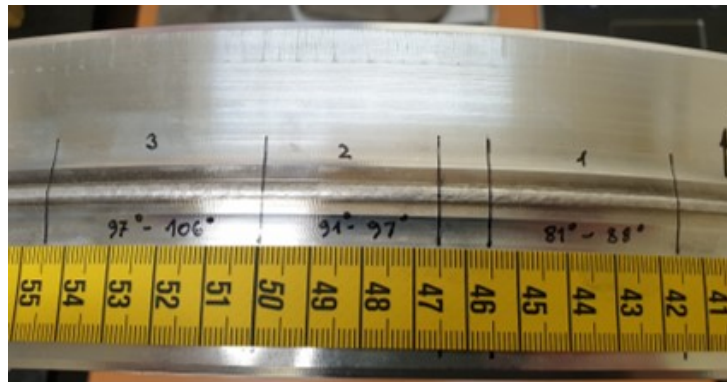
- 1) System: Yxlon Cheetah
  - Röhre:  $\mu$  Fokus
  - Spannung: 120 kV
  - Strom: 90 mA
- 2) Bildanalysesoftware: Yxlon Fgui
  - Integration: 100 Bilder
  - Zoom: 14 fach vergrößert

## 4.6 REM/EPMA

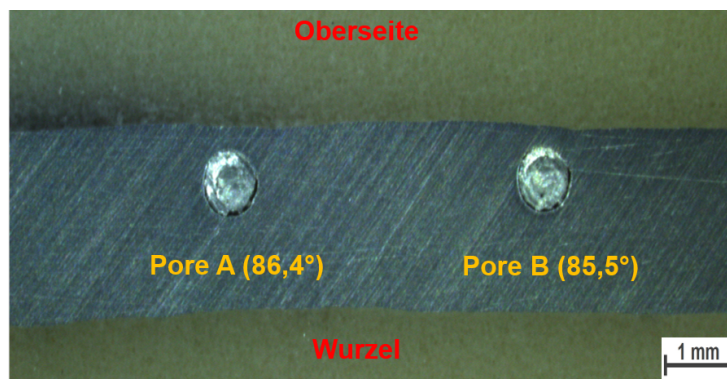
Um genauere Informationen über die Poren zu erhalten, kamen zwei zusätzliche Analyseverfahren zum Einsatz. Zum einen eine REM-Analyse (Raster Elektronen Mikroskop, *Zeiss Leo*, Tungsten Filament) und zum anderen eine EPMA-Analyse (Electron Probe Microanalyser, JEOL JXA8530F Plus Hyper Probe). Erstere wurde am IMAT durchgeführt, die EPMA-Analyse an der KFU (Bereich NAWI Graz Earth, Space and Environmental Science). Bei den REM Untersuchungen wurde auf die Struktur der Porenoberfläche eingegangen und EDX (Energiedispersive Röntgenspektroskopie) Untersuchungen getätigt.



Hierfür wurden aus dem von der *Peak Technology GmbH* zu Verfügung gestellten Ring04 Proben entnommen und mittels metallographischer Probenpräparation vorbereitet. Da die CT-Daten des Ringes zur Verfügung standen, konnten besonders markante Poren anhand ihres Winkels (siehe Abbildung 2.18) am Ring lokalisiert werden ( $0^\circ$  sind am Ring04 eingezeichnet). Da die Poren im Vergleich zur Ringgeometrie sehr klein sind, wurde ein Fehler der Position angenommen, weshalb größere Probenbereiche aus dem Ring geschnitten und dann längs zur Schweißnaht (händisch) geschliffen wurden (siehe Abbildung 4.7).



(a) Sektoren mit lokalisierte Poren



(b) Längsschliff eines Sektors mit Poren

**Abbildung 4.7:** Probenpräparation mit lokalisierten Poren

Gleiche Probenvorbereitungen wurden auch für die EPMA-Analysen getätigt, jedoch mit ein paar Unterschieden. Da die Mikrosonde, mit welcher die Analyse durchgeführt wurde, an einem externen Ort steht, wurden die Proben direkt nach dem Polieren in einem Exsikkator unter Vakuum zur Anlage gebracht. Somit sollte eine zu starke Oxidation vermieden werden. Bei der Anlage wurden die Proben mit einer ca.  $300\text{ nm}$  Kohlenstoffschicht bedampft. Die EPMA Methode stellt ein breites Spektrum an möglichen Analysen dar. So lassen sich mit ihr z.B. BSE-Bilder (Backscatter electron) sowie SE-Bilder (Secondary electron) erstellen. Was für diese Arbeit von besonderem Interesse ist, sind die fünf WDS-Dedektoren (Wavelength dispersive spectrometer), welche zur Detektierung element-spezifischer Röntgenstrahlung dienen. Diese Strahlung entsteht bei Beschuss der Probe

mittels Elektronenstrahl, womit Röntgenstrahlung emittiert wird, welche charakteristisch für das jeweilige Element ist. Diese Strahlung lässt sich detektieren und somit können Elemente (über Standards) in der Probe exakt quantifiziert werden. Es lassen sich Punkt- sowie Linienmessungen oder auch Mappings von Bereichen erstellen. Wichtige Parameter (siehe Tabelle 4.2) sind hierbei die Stromstärke des auftreffenden Elektronenstrahles, welche auch die Eindringtiefe in das Material bestimmt, sowie die “spot size“ welche den Bereich der emittierten Elektronen festlegt. Zudem ist auch die “count time“ ein wichtiger Faktor, welche den Zeitraum vorgibt, in welchem der Detektor die Röntgenstrahlung erfasst. Die Anlage wird zudem zuerst auf das zu prüfende Material justiert, um eine genauere Detektierung zu erhalten, wozu ein Materialzeugnis des Ring04 verwendet wurde.

**Tabelle 4.2:** Parameter der EPMA-Analyse

Art der Messung	Spannung [kV]	Strom [mA]	count time	spot size [ $\mu m$ ]
Mapping	15	50	15 msec.	0.01
Grid	15	20	20 sec. Peak 2 x 10 sec. Bg.	40

## 4.7 Härteprüfung

Die Untersuchung der Härte spielt eine untergeordnete Rolle, da mechanische Kennwerte nicht von Interesse dieser Arbeit sind. Es wurde aber zum Abrunden der Untersuchungen des Ring04 beschlossen, eine Linienmessung quer über die Schweißnaht zu legen. Dies liefert schweißtechnisch Auskunft über die WEZ sowie den Härteabfall in der Schweißnaht. Die Härteprüfung wurde mittels einer Mikro-Kleinkraft Härteprüfmaschine (M1C) der Firma *EMCO* durchgeführt. Hierzu wurde über einen Querschliff der Schweißnaht eine „Härtelinie“ bestehend aus 40 Messpunkten (mit einem Abstand zueinander von 0,18 mm) über die Schweißnaht gelegt und mittels HV 0.1 gemessen. Das Verfahren der Härtemessung HV 0.1 entspricht:

- Prüfkraft: 0,9807 N
- Prüfdauer: 15 sec.

Es sei hier angemerkt, dass das Messen mittels HV 0.1 aufgrund von Verformungen der Abdruckkanten, welche für die Messung der Diagonalen benötigt werden, erschwert möglich ist. Somit war ein automatisiertes Messen nur bedingt möglich und alle Werte mussten händisch überprüft werden.

# 5 Versuche

Da die Methoden erläutert wurden, behandelt dieses Kapitel die Versuche, welche zur Untersuchung der Forschungsfragen entwickelt wurden. Hierzu werden zuerst die verwendeten Figuren und deren Erstellung gezeigt. Des Weiteren wird auf den Versuchs -Aufbau, -Ablauf und die verwendeten Parameter eingegangen.

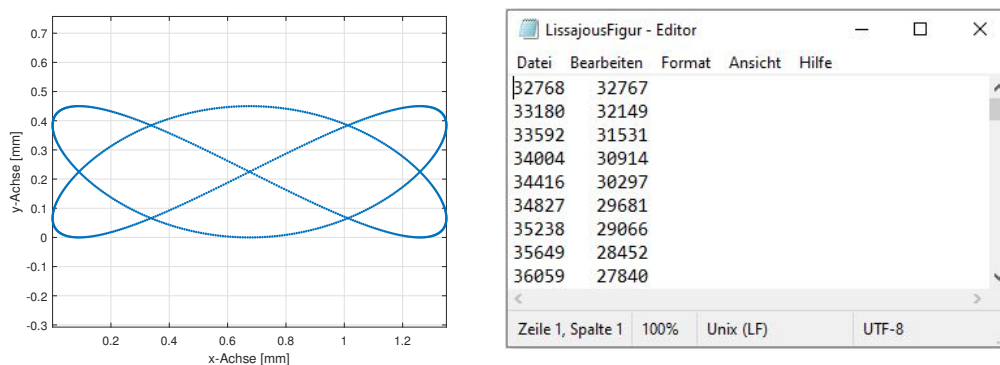
## 5.1 Schweißfiguren

Auf Basis der bisher betrachteten Vorversuche und Analysen werden nun Figuren entwickelt, welche als Grundlage der Schweißversuche dienen. Hier impliziert der Begriff Figuren auch die Mehrbadtechnik, da diese auch als Figur dargestellt werden kann. Dies wurde angewandt, da die Steuerung der EBW-Anlage nicht für komplexere Mehrbadtechniken ausgelegt ist. Anschließend wird hier ein Bsp. für die Erstellung einer Maschinenlesbaren Figur gezeigt, welche mittels *Matlab* geschrieben wurde:

```
1 %% =====
2 %% LissajousFigur: Werte für Parameter aus Wikipedia
3 %% =====
4
5 %%PARAMETER DER FIGUR
6 n=1000; % Anzahl der Punkte aus welcher die Figur besteht
7 t=linspace(0,2*pi,n); % 2pi: einmaliges durchlaufen der Figur
8 Ax=1.35/2; % Streckung bzw. Skalierung in x
9 Ay=0.45/2; % Streckung bzw. Skalierung in y
10 omega_1=2; % Schwingfrequenz der ersten Schwingung
11 omega_2=3; % Schwingfrequenz der zweiten Schwingung
12 delta_phi=pi; % Phasenverschiebung zwischen den Schwingungen
13 phi_1=0; % Phasenverschiebung der ersten Schwingung
14 phi_2=phi_1-delta_phi; % Phasenverschiebung der zweiten Schwingung
15 off_x = Ax; % Offset in x
16 off_y = Ay; % Offset in y
17
18 %%GLEICHUNG WELCHE FIGUR BESCHREIBT
19 x=Ax*(sin(omega_1*t+phi_1))+off_x; % Gleichung welche x-Werte beschreibt
20 y=Ay*(sin(omega_2*t+phi_2))+off_y; % Gleichung welche y-Werte beschreibt
21
22 %%ERSTELLT ABBILDUNG DER FIGUR
23 figure % Erzeugt Abbildung
24 plot(x,y, '.'); % Plottet LissajousFigur y=f(x), als Punkte: '.'
25 axis equal % Stellt Achsen in realem Seitenverhältnis dar
26 grid on % erzeugt Gitternetz
27 xlabel('x-Achse [mm]') % Achsbeschriftung x
28 ylabel('y-Achse [mm]') % Achsbeschriftung y
29
30 %%ERZEUGUNG EINES .b01-FILE
31 dlmwrite('LissajousFigur.b01', [(x(:)/1.35).*65535, (y(:)/0.45).*65535], 'delimiter', '\t')
```

In diesem Code wurde die Fig24 (welche eine Lissajoufigur darstellt) programmiert und anschließend als Maschinenlesbares .b01-File exportiert:

1. Im Abschnitt „Parameter der Figur“ wurden alle Parameter für die Fig24 definiert, auch ein Offset, welcher es möglich macht die Figur im Koordinatensystem zu verschieben. Die Figur wird hier mit den Schweißabmessungen parametrisiert, die Abmessungen werden hierbei mit Hilfe der Skalierungsfaktoren erreicht ( $A_x$ ,  $A_y$ ).
2. Im zweiten Abschnitt wird die Figur durch ihre Gleichung beschrieben. Hier fließen die zuvor definierten Parameter und der Offset ein. Dieser schiebt die Figur weg von der Mittelpunktslage in den ersten Quadranten des Koordinatensystems.
3. Der Bereich Abbildung erstellt eine Grafik in welcher die Figur beim Kompilieren des Codes angezeigt wird. so kann optisch die Richtigkeit der Figur überprüft werden. Wie in Abbildung 5.1 befindet sich die Figur im ersten Quadranten und hat die richtigen Abmessungen für das Schweißen ( $x = 1.35 \text{ mm}$   $y = 0.45 \text{ mm}$ ).
4. Die letzte Codezeile ist nun der Schritt, welcher ein Maschinenlesbares .b01 File erstellt (`dlnwrite` erstellt File im Projektordner). Dieses File ist schlussendlich eine Textdatei, in welcher sich zwei Spaltenvektoren mit je 1000 Werten befinden. Die Vektoren werden durch einen Tabulator voneinander getrennt ('delimiter', 't'). Der erste Vektor entspricht den  $x$ -Werten der Figur, der zweite den  $y$ -Werten. Da aber die Maschine Werte in einer unskalierten Größe benötigt (wichtig für spätere Skalierung auf der Maschine), muss die Figur auf Einheitsgröße (0-1) gebracht werden. Dies geschieht durch die Division des Vektors durch seine Länge in verwendeter Skalierung in  $mm$ . Anschließend wird der Vektor mit dem Wert **65355** (Inkrement) punktweise multipliziert (jeder Datenpunkt des Vektors). Dadurch erhalten wir Wert welche der Maschinenskalingung entsprechen und in der Steuerung der EBW normal verwendet werden können, sprich wieder auf  $mm$  skaliert sind.



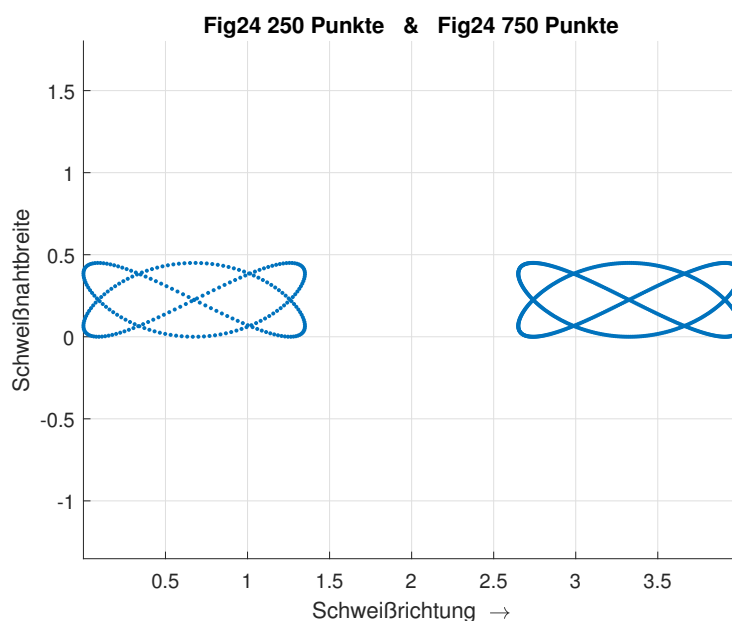
**Abbildung 5.1:** links: Lissajousche Figur (Fig24) für EBW, rechts Bsp. für b.01-File

### 5.1.1 Zweibadtechnik

Der Ansatz der Zweibadtechnik spiegelt die Literatur wider, da diese als Poren vermeidende Technik bei Aluminiumguss bekannt ist, jedoch finden sich keine konkreten Parameter für diese Legierung bzw. über diese Blechdicke. Es wird somit eine eigene Figur mit zwei Schmelzbädern (Einzelfiguren) definiert, wodurch folgende Parameter zur Wahl stehen:

- Gestalt und Form der Einzelfiguren
- Energieverteilung
- Abstand der Schmelzbäder (Einzelfiguren) zueinander

Es ist natürlich jeder erdenkliche Linienzug als Einzelfigur möglich und umsetzbar. Um das Möglichkeitsfeld einzuengen, wird als Schweißfigur (Einzelfigur) die Fig24, mit den Abmaßen  $x = 1.35\text{ mm}$   $y = 0.45\text{ mm}$ , verwendet. Dies bietet den Vorteil, dass bereits Erfahrungswerte existieren. Auch zur Nachwärmung wird die Fig24 mit den gleichen Abmessungen verwendet. Die Energieverteilung zwischen den beiden Einzelfiguren wurde mit 3 : 1 gewählt, somit erhält die erste Figur 750 Punkte und die zweite 250 Punkte (bei 1000 Punkten gesamt, siehe Abbildung 5.2). Die Figur mit den 750 Punkten soll eine Durchschweißung garantieren, während die andere Figur „nur“ nachwärmt. Der letzte zu wählende Parameter ist der Abstand zwischen den Schmelzbädern (Abstand zwischen der Mitte der Einzelfiguren). Dieser wird als freier Parameter für die Versuchsserie A verwendet und somit noch nicht definiert.



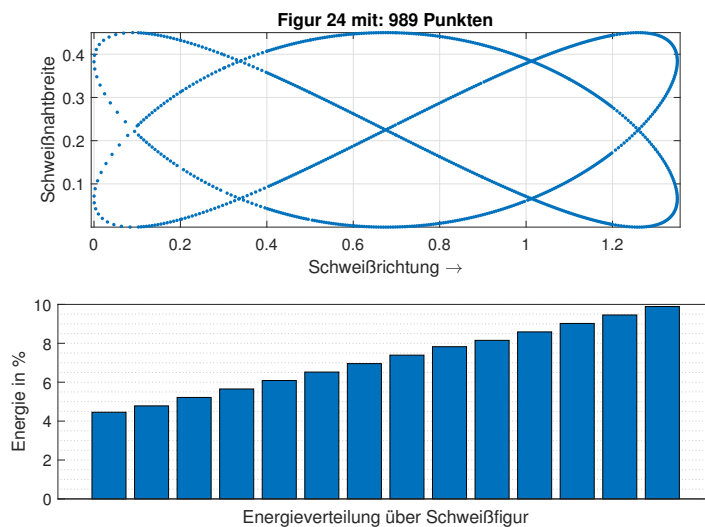
**Abbildung 5.2:** Figur der Zweibadtechnik bestehend aus zwei Einzelfiguren (Fig24)

### 5.1.2 Fig24 mit EV

Dieser Ansatz soll als Bindeglied zwischen einem einzelnen Schweißbad und der Zweibad-technik dienen. Hierzu soll die Punkteverteilung der Figur so gewählt werden, dass die Energie zum Ende der Figur hin abnimmt. Der Gedanke dahinter ist, einen Nachwärmeeffekt innerhalb der Figur zu erzielen und somit auf ein zweites Bad zu verzichten. die Parameter zur Erstellung der Figur sind:

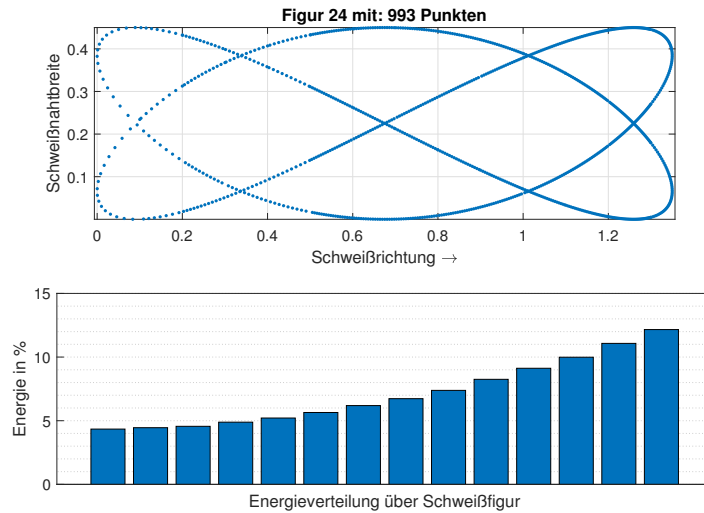
- Gestalt und Form der Figur
- Energieverteilung über die Figur (mittels Punkte)

Auch hier wird die Fig24 als Basis gewählt. Die Figur wird nun in 14 Sektoren entlang der  $x$  – Achse (Schweißrichtung) unterteilt. Nun wird die Energieverteilung über die Figur definiert, somit steht jedem Sektor eine gewisse Anzahl an Punkten zu Verfügung. Wie in Abbildung 5.3 ersichtlich, wurde hier eine linear abnehmende Energieverteilung verwendet. Die gesamte Punkteanzahl der Figur beträgt allerdings nur 989 Punkte, dies ist dem Verteilungsalgorithmus (Rundungsfehler) geschuldet, welcher die Punkte den Sektoren zuordnet. Es wurde zudem eine zweite Figur mit quadratischer Energieverteilung erstellt



**Abbildung 5.3:** Fig24 mit linear abnehmender Energie, Balken entsprechen Energie im darüber liegendem Sektor

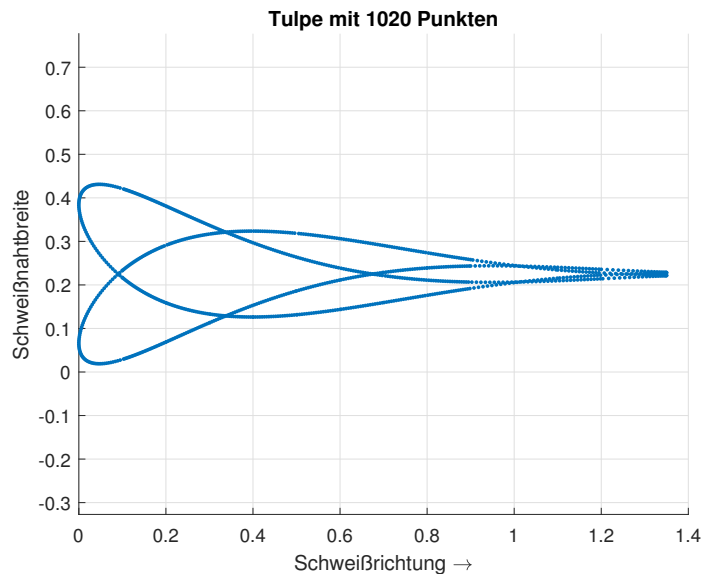
(siehe Abbildung 5.4). Diese erreicht ebenfalls nicht die angestrebten 1000 Punkte, jedoch halten sich die Fehler in Grenzen und werden nicht weiter beachtet. Diese beiden Figuren werden für die Versuche herangezogen. Als Freiheitsgrad, welcher in der Versuchsserie A verwendet wird, dient die Länge der Figuren. Die Breite ( $y = 0.45 \text{ mm}$ ) wird hierbei nicht verändert.



**Abbildung 5.4:** Fig24 mit quadratisch abnehmender Energie, Balken entsprechen Energie im darüber liegendem Sektor

### 5.1.3 Tulpe

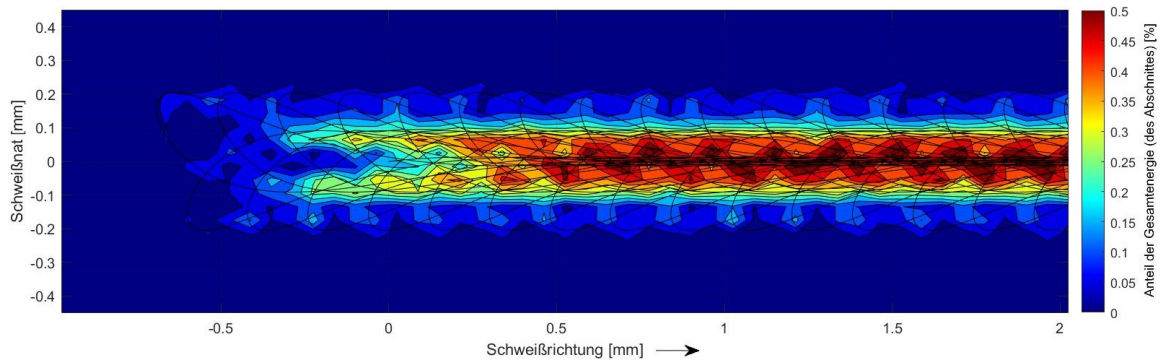
Die „Tulpe“ verfolgt einen anderen Ansatz, wie die bisher erklärte Figuren. Wie im Kapitel 3.2.2 schon gezeigt, sieht die Energieverteilung quer zur Naht bei harmonischen Schwingungen immer sehr ähnlich aus. Bei der Tulpe wurde nun die Energie zur Mitte der Schweißnaht hin „verschoben“.



**Abbildung 5.5:** Figur „Tulpe“

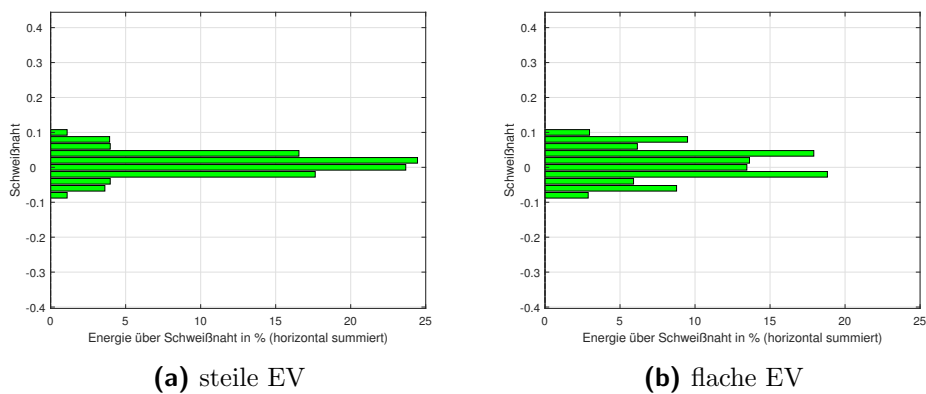
Der Name der Figur kommt von ihrer Form, da sie wie eine sich öffnende Tulpe aussieht (der Name Tulpe findet seinen Ursprung im Persischen und bedeutet „Geliebte/r“. Da

das Ende der Figur herzförmig wirkt, trifft der Name im doppelten Bedeuten zu). Die Tulpe baut, wie die Figuren zuvor, ebenfalls auf der Fig24 auf, mit dem Unterschied, dass die Figur nun mittels einer Hüllkurve (Polynom zweiten Grades) von hinten nach vorne „zusammengedrückt“ wird (siehe Abbildung 5.5). Dies hat den Effekt, dass die Punkteverteilung bzw. Energieverteilung sich auch über die Nahtbreite ändert und somit die maximale Energie in die Mitte der Figur verschiebt, wie in Abbildung 5.6 anhand der roten Färbung deutlich ersichtlich ist.



**Abbildung 5.6:** Energieverteilung der Figur „Tulpe“

Um den Effekt des „Zusammendrückens“ nicht zu stark wirken zu lassen, wurde, gleich wie bei der „Fig24 mit EV“ die Energieverteilung längs der Figur geändert. So hat sie im Bereich der Spitze weniger Punkte als an ihrem Auslauf (Rundungsfehler 1020 Punkte). Auf die genaue Energieverteilung wird nicht weiter eingegangen, es wurden jedoch zwei verschiedene Typen dieser Figur erstellt. Die eine Figur weist eine „steilere“, die andere eine „flachere“ Energieverteilung auf, wie in nachstehender Abbildung gezeigt. „Steiler“ und „flacher“ bezieht sich hierbei auf den Gradienten von der Mitte der der Schweißnaht zu den Rändern. Der Freie Parameter für die Versuchsserie A bildet wieder die Abmessung der Figur.



**Abbildung 5.7:** Energieverlauf der Tulpe quer zur Naht „steiler“ & „flacher“



### 5.1.4 Schmale Naht

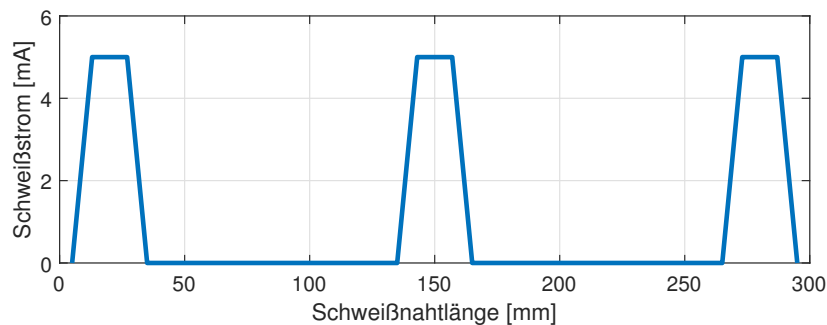
Bei diesem Ansatz soll der Fokus nicht direkt auf der Schweißfigur, sondern auf der Schmelzbadbreite liegen. Die Idee dabei ist, eine schmalere Naht zu erzeugen, um so Poren nicht den nötigen Raum zum Wachsen zu geben. Hierzu wird die Fig24 als Ausgang in der Konfiguration  $x = 1.35 \text{ mm}$   $y = 0.45 \text{ mm}$  geschweißt. Dies soll ebenso als Referenzschweißung für die Versuchsserie A dienen. Bei den anderen Schweißnähten dieses Ansatzes wird nun die Figur und somit auch die Schweißnaht schmaler gemacht, die Länge der Figur wird dabei konstant gehalten. Es bestand die Überlegung, den Energieeintrag der Referenznaht auf die Querschnittsfläche umzurechnen und diesen als Ausgangswert für die anderen Parametersätze zu wählen, jedoch zeigten erste Testschweißungen, dass sich der Energieeintrag nicht linear umrechnen lässt.

### 5.1.5 Heften der Probenbleche

Die Probenbleche werden vor dem Schweißen geheftet. Dies geschieht mittels einer Heftnaht, welche aus vorangegangenen Versuchen der *Peak Technology GmbH* übernommen wurde. Die Parameter dieser Heftnaht sind:

- Fig24,  $x = 1.35 \text{ mm}$   $y = 0.45 \text{ mm}$ ,  $f_F = 500 \text{ Hz}$  (Schweißrichtung in  $x$ )
- Strahlstrom  $6 \text{ mA}$  (bei  $80 \text{ kV}$ )
- Schweißgeschwindigkeit  $v = 20 \text{ mm/s}$

Bei ersten Testschweißungen fiel jedoch auf, dass es manchmal zu größerem Kantenversatz kam, der sich von Beginn bis zum Ende der Naht verschlimmerte. So wurde entschieden, einen weiteren Heftschrift vorzunehmen. Hierbei wurde jedoch nicht mit einer durchgehenden Heftnaht geschweißt, sondern mittels drei kleinen Heftern (Länge  $30 \text{ mm}$ , Beginn, Mitte und Ende der Naht), wie Abbildung 5.8 zeigt. Die kleinen Hefter werden mit den



**Abbildung 5.8:** Position der Hefter, dargestellt mittels Strahlstrom über Schweißnaht

gleichen Parametern geschweißt, mit Ausnahme des Strahlstrom, welcher auf  $5\text{ mA}$  gesenkt wird. Der Strahlstrom wird, wie in der Abbildung gezeigt, nicht schlagartig eingeschaltet, sondern von  $0 - 100\%$  über eine Wegstrecke von  $5\text{ mm}$  linear gesteigert. Dies nennt sich beim Einschalten „Slope In“ und beim Ausschalten des Strahlstromes „Slope Out“ (SI/SO). Nachdem die drei Einzel-Hefter gesetzt wurden, wird nach ca.  $90\text{ sec}$  Pause die Heftnaht geschweißt und somit werden auch die Hefter überschweißt. Diese zwei Heft-Prozesse werden gemeinsam als Heftzyklus bezeichnet und werden vor jeder Schweißnaht durchgeführt. Durch das Wissen, wo sich die Hefter befinden, lässt sich später feststellen, ob diese einen Einfluss auf die Porosität haben.

## 5.2 Vorversuche

Wie bereits im Kapitel 2.2.4 erwähnt, und im Kapitel 3.2.2 genauer betrachtet, bilden die Vorversuche die Grundlage einiger Entscheidungen. Aus diesem Grund werden sie in dieser Arbeit nochmals separat behandelt (Bericht von Kuzicheva [11]). Die Vorversuche wurden mittels der EBW des *IMAT* auf  $2\text{ mm}$  dicken Blechen, der besagten Al6082-Legierung (in T6 Konditionen) durchgeführt. Es wurde kein Nahtstoß, sondern Blindnähte („Bead on Plate“) geschweißt.

### 5.2.1 Durchführung

Die Bleche, mit den Abmaßen  $L = 150\text{ mm}$   $B = 45\text{ mm}$   $H = 2\text{ mm}$  wurden in der EBW mittels einem vorhanden Spanntisch gespannt. Der Elektronenstrahl wurde für diese Versuche nicht (wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben) ausgelenkt, sondern mittels geradem Strahl geschweißt. Der Arbeitsabstand betrug hierbei ca.  $500\text{ mm}$ . Die Bleche wurden vor der Schweißung mittels einer Stahlbürste gebürstet und anschließend mit Isopropanol gereinigt. Durch diese Nahtvorbereitung sollte ein weitgehendes Entfernen der Oxidschicht sichergestellt werden. Es konnten sechs Bleche parallel gespannt werden (ohne Kontakt, d.h. keine Wärmeleitung). Dies führte zu zwei Schweißdurchgängen:

- 1) Schweißdurchgang (V1, V2): es wurde ein Vakuum von  $3 * 10^{-4}\text{ mbar}$  in der Arbeitskammer erreicht. Mit der ersten Schweißnaht wurde  $55\text{ min}$  nach dem Bürsten der Platten begonnen.
- 2) Schweißdurchgang (V3, V4): ein etwas geringeres Vakuum von  $3.8 * 10^{-4}\text{ mbar}$  wurde, nach ca.  $35\text{ min}$ , erreicht. Dies entspricht der Zeit zwischen Nahtvorbereitung und der ersten Schweißnaht.

Nach beiden Schweißdurchgängen wurde noch  $3\text{ min}$  bis zum Fluten der Kammer gewartet, um den Schweißnähten mehr Abkühlzeit im Vakuum einzuräumen. Nach dem Schweißprozess hatten die Proben folgendes Aussehen (wie in Abbildung 5.9) gezeigt.



**Abbildung 5.9:** Beispiel einer Schweißung der Vorversuche

Auf der Probe wurde zur Identifikation, die Versuchsbezeichnung (hier V1.1) und der verwendete Parametersatz angeschrieben. Die Linie stellt die Entnahmestelle eines metallographischen Schliffes dar, wobei der Pfeil die Blickrichtung auf die Schlifffläche symbolisiert. Die Schweißnähte wurden vor der Schliffherstellung mittels Makroaufnahme auf der Vorder- bzw. Rückseite (Wurzel) dokumentiert. Es stand zudem eine Schweißnahtlänge von  $100\text{ mm}$  für Röntgenuntersuchungen zur Verfügung.

### 5.2.2 Geschweißte Parameter

Um ein Gefühl für die Schweißparameter zu bekommen, wurden zuerst 18 Testnähte mit einer Länge von je  $30\text{ mm}$  hergestellt. Diese wurden ohne Slope In/Out (siehe Kapitel 5.1.5) geschweißt. Folgende Parameter wurden hierbei fixiert:

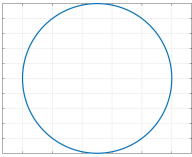
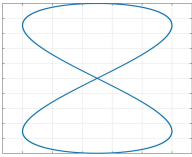
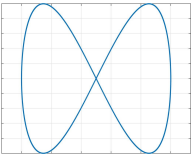
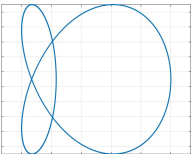
- Schweißfigur: Kreis
- Spannung:  $U_S = 80\text{ kV}$
- Durchlauffrequenz:  $f_F = 600\text{ Hz}$
- Schweißgeschwindigkeit:  $v = 50\text{ mm/s}$
- Fokusslage: Schweißnahtoberfläche

So blieben noch zwei Parameter, die frei wählbar waren zum einen der Kreisdurchmesser und zum anderen der Strahlstrom. Zur Verringerung der Testanzahl wurden zwei Kreisdurchmesser getestet ( $0.5\text{ mm}$ ,  $1\text{ mm}$ ). Nun wurde in zwei Schweißdurchgängen der Strahlstrom ermittelt. Im ersten Durchgang wurden verschiedene Ströme ( $8 - 18\text{ mA}$ , Schrittweite:  $2\text{ mA}$ ) für beide Kreisdurchmesser geschweißt. Anschließend wurden die Nähte optisch, anhand der Kriterien Nahtaussehen, Durchschweißung und Wurzelaussehen, bewertet. Dies führte im zweiten Durchgang zu drei weiteren Schweißungen (je Kreisdurchmesser). Zwei dieser Werte ( $15\text{ mA}$ ,  $17\text{ mA}$ ) stellten die Feinjustierung, der dritte einen Extremwert ( $24\text{ mA}$ ) zur Referenzierung dar. So wurden Anhand dieses Tests folgende Werte für die zwei fehlenden Parameter ermittelt:

- Kreisdurchmesser (Amplitude):  $0.5\text{ mm}$
- Strahlstrom:  $I_S = 16\text{ mA}$

Dieser finale Parametersatz wurde zum Schweißen der Vorversuche verwendet. Die nachfolgende Versuchsmatrix stellt die geplanten Versuche dar. Hierbei standen die verschiedenen Figuren (Kreis, liegende Acht, stehende Acht, Fischfigur) im Fokus (siehe Abbildung 2.15). Diese wurden in je drei Konfigurationen geschweißt wobei hier die  $f_F$  variiert wurde ( $300\text{ Hz}$ ,  $600\text{ Hz}$ ,  $900\text{ Hz}$ ).

**Tabelle 5.1:** Versuchsmatrix Vorversuche

$f_F$	Strahlfigur			
	Kreis	stehende Acht	liegende Acht	Fischfigur
$300\text{ Hz}$				
$600\text{ Hz}$	V1.1	V2.1	V3.1	V4.1
$900\text{ Hz}$	V1.2	V2.2	V3.2	V4.2
$900\text{ Hz}$	V1.3	V2.3	V3.3	V4.3

### 5.3 Versuchsreihe A

Die „Versuchsreihe A“ stellt die erste von zwei Versuchsreihen dar. In diesen Versuchen wurden die Ansätze, welche in Kapitel 5.1 erläutert wurden, in verschiedenen Konfigurationen geschweißt. Diese Konfigurationen wurden zuvor bestimmt und sehen für die Ansätze wie folgt aus:

A1.x Zweibadtechnik: Es wird der Abstand (A) der beiden Schmelzbäder (Mitte zu Mitte) variiert.

A2.x Fig24 mit EV: Es wird zum einen die EV über die Figur (linear, quadratisch), zum anderen die Länge (L) der Figur variiert.

A3.x Tulpe: Es wird zum einen die EV über die Nahtbreite (steiler, flacher), zum anderen die Länge (L) der Figur variiert.

A4.x Mehrbadtechnik: Es werden der Abstand ( $p_1$ ) zwischen dem Schmelzbad und den Wärmepunkten und die Abstände ( $p_2$ ) der Wärmepunkte zur Schweißnahtmitte variiert (siehe Abbildung 2.13).

A5.x Schmale Naht: Hier wurde ausgehend von der Referenzschweißung (Fig24,  $x = 1.35\text{ mm}$   $y = 0.45\text{ mm}$ ) die Figuren- bzw. Nahtbreite (B) verkleinert.

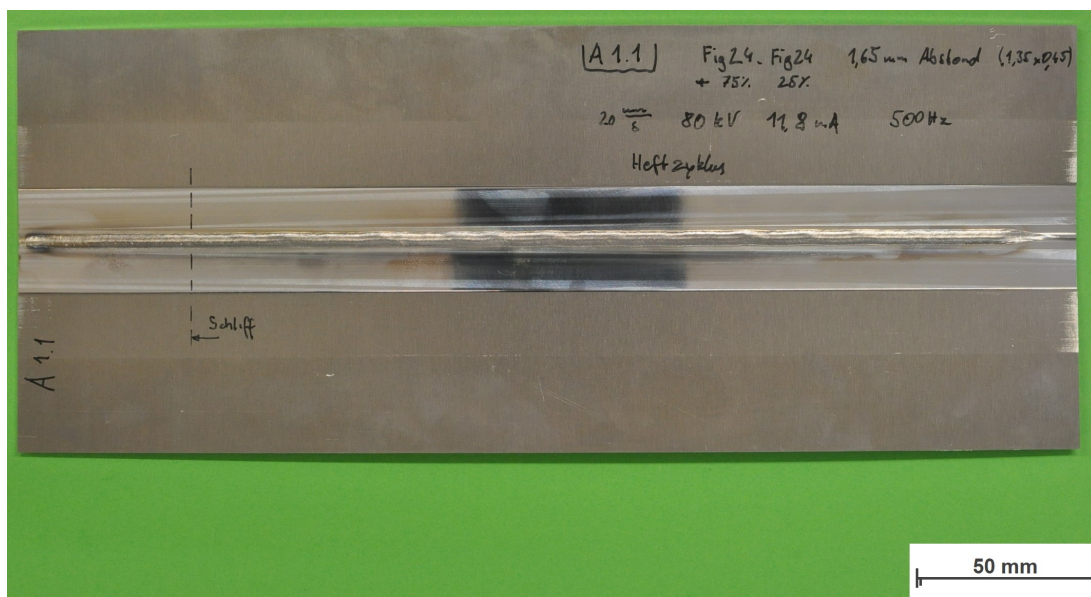
Bei der Zweibadtechnik, wurde als größter Abstand die Länge des Endkraters vom Referenzversuch (Schmelzbadlänge) gewählt. Der Grund für die ungeraden Abstände ist auf ein einfacheres Skalieren, direkt an der Maschine, zurückzuführen (z.B. 5 mm Maschinenskalisierung - 1.35 mm Figurenlänge = 3.65 mm Abstand). Bei den Figuren „Fig24 mit EV“ und „Tulpe“ wurden die Referenzlänge (Fig24,  $x = 1.35\text{ mm}$ ) und eine mehr als doppelt solange Länge gewählt. Die Mehrbadtechnik knüpft an den Gedanken der Zweibadtechnik an. So wurden zwei Abstände übernommen. Jedoch wurde noch kein Abstand der Wärmepunkte definiert. Dies sollte im Laufe der Tests bzw. Versuche geschehen. Die gewählten Werte sind in der Tabelle 5.2 mit der zugehörigen Versuchsbezeichnung nochmals ersichtlich. Eine Figur mit ihren Konfigurationen stellt hierbei eine Versuchsserie dar.

**Tabelle 5.2:** Versuchsmatrix der Versuchsreihe A

Versuchs-Nr.	Strahlfigur				
	Zweibad-technik	Fig.24 mit EV	Tulpe	Mehrbad-technik	Schmale Naht
Nr. 1	<b>A1.1</b> A: 1.65 mm	<b>A2.1</b> L: 1.35 mm EV: linear	<b>A3.1</b> L: 1.35 mm EV: steiler	<b>A4.1</b> $p_1$ : 1.65 mm $p_2$ : -	<b>A5.1</b> B: 0.45 mm <i>Referenz</i>
Nr. 2	<b>A1.2</b> A: 2.65 mm	<b>A2.2</b> L: 1.35 mm EV: quadr.	<b>A3.2</b> L: 1.35 mm EV: flacher	<b>A4.2</b> $p_1$ : 1.65 mm $p_2$ : -	<b>A5.2</b> B: 0.35 mm
Nr. 3	<b>A1.3</b> A: 3.65 mm	<b>A2.3</b> L: 3 mm EV: linear	<b>A3.3</b> L: 3 mm EV: steiler	<b>A4.3</b> $p_1$ : 3.65 mm $p_2$ : -	<b>A5.3</b> B: 0.25 mm
Nr. 4	<b>A1.4</b> A: 4.65 mm	<b>A2.4</b> L: 3 mm EV: quadr.	<b>A3.4</b> L: 3 mm EV: flacher	<b>A4.4</b> $p_1$ : 3.65 mm $p_2$ : -	<b>A5.4</b> B: 0.15 mm

### 5.3.1 Durchführung

Es wurden Bleche geschweißt, welche mittels der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Geometrie angearbeitet und direkt nach der spanenden Bearbeitung einzeln luftdicht (im Vakuum) verpackt wurden. Die Bleche wurden hinsichtlich Ihrer Geometrie von der *Peak Technology GmbH* vermessen und auf ihrer Verpackung mittels einer Nr. gekennzeichnet (Eintragung im Messprotokoll). Zwei dieser Probenbleche ( $L = 300\text{ mm}$   $B = 60\text{ mm}$ ) bilden einen Schweißversuch, da bei diesen Versuchen der beschriebene Stumpfstoß geschweißt wird. Die Bleche werden hierzu in die um  $5.7^\circ$  geneigte Spannvorrichtung (siehe Kapitel 4.1.1) positioniert und gespannt. Da manche der Bleche einen leichten Grat aufwiesen, wurde an den Rückseiten die Kante mittels Stahlklinge leicht gebrochen. Die Bleche wurden weiters mittels Isopropanol vor bzw. während des Spannen gründlich gereinigt. Die Zeit zwischen dem Auspacken der Bleche bis zum Schließen der Arbeitskammer wurde erfasst und betrug im Schnitt  $3 - 3.5\text{ min}$  (Vermeidung weiterer Oxidation). Die Arbeitskammer wurde evakuiert und der Heftzyklus (siehe Kapitel 5.1.5) wurde geschweißt. Dies geschah bereits mit ausgelenktem Strahl. Nach einer weiteren Wartezeit in der geschlossenen Kammer, die im Schnitt  $4.5\text{ min}$  dauerte, erfolgte dann der eigentliche Schweißvorgang. Nun wurden weitere  $3\text{ min}$  abgewartet, was der Abkühlung im Vakuum diente. Anschließend wurde die Kammer geflutet und die Probe konnte entnommen werden.



Makro2: Bildbreite|f|B|t|SH|OH: 308,83mm| 52mm| 13| 1/30s| 657mm| 10mm

Bildname: [ebw\\_al\\_liner20\\_b0151.jpg](#)



**Abbildung 5.10:** Beispiel einer Schweißung der Versuchsreihe A

Nach der Entnahme wurde die Schweißprobe optisch begutachtet und, wie in Abbildung 5.10 ersichtlich, beschriftet. Teil der Beschriftung ist die Versuchsnummer sowie der verwendete Parametersatz. Ebenfalls ersichtlich ist die Entnahmestelle für den metallographischen

Schliff (Pfeil symbolisiert Blickrichtung), welche auf der Seite des Schweißnahtanfangs in  $50\text{ mm}$  Abstand zur Blechkante, befindet. Vor der Schliffherstellung wurde die Probe beidseitig makroskopisch abfotografiert. Die restliche Schweißnaht (ca.  $225\text{ mm}$ ) wurde einzeln zum Schutz verpackt und gemeinsam mit den anderen Proben zu der *Peak Technology GmbH* geschickt, welche die Röntgenuntersuchung beauftragte.

### 5.3.2 Geschweißte Parameter

Es wurden, in Vorbereitung für die Versuchsreihe A, einige Testschweißungen durchgeführt. Zusammen mit den Vorversuchen bildeten diese die Grundlage für einige verwendete Parameter. Diese Tests wurden der Einfachheit halber gleich wie die Vorversuche geschweißt (Bead on Plate, ohne Strahlableitung,  $2\text{ mm}$ -Aluminiumplatten). Einige Parameter waren zu diesem Zeitpunkt (siehe Kapitel 3) bereits definiert:

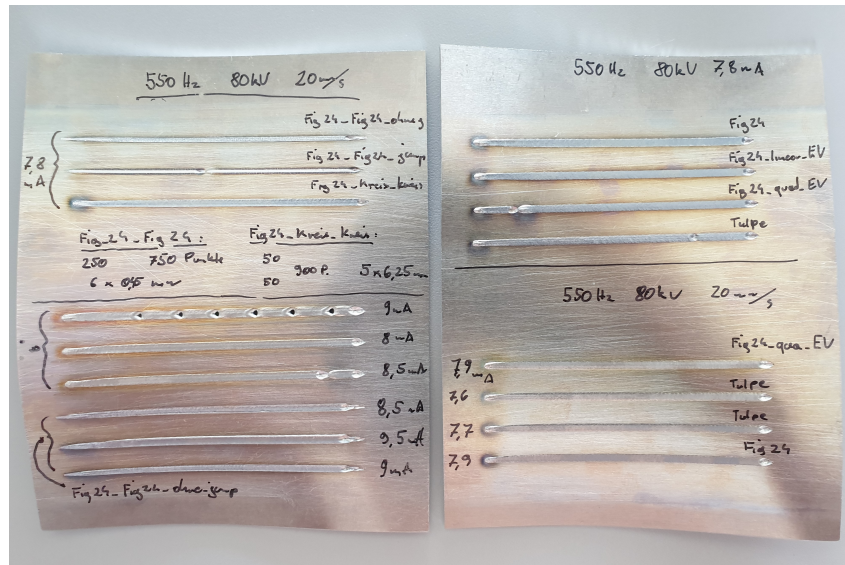
- Fokusslage: Nahtoberseite
- Schweißgeschwindigkeit:  $v = 20\text{ mm/s}$
- Spannung:  $U_S = 80\text{ kV}$

So lag der Fokus dieser Tests auf den Parametern Durchlauffrequenz  $f_F$  und Strahlstrom  $I_S$ . Die Parameter der Testschweißungen werden nicht angeführt, ebenso wird hier nur ein exemplarisches Beispiel einer solchen Testschweißung gezeigt (siehe Abbildung 5.11 a). Zu den Strahlparametern wurden auch die erdachten Figuren definiert (Lage, Skalierung) Hierzu wurden diese vergrößert und mit niedrigem  $I_S$  auf die Platten graviert (siehe Abbildung 5.11 b). Aus den Tests und unter Berücksichtigung der Vorversuche entschied man sich für eine Durchlauffrequenz  $f_F = 500\text{ Hz}$ . Diese wurde anschließend genauer evaluiert, da die Maschinensteuerung verschiedene „Readfrequenzen“ (Beschreibt wie oft die Figur von der Steuerung in einer *sec.* gelesen wird) besitzt. Diese Readfrequenzen sind verschiedenen Speicherplätzen zugewiesen. So besitzen z.B. die Speicherplätze 1-19 die Readfrequenz  $1\text{ Hz}$ . Die Speicherplätze 20-40 eine Readfrequenz von  $10\text{ Hz}$ . Da die Speicherplätze 20-25 für die Versuche verwendet wurden, musste im Schweißprogramm eine  $f_F = 50\text{ Hz}$  programmiert werden (Readfrequenz  $\times$  Durchlauffrequenz= $500\text{ Hz}$ ). Da die Vorversuche mit maschineninternen Figuren auf den Plätzen 1-19 geschweißt wurden, konnte mit der  $f_F$  im Programm gearbeitet werden. Als finaler Parameter blieb nun der Strom zu bestimmen. Bei ersten Testschweißungen auf der Spannvorrichtung und somit auf der Stoßgeometrie stellte sich sofort heraus, dass die zuvor gefundenen Parameter für den Strom nicht übertragbar waren. So mussten neue Werte für den Strom bestimmt werden. Wie schon des Öfteren erwähnt, stehen die Figur und die Parameter in Wechselwirkung zueinander. Da in der Versuchsreihe A mehrere Versuche mit diversen



## 5 Versuche

Figuren bzw. Abmessungen geschweißt wurden, musste für jeden Versuch separat ein neuer Strahlstrom  $I_S$  ermittelt werden. Hierzu wurden vor jedem Versuch sechs Testnähte (zu je 40 mm) geschweißt. Anhand dieser konnte nun der Strahlstrom  $I_S$  für den jeweiligen Versuch bestimmt werden. Diese Prozedur erforderte einen erheblichen Mehraufwand an Probenblechen, welche zu diesem Zeitpunkt nicht zur Verfügung standen. Dieser Fakt führte zu einer Priorisierung der Versuche. Da beim Ansatz der Mehrbadtechnik noch die Abstände der Wärmepunkte unklar waren, wurde diese Versuchsreihe nicht durchgeführt.



(a)



(b)

**Abbildung 5.11:** Bilder verschiedener Testschweißungen, a: Strahlparameter b: Evaluierung der Figur



Nachfolgende Tabellen geben die tatsächlich geschweißten Parameter der 16 Versuche wieder. Zu den verwendeten Parametern wurde noch eine Spalte mit Bemerkungen ergänzt. Diese sagt aus, ob der Versuch für weitere Untersuchungen verwertbar ist. Ist ein Versuch unbrauchbar, z.B. wegen einem Loch oder Überschlag (Unterbrechung des Strahlstroms), wurde dieser wiederholt und mittels einer fortlaufenden Nummer ergänzt. Zur Thematik „Loch“ sei erwähnt, dass bereits feinste Änderungen des Strahles bzw. des Vakuums den Unterschied zwischen einer ordentlichen Wurzel und einem Loch in der Schweißnaht ausmachen.

**Tabelle 5.3:** Versuchsserie A: Zweibadtechnik

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
A1.1		11.8			4.7	149/150	✓
A1.2		12.2			5.5	151/152	✓
A1.3	80	12.8	500	20	2.5	153/154	✓
A1.4		13.2			6.7	156/157	✗
A1.4.2		13.0			4.5	147/158	✓

Der Versuch A1.4 musste in dieser Serie wiederholt werden, da die Naht zwei Löcher aufwies. Aus diesem Grund wurde  $I_S$  um  $0.2\text{ mA}$  gesenkt.

**Tabelle 5.4:** Versuchsserie A: Fig24 mit EV

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
A2.1		11.5			5.1	19/20	✓
A2.2		10.7			5.4	29/30	✓
A2.3	80	11.5	500	20	5.3	21/22	✗
A2.3.2		11.8			5.2	23/24	✗
A2.3.3		11.8			4.6	36/37	✓
A2.4		11.0			2.5	34/35	✓

In dieser Serie musste der Versuch A2.3 gleich zweimal wiederholt werden. Grund hierfür war jeweils ein Überschlag pro geschweißter Naht. Der erste der beiden Fehlversuche wurde genutzt um  $I_S$  um  $0.3\text{ mA}$  zu erhöhen, da die Wurzel nicht zu 100 Prozent zufriedenstellend war.

**Tabelle 5.5:** Versuchsserie A: Tulpe

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
A3.1		11.5			5.3	39/40	✓
A3.2		11.0			6.2	155/148	✓
A3.3	80	12.2	500	20	5.1	145/146	✓
A3.4		11.5			7.1	117/118	✗
A3.4.2		11.2			6.5	119/120	✗

Der Versuch A3.4 wurde wiederholt, da er ein Loch hatte. Die Wiederholung wies zwar einen Überschlag auf, jedoch musste dieser zur nachfolgenden Untersuchungen herangezogen werden. Grund hierfür ist, wie bereits erwähnt, die Knappheit der Probenbleche zu diesem Zeitpunkt.

**Tabelle 5.6:** Versuchsserie A: Schmale Naht

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
A5.1		10.9			4.0	1/2	✗
A5.1.2		10.7			4.1	3/4	✓
A5.2		10.3			4.6	9/10	✗
A5.2.2	80	10.5	500	20	5.4	17/18	✓
A5.3		10.1			4.6	13/14	✓
A5.4		9.7			6.1	15/16	✓

Bei der Serie der „Schmalen Naht“ mussten die ersten beiden Versuche wiederholt werden. Der Versuch A5.1 hatte ein Loch, welches durch eine Verminderung des  $I_S$  um  $0.2\text{ mA}$  behoben werden konnte. Versuch A5.1 wies einen Überschlag auf. Zusätzlich wurde  $I_S$  um  $0.2\text{ mA}$  wegen des Wurzelaussehens erhöht.

### 5.3.2.1 Slope In/Out

Sämtliche Versuche der Versuchsreihe A wurden mit einem Slope In von  $5\text{ mm}$  und einem Slope Out von  $15\text{ mm}$  geschweißt. Diese Werte wurden frei gewählt und stehen nicht im Fokus dieser Arbeit. Sie bieten jedoch schweißtechnische Vorteile wie z.B. Vermeidung von Endkratterrissen und einem „ruhigeren“ Nahtbeginn. Was dem linearen An-/Abstieg der Strahlenergie (0-100%) geschuldet ist. Da die Durchführung dieser Technik keinen Mehraufwand darstellt, wurde nicht auf diese verzichtet.





## 5.4 Versuchsreihe B

Die Versuchsreihe B stellt die zweite Versuchsreihe dieser Arbeit dar. Ziel war es, auf den bestehenden Ergebnissen von Versuchsreihe A aufzubauen und eine statistisch aussagekräftige Erhebung durchzuführen. Hierzu wurde beschlossen, fünf Schweißnähte der gleichen Konfiguration zu schweißen. Dies würde bei 16 bestehenden Konfigurationen zu 80 Schweißversuchen führen. Aus diesem Grund wurden aus der Versuchsreihe A sechs Versuche ausgewählt, um die Anzahl der durchzuführenden Versuche auf 30 zu minimieren. Als Auswahlkriterien wurden verschiedene Faktoren herangezogen, auf welche in Kapitel 6.3.2 genauer eingegangen wird. Es wurde aus jeder Strahlfigur zu mindestens ein Versuche ausgewählt. Die sechs ausgewählten Versuche sind:

- 1) Zweibadtechnik: A1.1
- 2) Fig24 mit EV: A2.2
- 3) Tulpe: A3.1
- 4) Schmale Naht: A5.1 (Referenzversuch)
- 5) Fig24 mit EV: A2.3
- 6) Schmale Naht: A5.3

Die Versuche 5/6 dienen als Erweiterung der Versuchsreihe B. Der Versuch A2.3, wurde aufgrund seiner guten Ergebnisse bei der Röntgenprüfung ergänzt. Anders der Versuch A5.3, dieser dient als „schlechte“ Referenz und soll zeigen, ob auch dies Porenanfälligkeit reproduzierbar ist (siehe Kapitel 6.3.2). Zusammengefasst ergibt sich folgende Versuchsmatrix:

**Tabelle 5.7:** Versuchsmatrix der Versuchsreihe B

	Strahlfigur			
	Zweibad- technik	Fig.24 mit EV	Tulpe	Schmale- Naht
				
5×	<b>B1.1</b> A: 1.65 mm	<b>B2.2</b> L: 1.35 mm EV: quadr.	<b>B3.1</b> L: 1.35 mm EV: steil	<b>B5.1</b> B: 0.45 mm
		<b>B2.3</b> L: 3 mm EV: linear		<b>B5.2</b> B: 0.25 mm

### 5.4.1 Durchführung

Da die Versuche der Reihe B massiv auf den Ergebnissen der Reihe A aufbauen, läuft die Versuchsdurchführung fast gleich, wie jene von der Reihe A ab. Es gab jedoch zwei Änderungen bei der Durchführung:

- 1) Die Zeit zwischen Heften und Schweißen wurde im Schnitt auf  $6min$  erhöht, um die Zwischenlagentemperatur weiter zu senken.
- 2) Es wurden keine metallurgischen Schliffe aus den Versuchen von B entnommen, was bedeutet, dass die Proben als ganzes geröntgt wurden.

Aus der Materialknappheit der Versuchsreihe A wurde gelernt. So wurde mit der *Peak Technology GmbH* ein Probenumfang 60 Blechpaare vereinbart. Dies lässt genug Spielraum für etwaige Tests und eventuellen Fehlversuchen.

### 5.4.2 Geschweißte Parameter

Da die Versuchsreihe B zur statistischen Erhebung der in der Versuchsreihe A geschweißten Parameter dient, ist es logisch, dass die Parameter aus den gewählten Versuchen der Reihe A geschweißt wurden (siehe Kapitel 5.3.2). So bildet der Parametersatz eines A-Versuches den Ausgang für den B-Versuch. Es zeigte sich aber, dass der Strahl oft mit diesen Parametern zu „stark“ war. Die Folge waren Löcher in der Schweißnaht. Aus diesem Grund wurde der Strahlstrom  $I_S$  gegebenenfalls gesenkt, alle anderen Parameter blieben gleich! Mögliche Gründe für dieses Phänomen sind nicht trivial. Da im unteren Leistungsbereich der EBW gearbeitet wird, haben bereits kleinste Änderungen Einfluss auf den Strahl. Auch Umweltfaktoren wie z.B. Druck, Temperatur und Luftfeuchte spielen eine Rolle für das Vakuum und die Strahlqualität. Misslang ein Versuch, wurde dieser wiederholt. Dies wurde durch eine fortlaufende Nummer vermerkt. Die Versuchsbezeichnung setzt sich aus dem Buchstaben B, der Versuchsnummer des A-Versuches und der fortlaufenden Probennummer zusammen (Beispiel: Tulpe, fünfter Versuch von B = B3.1.5). Anschließend folgen die geschweißten Parameter der Versuchsreihe B.

**Tabelle 5.8:** Versuchsserie B: Zweibadtechnik

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
B1.1.1					5.0	10/11	✓
B1.1.2					4.8	1/2	✓
B1.1.3	80	11.8	500	20	2.2	3/4	✓
B1.1.4					4.2	5/8	✓
B1.1.5					4.6	9/12	✗
B1.1.6					4.0	13/14	✓

Die Serie der Zweibadtechnik konnte komplett mit dem Wert von  $I_S = 11.8 \text{ mA}$  geschweißt werden. Es gab einen Überschlag B1.15, welcher aber bereits mit folgendem Versuch korrigiert wurde.

**Tabelle 5.9:** Versuchsserie B: Fig24 mit EV (EV=quadratisch,  $L = 1.35 \text{ mm}$ )

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
B2.2.1		10.7			5.0	16/17	✗
B2.2.2		10.3			5.8	15/19	✗
B2.2.3		10.2			4.8	18/20	✓
B2.2.4	80	10.2	500	20	4.6	21/22	✓
B2.2.5		10.2			2.0	23/24	✓
B2.2.6		10.2			4.6	25/26	✓
B2.2.7		10.2			4.8	27/28	✗
B2.2.8		10.2			4.8	29/30	✓

Bei der Serie der Fig24 mit (quadratischer) EV musste auf  $I_S = 10.3 \text{ mA}$  reduziert werden, da der Versuch B2.2.1 mehrere Löcher aufwies. Es folgte eine weitere „Schönheitskorrektur“ auf  $I_S = 10.2 \text{ mA}$ , was kein Problem war, da B2.2.2 so wie B2.2.7 einen Überschlag hatten.

**Tabelle 5.10:** Versuchsserie B: Fig24 mit EV (EV=linear  $L = 3\text{ mm}$ )

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
B2.3.1		10.8			5.0	17/18	✗
B2.3.2		10.5			5.8	19/20	✓
B2.3.3		10.5			4.8	21/22	✓
B2.3.4	80	10.5	500	20	4.6	23/24	✓
B2.3.5		10.5			2.0	25/26	✗
B2.3.6		10.5			4.6	27/28	✗
B2.3.7		10.5			4.8	29/30	✓
B2.3.8		10.5			4.8	31/32	✓

Die zweite Versuchsserie der Fig24 mit (linearer) EV musste ebenfalls wegen eines Lochs korrigiert werden. Der Wert  $I_S = 10.5\text{ mA}$  führte aber zu brauchbaren Versuchen, bis auf B2.3.5 und B2.3.6, welche Überschlüge hatten.

**Tabelle 5.11:** Versuchsserie B: Tulpe

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
B3.1.1		11.5			5.0	31/32	✗
B3.1.2		11.0			5.2	33/34	✗
B3.1.3		10.3			4.7	35/36	✗
B3.1.4		10.0			5.0	37/38	✓
B3.1.5	80	10.0	500	20	5.3	39/40	✗
B3.1.6		10.0			4.9	41/42	✓
B3.1.7		10.0			5.0	43/44	✓
B3.1.8		10.0			4.8	45/50	✗
B3.1.9		10.0			3.6	1/2	✓
B3.1.10		10.0			3.5	3/4	✓

Die Versuchsserie der Tulpe stellte sich als „widerspenstigste“ der Reihe B heraus. Der Strom musste hier drei mal aufgrund von Löchern korrigiert werden bis zu einem stabilen Wert von  $I_S = 10.0\text{ mA}$ . Zudem wiesen B3.1.5 und B3.1.8 Überschlüge auf, was schlussendlich zu 10 geschweißten Versuchen führte, wovon nur fünf verwertbar waren.

**Tabelle 5.12:** Versuchsserie B: Schmale Naht „Referenz“

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
B5.1.1		10.8			4.0	47/49	✗
B5.1.2		10.5			4.1	51/60	✓
B5.1.3		10.5			4.4	56/57	✓
B5.1.4	80	10.5	500	20	2.4	59/58	✓
B5.1.5		10.5			5.2	52/53	✗
B5.1.6		10.5			5.1	48/55	✓
B5.1.7		10.5			5.0	6/7	✓

Bei der Referenzserie wurde der Strom auf  $I_S = 10.5 \text{ mA}$  gesenkt, um konstante Bedingungen zu erhalten. Es war jedoch ein Überschlag bei Versuch B5.1.5 zu verzeichnen.

**Tabelle 5.13:** Versuchsserie B: Schmale Naht  $B = 0.25 \text{ mm}$ 

Versuch Nr.	Spannung $U_S$ [kV]	Strom $I_S$ [mA]	Frequenz $f_F$ [Hz]	Vorschub $v$ mm/s	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]	Blech Nr.	Bemerkung ✓/✗
B5.3.1		9.8			5.3	5/6	✗
B5.3.2		10.1			5.1	7/8	✓
B5.3.3	80	10.1	500	20	4.8	9/10	✓
B5.3.4		10.1			5.0	11/12	✓
B5.3.5		10.1			4.5	13/14	✓
B5.3.6		10.1			5.7	15/16	✓

Die zweite Serie der schmalen Naht war die „angenehmste“ der Reihe B. Es musste lediglich der Strom aus „kosmetischen“ Gründen auf  $I_S = 10.1 \text{ mA}$  angehoben werden. Der erste Versuch hatte einen Überschlag, die anderen Versuche dieser Serie verliefen ohne weitere Probleme.

#### 5.4.2.1 Slop In/Out

Der Slope In wurde auf den Slope Out von  $15 \text{ mm}$  angepasst. Diese Entscheidung wurde nach den Röntgenergebnissen der Versuchsreihe A getroffen. Der angepasste Wert wurde wieder frei gewählt. Es wurde interessehalber aber eine Probe mit verschiedenen Slope In-Werten geschweißt (siehe Abbildung 5.12). Hierzu wurden die Schweißparameter des Versuches B5.1.2 verwendet und fünf Nähte ( $L = 45 \text{ mm}$ ) geschweißt. Da es um die Betrachtung des Slope In ging, wurde der Slope Out deaktiviert ( $0 \text{ mm}$ ). Es wurden die Werte:  $5 \text{ mm}$ ,  $10 \text{ mm}$ ,  $15 \text{ mm}$ ,  $20 \text{ mm}$ , und  $25 \text{ mm}$  für den Slope In geschweißt.

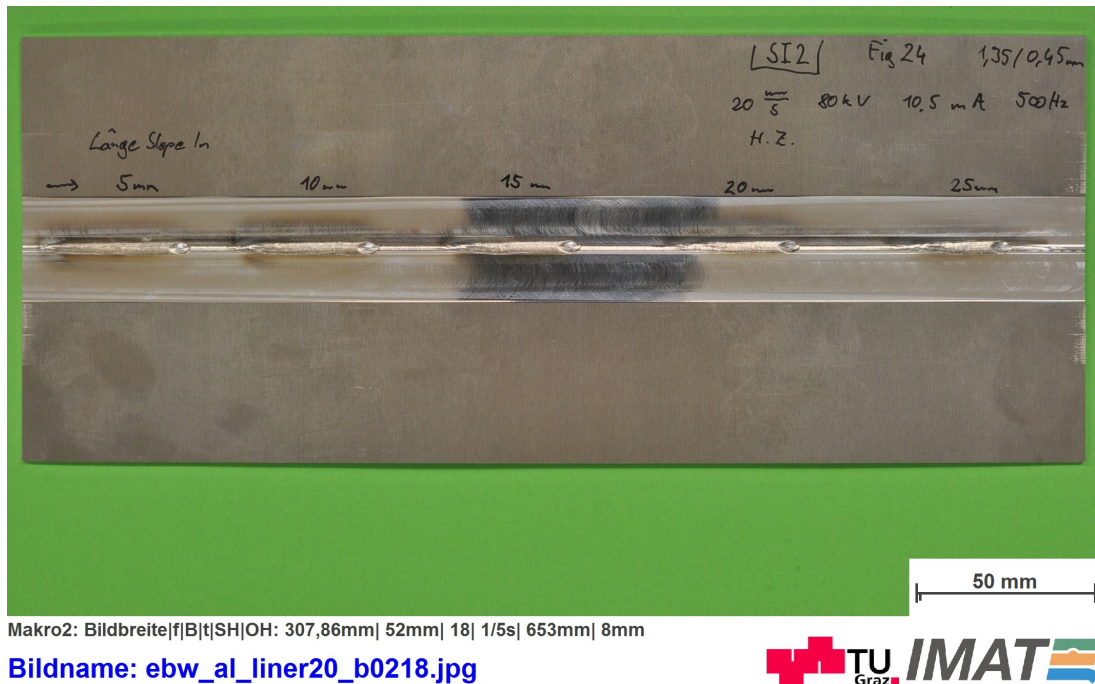


Abbildung 5.12: Versuchsschweißung mit verschiedene Slope In-Werten

## 5.5 Temperaturmessung

Es wurden drei Temperaturmessungen durchgeführt, deren Aufbau in Kapitel 4.2 beschrieben ist. Im ersten Versuch wurde eine Referenzmessung der Fig24 in ihrer Standardkonfiguration ( $x = 1.35 \text{ mm}$   $y = 0.45 \text{ mm}$ ) geschweißt. Im zweiten und dritten Versuch wurde eine Messung der Figur „Zweibadtechnik“ durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Abstände zu dokumentieren. Hierzu wurde der geringste Abstand ( $A = 1.65 \text{ mm}$ ) und der größte Abstand ( $A = 4.65 \text{ mm}$ ) gewählt. Bei den ersten beiden Versuchen wurde jeweils auch der Prozess des Heftens mitdokumentiert. Hier betrug die Zeit zwischen Heften und Schweißen ca.  $2.5 \text{ min}$ . Beim dritten Versuch wurde der zweite Versuch überschweißt. Dies ersparte eine erneute Versuchsvorbereitung. Die Zeit zwischen Heften und Schweißen betrug hier ebenfalls ca.  $3 \text{ min}$ . Das Überschweißen erfolgte nach ca.  $4 \text{ min}$ . Nachfolgende Tabelle 5.14 zeigt die verwendeten Schweißparameter:

Tabelle 5.14: Temperaturmessung Parameter:  $U_S = 80 \text{ kV}$ ,  $v = 20 \text{ mm/s}$ ,  $f_F = 500 \text{ Hz}$

Versuch Nr.	verwendete Figur	Parameter der Figur	Strom $I_S$ [mA]	Druck K. $p_K * 10^{-4}$ [mbar]
T.M.1	Fig24	$x = 1.35 \text{ mm}$ $y = 0.45 \text{ mm}$	10.5	3.4
T.M.2	Zweibadtechnik	Abstand $A = 1.65 \text{ mm}$	11.5	4.1
T.M.3	Zweibadtechnik	Abstand $A = 1.65 \text{ mm}$	12.5	4.5



# 6 Ergebnisse

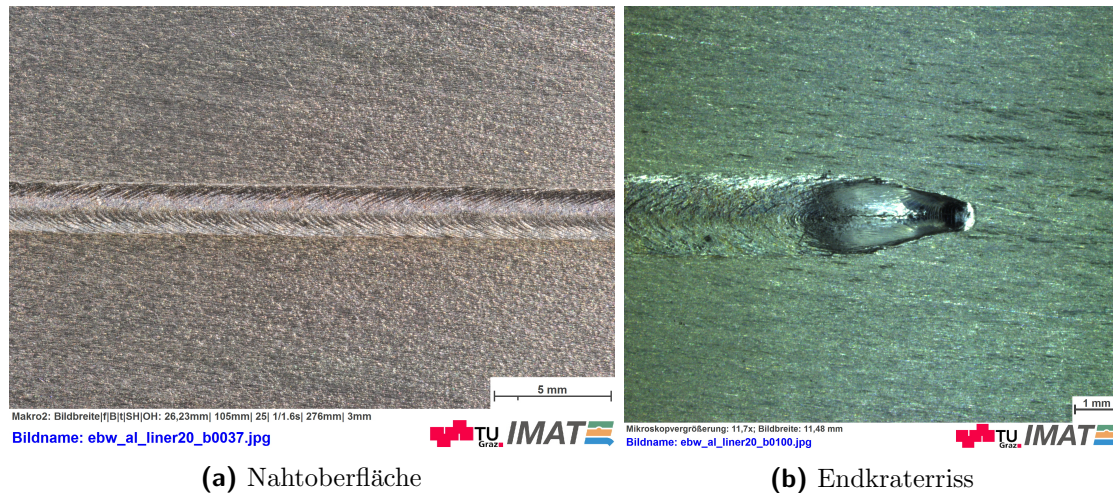
Nun werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Versuche bzw. Methoden betrachtet. Zuerst befasst sich dieses Kapitel mit den Ergebnissen der visuellen Begutachtung, welche als erstes Beurteilungskriterium herangezogen wurde. Diese fand bei allen Versuchen Anwendung, manchmal auch mit Hilfsmitteln. Anschließend wird auf die metallurgische Untersuchung der Vorversuche sowie der Versuchsreihe A eingegangen. Im Zuge dessen wird ein Blick auf die Härtemessung des Ring04 geworfen. Bei den Röntgtenergebnissen sind alle drei Versuchsreihen vertreten, wobei die Versuchsreihe B eine zentrale Rolle spielt. Abschließend werden noch die Ergebnisse der EPMA Analyse sowie der Temperaturmessung betrachtet.

## 6.1 Visuelle Begutachtung

Die visuelle Begutachtung war sehr oft ein adäquates Mittel zur Entscheidungsfindung. So konnten Versuche mit merklichen Defekten ausgesondert werden bzw. wurden Unzulässigkeiten wie z.B. Einbrandkerben, Wurzeleinfall, Nahtversatz etc. detektiert, auf welche sofort reagiert werden konnte. Manchmal lieferte die visuelle Begutachtung mit freiem Auge nur einen Anhaltspunkt, welchem dann aber anhand von Hilfsmittel weitere Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Nachfolgende Erläuterungen geben die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungsform wieder.

### 6.1.1 Vorversuche

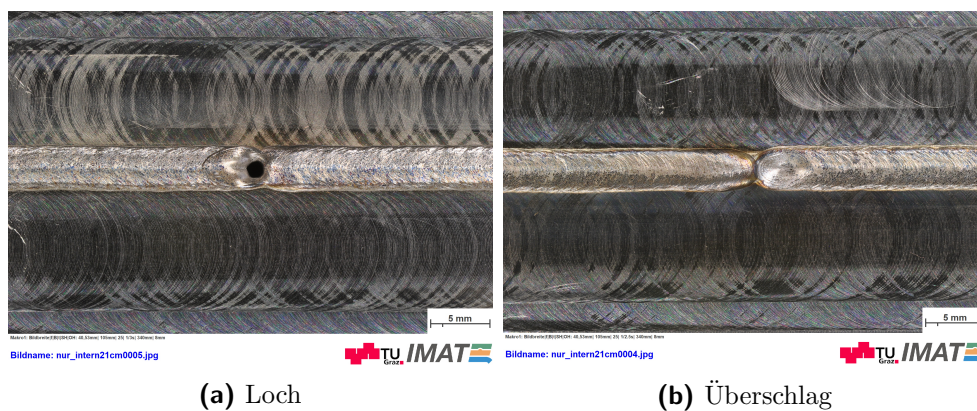
Das Ergebnis der Vorversuche war, wie in Abbildung 5.9 dargestellt, 130 *mm* lange Schweißnähte. Bei diesen wurde auf eine ordentliche Durchschweißung sowie ein ordentliches Nahtaussehen geachtet. Alle der zwölf Nähte erfüllten dieses Kriterium, jedoch fiel auf, dass nicht jede Naht gleich aussah. Manche Nähte wiesen einen leichten Einfall zum Nahttrand hin auf (siehe 6.1 a), was aus den Schliffen noch deutlicher hervorgeht, weshalb hier nur beispielhaft Versuch V3.1 gezeigt wird. Ebenfalls wurden mit freiem Auge Endkraterrisse entdeckt, welches mittels Stereomikroskop bestätigt und dokumentiert wurden. So wurde festgestellt, dass alle zwölf Nähte Endkraterrisse hatten. Wiederum wurde der Versuch V3.1 als Beispiel herangezogen, wie Abbildung 6.1-b zeigt.



**Abbildung 6.1:** Versuch V3.1 (liegende Acht/300Hz)

### 6.1.2 Versuchsreihe A/B

Beide Versuchsreihen wiesen optisch die gleichen Merkmale auf, weswegen sie hier gemeinsam betrachtet werden. Wie schon öfters erwähnt kam es bei manchen Versuchen zu Defekten wie Löchern oder Überschlägen (siehe Abbildung 6.2), was zu raschen Entscheidungen führte, ob der Versuch wiederholt werden musste oder nicht. Die Nähte wurden, wie die Vorversuche, auf ordentliches Aussehen und komplette Durchschweißung geprüft. Alle der zur Bewertung herangezogenen Versuche erfüllten dieses Kriterium. Das Problem der Endkraterrisse tauchte bei keinem der beiden Versuchsreihen mehr auf, da beide Versuchsreihen mit Slope Out geschweißt wurden. Alle Versuche wiesen die gleiche Oberflächenstruktur der Nahtoberfläche auf. Die Wurzeln unterschieden sich ebenso kaum voneinander. Die Breite der Nahtoberfläche und der Wurzeln variierte leicht, jedoch nur bei unterschiedlichen Konfigurationen (Figuren oder deren Abmessungen).



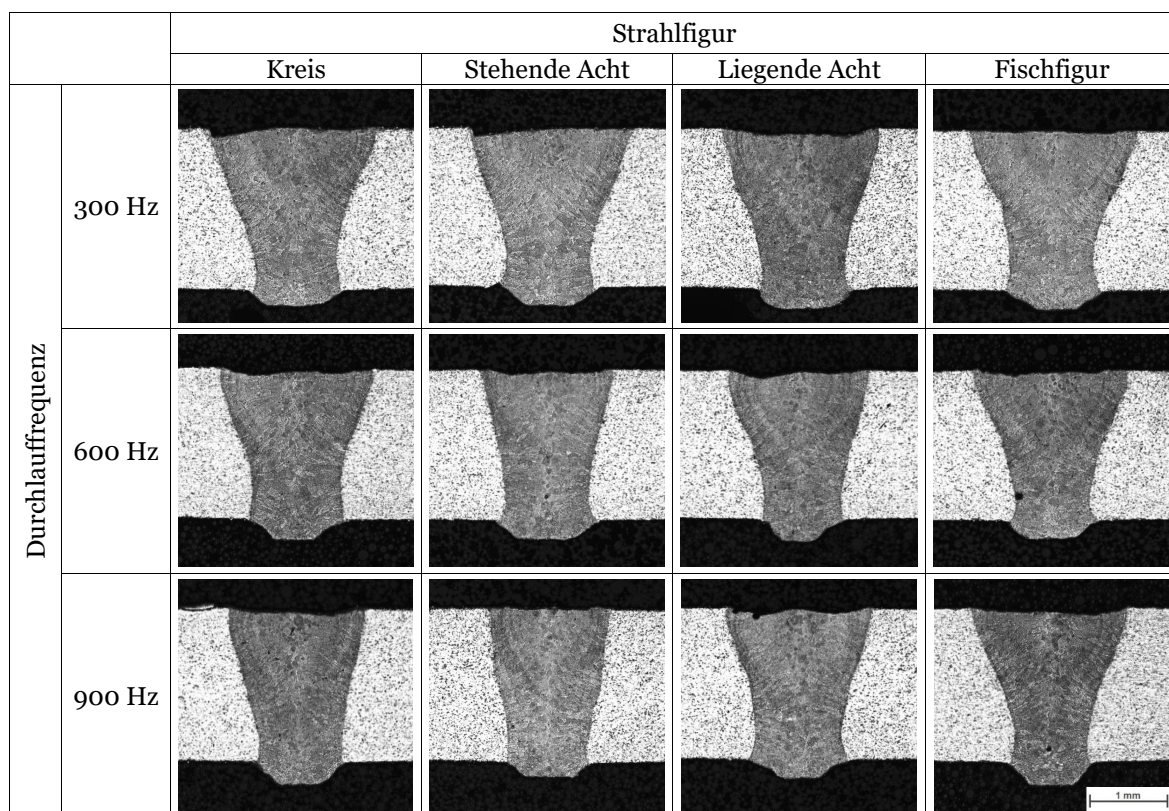
**Abbildung 6.2:** Sichtbare Schweißnahtfehler

## 6.2 Metallografische Schliffe

Nachfolgend werden die metallografischen Untersuchungen betrachtet. Es wurden jedoch nur Querschliffe der Vorversuche und der Versuchsreihe A angefertigt, da die Versuchsparameter der Reihe B weitgehend von der Reihe A übernommen wurden ( $I_S$  bildet die Ausnahme). Es werden zum einen das Nahtaussehen anhand der Fusionslinien betrachtet (SW-Bilder), zum anderen die Orientierung der Körner im Gefüge gezeigt. Abschließend wird das Ergebnis der Härtemessung dargelegt.

### 6.2.1 Vorversuche

In nachstehender Abbildung 6.3 wurden die Querschliffe der Vorversuche gegenübergestellt. Die Anordnung entspricht hierbei der Versuchsmatrix. Die Einzelbilder besitzen hierbei den gleichen Maßstab, um diese vergleichbar zu machen.

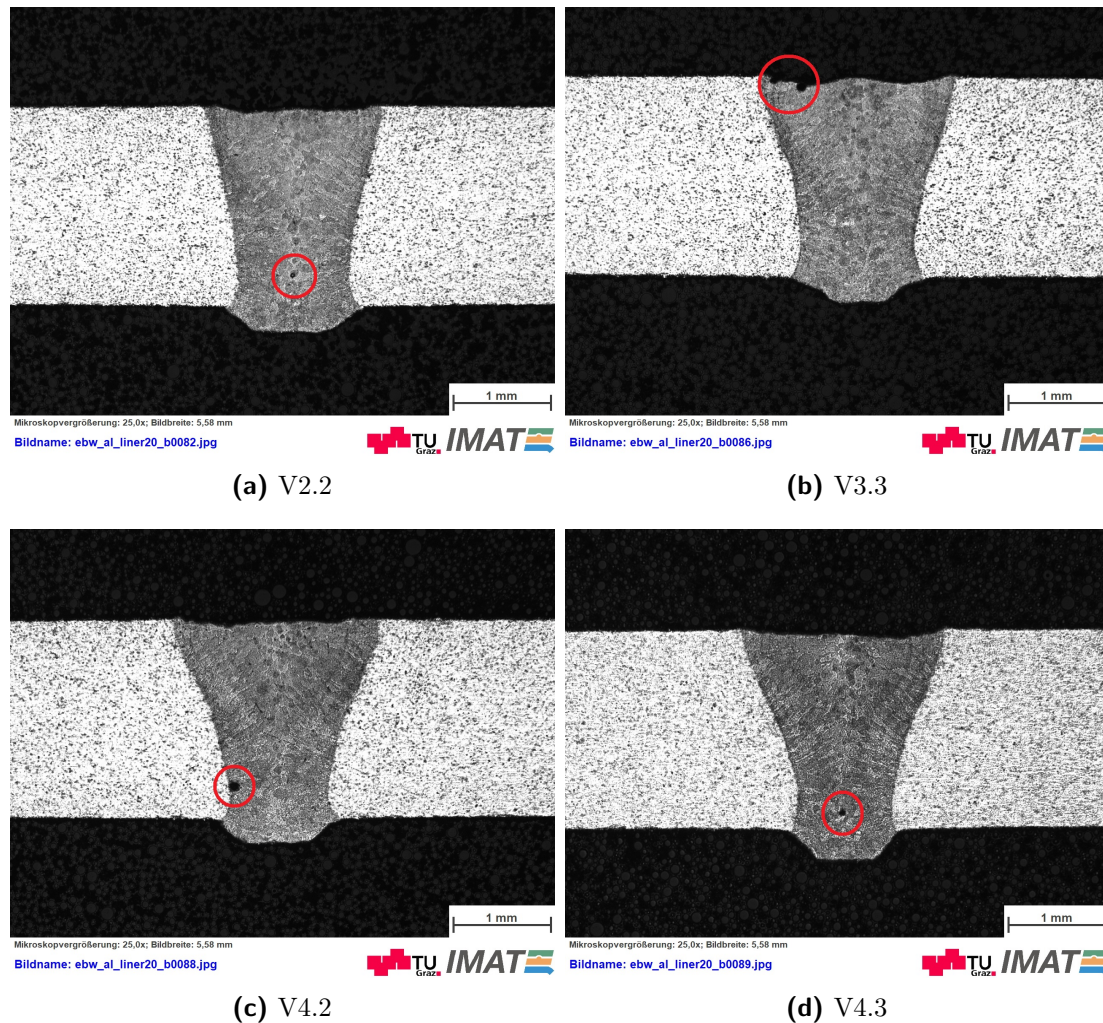


**Abbildung 6.3:** Schliffe der Vorversuche

Deutlich fällt auf, dass sich die Nahtformen der einzelnen Figuren unterscheiden - so ist z.B. die stehende Acht die „schmalste“ Naht. Im Gegensatz dazu ist die Fischfigur die



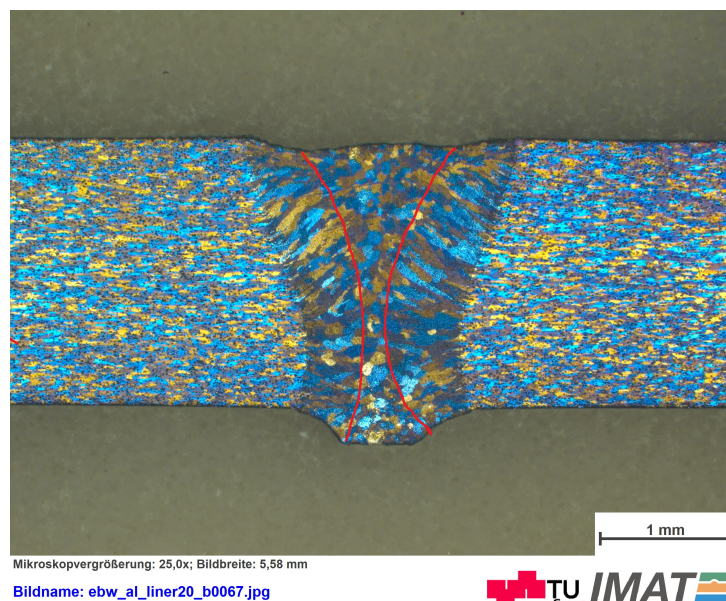
„breiteste“, sie besitzt auch den größten Grad der Verjüngung von Nahtoberfläche zur Wurzel. Die meisten der Nähte weisen einen leichten Nahteinfall auf, da ohne Zusatz bzw. spezieller Geometrie geschweißt wurde. Dieser Nahteinfall ist meistens symmetrisch zur Schweißnahtmitte, nicht jedoch beim Kreis und der stehenden Acht bei einer Frequenz  $f_F$  von 300 Hz. Hier ist der Nahteinfall deutlich einseitig, was durch die visuelle Begutachtung schon vermutet wurde. Alle Nähte besitzen einen sehr schönen Wurzeldurchhang und eine klar ersichtliche Fusionslinie. Jedoch sieht man bei genauerer Betrachtung bereits einige Poren, wie Abbildung 6.4 genauer zeigt.



**Abbildung 6.4:** Detektierte Poren in den Querschliffen der Vorversuchen

Zwei Poren befinden sich in der Mitte der Naht (V2.2, V4.3). Beim Versuch V4.2 befindet sich die Pore in der Nähe der Fusionslinie. Zwei Poren, welche bereits den Nahtoberfläche erreicht haben, befinden sich in Versuch V3.3. Bis auf den Kreis wies jede Figur mindestens eine Pore im Schliff auf, die Fischfigur sogar zwei. Dies hat noch keine Aussagekraft, jedoch bekommt man ein Gefühl für das Problem der Porosität.

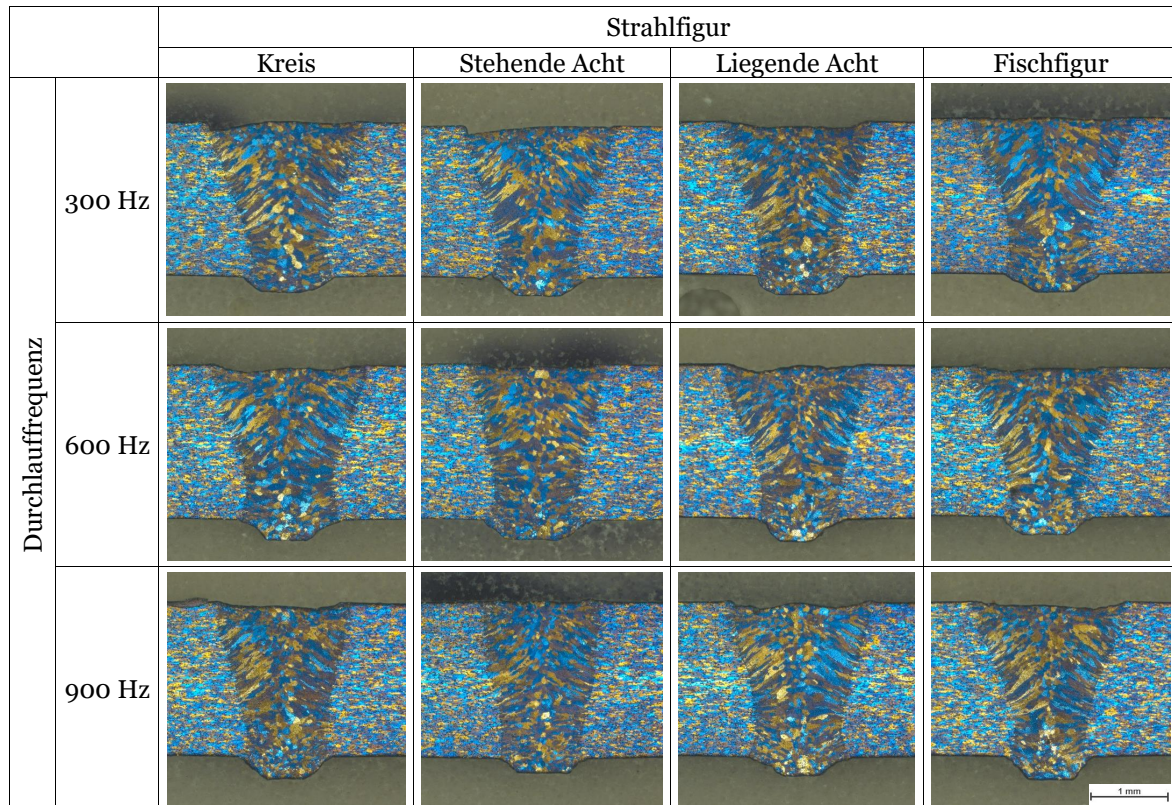
Bevor die Gefügebilder miteinander verglichen werden, sei anhand des Versuches V1.2 der generelle Aufbau des Schweißnahtgefüges analysiert (siehe Abbildung 6.5). Links und rechts der Schweißnaht sieht man das feinverteilte, homogene Gefüge des Grundwerkstoffes. Die Fusionslinie ist deutlich erkennbar, welche den aufgeschmolzenen Bereich der Schweißung kennzeichnet, erkennbar. Blickt man in die Naht, ist deutlich das dendritische Wachstum der Körner von der Fusionslinie zur Mitte der Naht erkennbar (außerhalb der roten Linien in Abbildung 6.5). Dies ist dem Abkühlen der Schmelze geschuldet, welche zur Mitte hin erstarrt. In der Nahtmitte (zwischen den roten Linien) sieht man ein körnigeres Gefüge. Dies können zum einen in Schweißrichtung gerichtete Dendriten, zum anderen ein globulares Gefüge sein. Dieses bilden sich direkt aus der Schmelze, im Gegensatz zu den Dendriten, welche von der Fusionslinie aus wachsen.



**Abbildung 6.5:** Beispiel des Gefüges anhand V1.2 mit Kennzeichnung des Übergangsbereiches von dendritischem auf globulares Gefüge

Nun folgt die Gegenüberstellung der einzelnen Gefüge der Vorversuche (Abbildung 6.6). Auch hier wurde wieder der gleiche Maßstab verwendet, um die Bilder untereinander vergleichbar zu machen. Jedes der Gefüge weist diese beiden Gefügestrukturen auf (dendritisch und globulitisch), jedoch ist der Anteil des globulitischen Struktur bei den breiteren bzw. „kelchförmigeren“ Nähten höher. An den schmalsten Stellen der Nähte (unteres Drittel) wachsen die Dendriten fast horizontal zusammen. In Summe weisen alle Nähte ein klassisches Schweißnahtgefüge für diese Art der Schweißung auf.





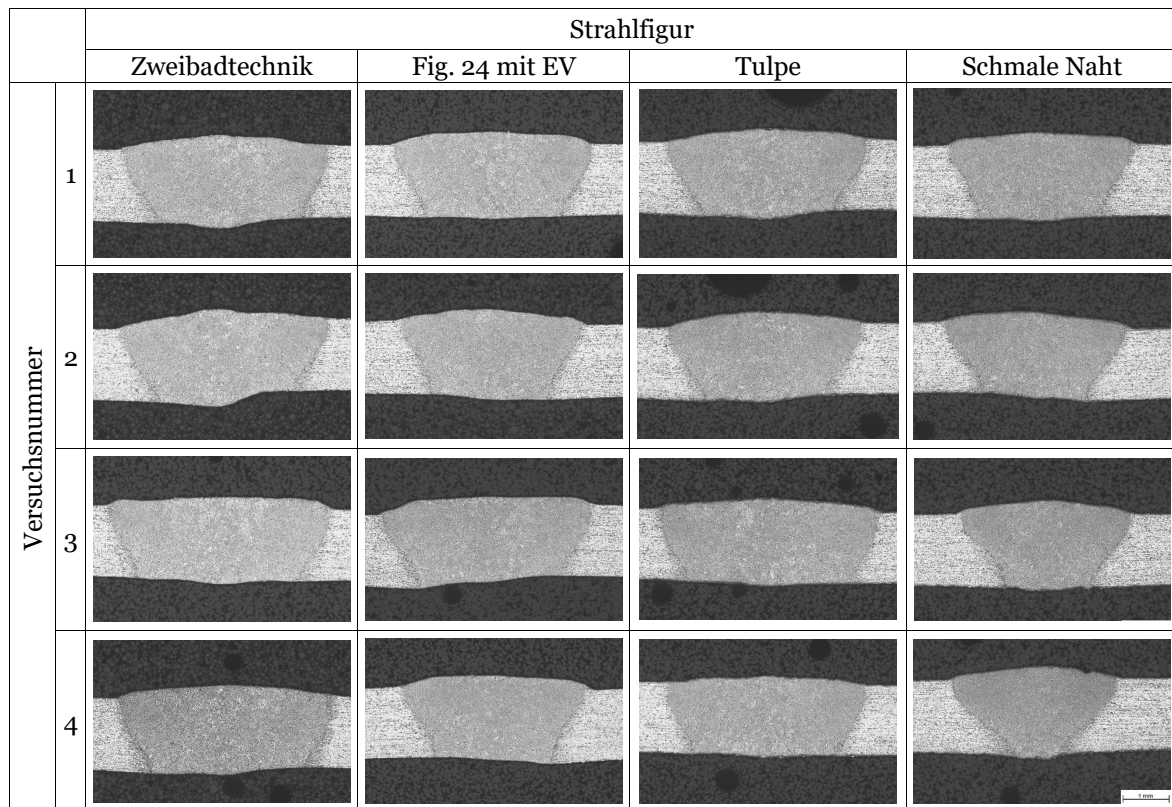
**Abbildung 6.6:** Schiffe der Vorversuche in polarisiertem Licht

### 6.2.2 Versuchsreihe A

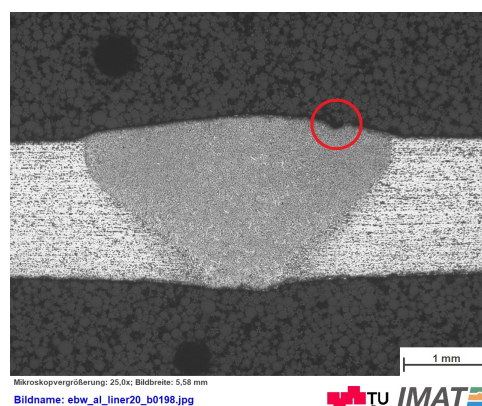
In dieser Versuchsreihe wurden die gleichen metallographischen Untersuchungen wie in den Vorversuchen durchgeführt, was wieder zu zwei Bildmatrizen führt, welche die Schiffe der Versuche A enthalten. Dies dient, wie auch zuvor, der besseren Vergleichbarkeit. Die Bilder sind in beiden Fällen gleich wie die Versuchsmatrix angeordnet (siehe Tabelle 5.2) und es wurde wiederum mit gleichem Maßstab gearbeitet. Nachfolgend wird wieder zuerst die Form der Naht begutachtet.

Es fällt sofort auf, dass die Nähte um einiges breiter sind als die der Vorversuche, obwohl hier im Schnitt mit  $5\text{ mA}$  weniger Strom geschweißt wurde und die Figurenbreite fast die gleiche war (Vorversuche:  $y = 0.5\text{ mm}$ , Versuchsreihe A  $y = 0.45\text{ mm}$ ). Jedoch liegen zwei unterschiedliche Schweißtechniken (Bead on Plate, Stumpfstoß) sowie Materialdicken vor. Ebenfalls unterschieden sich die Figuren deutlich in ihrer Länge. Die Versuchsserie der Zweibadtechnik und der Tulpe sind um eine Spur breiter als die der Fig24 mit EV. Die Serie der schmalen Naht muss für sich betrachtet werden, da diese nur im Versuch A5.1 die gleiche Breite wie die zuvor genannten aufweist. Die Verschmälerung der Naht bei der Versuchsreihe A5.x wird nur im Bereich der Wurzel deutlich sichtbar, an der Nahtoberfläche ist diese so gut wie nicht bemerkbar. Die Versuche A1.2 und A2.3 weisen einen leichten Kantenversatz

der Probenbleche auf. Keine der Nähte besitzt Einbrandkerben oder einen Nahteinfall. In Summe weisen die Nähte ein sehr ähnliches Bild mit keinerlei Unregelmäßigkeiten auf, bis auf Versuch *A5.4*. Dieser besitzt im Bereich der Nahtoberfläche eine Fehlstelle, bei der es sich wahrscheinlich um eine ausgasende Pore handelt (siehe Abbildung 6.8)).



**Abbildung 6.7:** Schiffe der Versuchsreihe A: SW

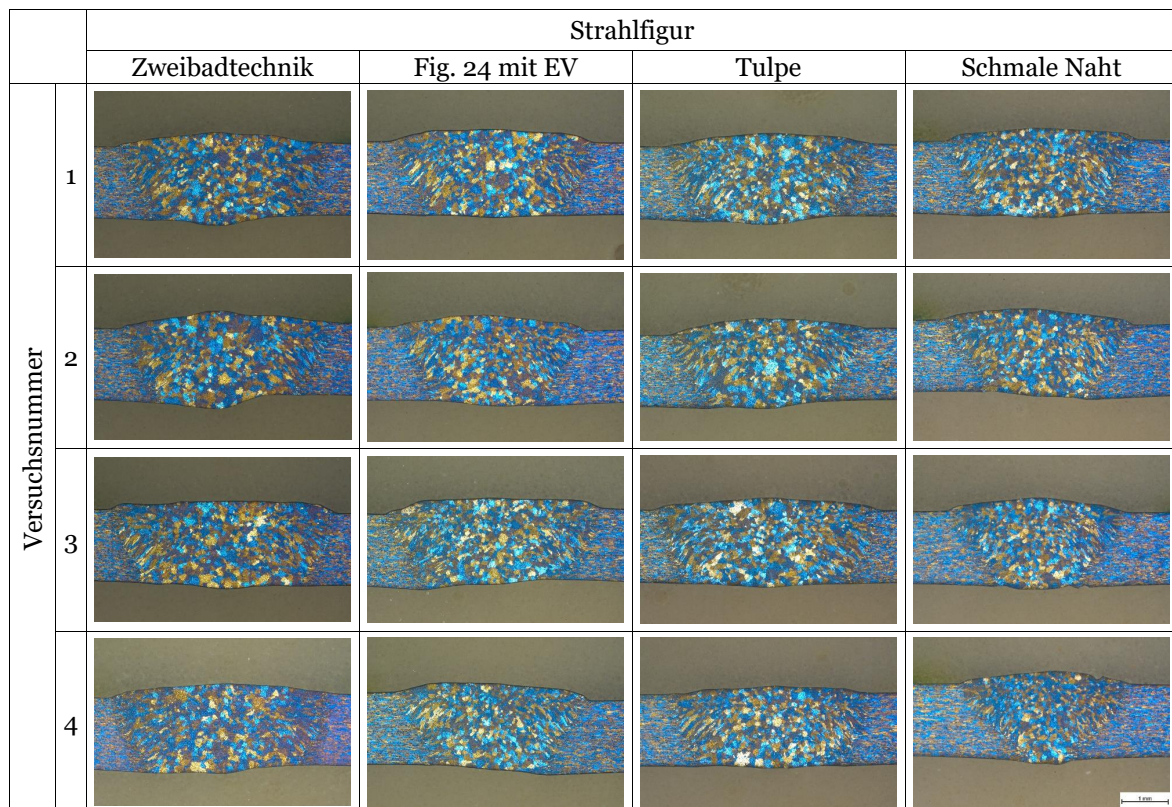


**Abbildung 6.8:** Versuch *A5.4* mit ausgasender Pore

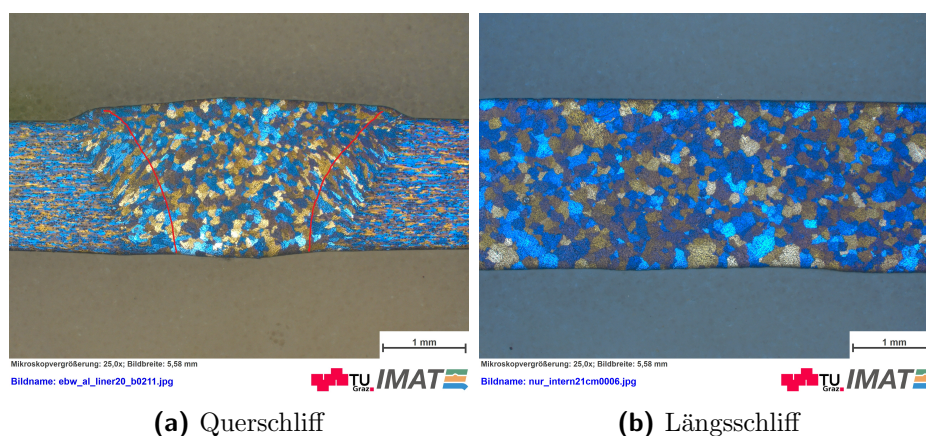
Als Nächstes wird wieder das Gefüge der einzelnen Nähte gegenübergestellt. Um zu klären, ob es sich um globulitische Körner oder gerichtete Dendriten handelt, wurde ein



Längsschliff in der Mitte der Naht angefertigt. Dieser zeigt, dass es sich um ein globulitisches Gefüge handelt (siehe Abbildung 6.10). So sind beide Gefügeformen (globulitisch und dendritisch) vorhanden, jedoch ist der Anteil der globulitischen Körner deutlich größer, wie der Querschliff zeigt. Auch die globulitischen Körner sind im Vergleich zu den Vorversuchen größer, was auf ein langsamerer Erstarren des Schmelzbades hindeutet. Ansonsten sind keine merklichen Unterschiede im Gefüge der Nähte zu erkennen.



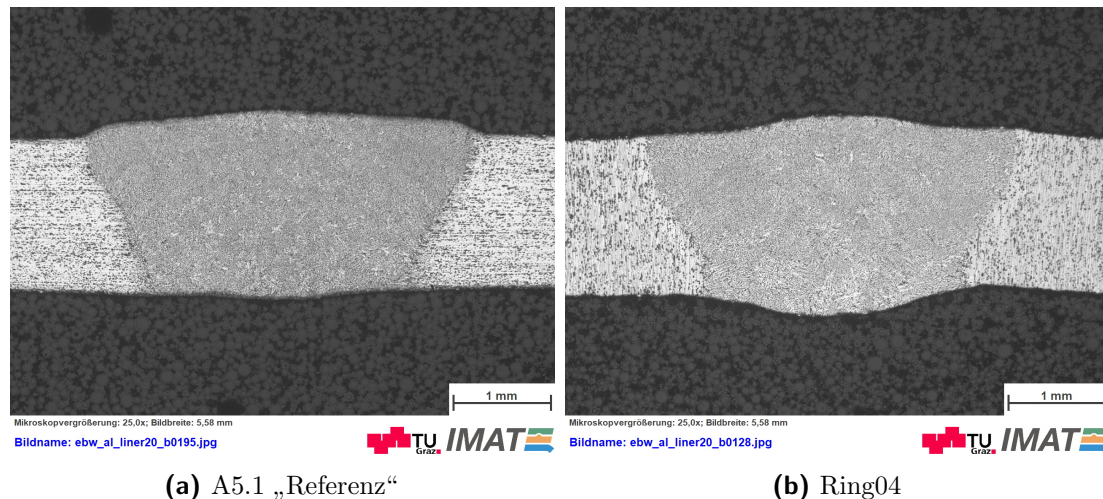
**Abbildung 6.9:** Schliffe der Versuchsreihe A in polarisiertem Licht



**Abbildung 6.10:** Gefüge des Versuchs A5.1



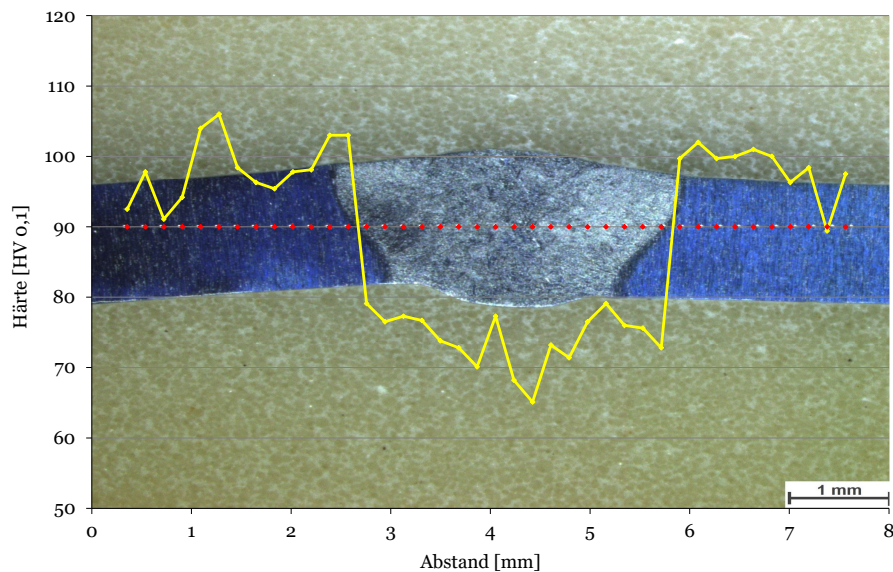
Zum Vergleich sei hier noch die Referenznaht der Versuchsreihe A (A5.1) und die Naht des Ring04 der *Peak Technology GmbH* gegenübergestellt (siehe Abbildung 6.11). Beide Nähte wurden mit fast der gleichen Leistung geschweißt (fast: zwei verschiedene Maschinen sind nicht 1:1 vergleichbar). Die Nähte sehen sich sehr ähnlich, so sind die Abmaße der Wurzel und der Nahtoberfläche fast gleich. Der Verlauf der Fusionslinie unterscheidet sich jedoch. Das „S“ der Fusionslinie ist beim Ring04 deutlicher ausgeprägter wie das beim Versuch A5.1. Der Ring04 weist außerdem einen ausgeprägteren Wurzeldurchhang auf, beide Nähte wurden aber mit unterschiedlicher Durchlauffrequenz  $f_F$  geschweißt.



**Abbildung 6.11:** Gegenüberstellung der Referenznaht und des Ring04

### 6.2.3 Härtemessung

Es wurde, ergänzend zu den anderen Untersuchungen, welche am Ring04 vollzogen wurden, eine Härtemessung mittels  $HV0.1$  durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Die Messpunkte, welche im Grundwerkstoff liegen, weisen eine durchschnittliche Härte von rund  $100 HV0.1$ , mit einer Schwankung von  $\pm 5 HV0.1$  auf. Dies entspricht relativ gut dem üblichen Werten dieser Legierung [4]. In Richtung der Schweißnaht kommt es zu einem markanten Abfall der Härte auf rund  $75 HV0.1$ , ebenfalls mit der Schwankung von  $\pm 5 HV0.1$ . Die Trennung dieser „weichen“ Zone stellt genau die Fusionslinie dar, sprich die Naht besitzt keine ausgeprägte WEZ wie z.B. Stahl.



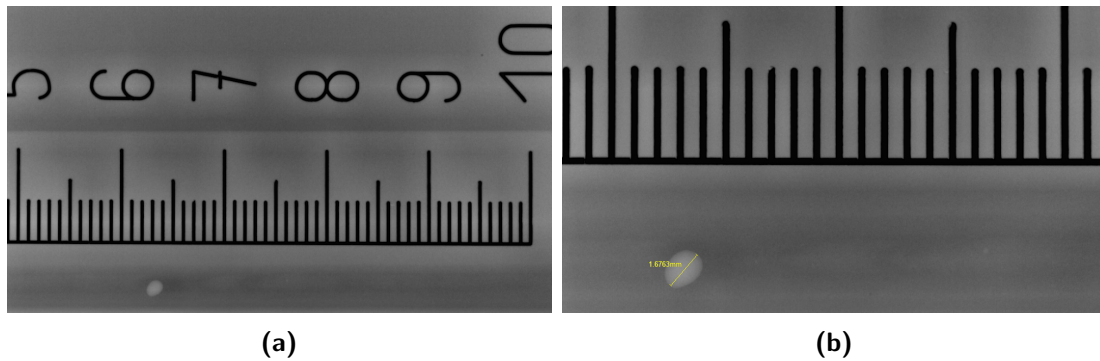
**Abbildung 6.12:** Härtemessung über Schweißnaht des Ring04 mittels HV0.1

### 6.3 Röntgenuntersuchung

Anschließend folgen nun die Ergebnisse der Röntgenprüfung, welche wesentlich für diese Arbeit sind. Die Ergebnisse wurden seitens der Firma *Peak Technology GmbH* zur Verfügung gestellt und enthielten folgende Punkte:

- Übersichtsbilder mit Maßstab
- Detaillierungen dieser Bilder mit eingezeichneter Porengröße
- Prüfprotokoll mit Distanz der Pore zu definiertem Nullpunkt und Fehlergröße

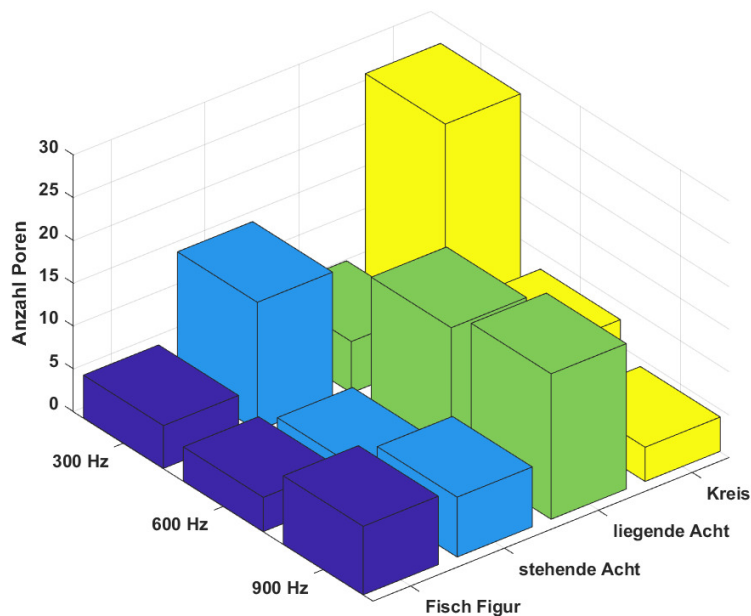
In Abbildung 6.13 ist eine solche Röntgenaufnahme gezeigt. Diese wurden mit den Messprotokollen verglichen und es zeigte sich, dass manche vom System detektierten Fehler nicht der Realität entsprechen bzw. Fehler anderer Natur waren. So wurde z.B. eine Ansammlung an Poren als ein langer Fehler detektiert. Aus diesem Grund wurden die Protokolle mit den Bildern verglichen und es wurden eigene Auswertungen erstellt. Somit konnten Porendurchmesser verglichen bzw. statistisch erhoben werden. Im Nachfolgenden wird auf diese Auswertungen eingegangen.



**Abbildung 6.13:** Beispiel einer Röntgenaufnahme: a) Übersichtsbild, b) Detaillierung

### 6.3.1 Vorversuche

Bei den Vorversuchen wurde die Anzahl der Poren erfasst, ohne Bezug auf ihre Größe zu nehmen. Es sei jedoch erwähnt, dass die Poren über alle Versuche verhältnismäßig gleich groß und ähnlich verteilt waren. Nachstehende Grafik 6.14 zeigt die Versuchskombinationen der Vorversuche in der  $x/y$ -Ebene (diese entspricht aus Darstellungsgründen nicht der Versuchsmatrix!), die  $z$ -Ebene entspricht hierbei der Anzahl an detektierten Poren.



**Abbildung 6.14:** Porenauswertung der Vorversuche (es wurde kein Slope In/Out geschweißt)

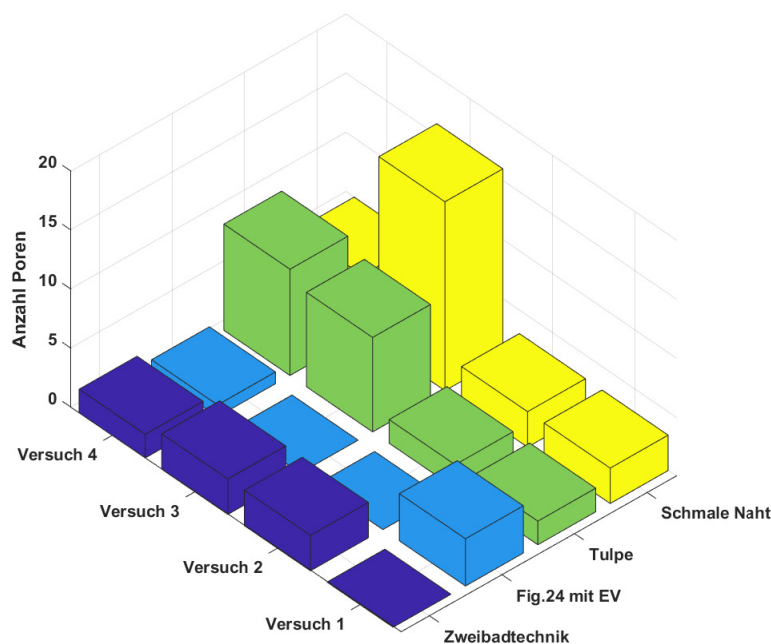
Es ist deutlich ersichtlich, dass die Fischfigur die geringste Porenanzahl über alle Frequenzen hatte (17 Poren gesamt). Der Kreis weist bei einer Frequenz von 300  $Hz$  die meisten Poren (27) auf. Die stehende Acht ist bei einer Frequenz von 600  $Hz$  jener Versuch mit den wenigsten Poren (3). Die Frequenz von 600  $Hz$ , ist über alle Figuren betrachtet, jene mit den wenigsten Poren (30). Dieser Fakt führte zu weiteren Testschweißungen in diesem Frequenzbereich. So wurde entschieden die Versuchsreihen A/B mit einer Frequenz von 500  $Hz$  zu schweißen.

### 6.3.2 Versuchsreihe A

Die Auswertung der Versuchsreihe A wird differenzierter betrachtet. So wurden die Fehler nach Lage und Art unterschieden. In nachfolgender Tabelle 6.1 ist ersichtlich, dass es auch Risse gab. Es wurde zudem eine Größenunterscheidung der Poren getroffen, in „zulässig“ oder „unzulässig“ (siehe Kapitel 2.3.1). Außerdem wurde die schon zuvor verwendete Betrachtungsweise der Porenanzahl verwendet, um eine bessere Übersicht zu erhalten (siehe Abbildung 6.15). Diese Abbildung entspricht der Versuchsmatrix, jedoch gespiegelt.

**Tabelle 6.1:** Auswertung der Röntgenergebnisse: Versuchsreihe A

Vers.	Fehler ges.	Fehler Slope Out		Fehler in Naht		Poren > 0.375	
		Poren	Risse	Poren	Risse	Naht	Slope Out
A1.1	-	-	-	-	-	-	-
A1.2	3	2	1	-	-	-	1
A1.3	3	1	1	-	1	-	-
A1.4	2	-	2	-	-	-	1
A2.1	4	4	-	-	-	-	-
A2.2	-	-	-	-	-	-	-
A2.3	-	-	-	-	-	-	-
A2.4	1	-	-	1	-	1	-
A3.1	2	2	-	-	-	-	-
A3.2	2	1	1	-	-	-	1
A3.3	8	5	3	-	-	-	4
A3.4	9	8	-	1	-	-	1
A5.1	3	3	-	-	-	-	1
A5.2	3	1	-	2	-	1	1
A5.3	16	5	-	11	-	9	1
A5.4	5	1	-	4	-	3	1



**Abbildung 6.15:** Porenauswertung der Versuchsreihe A: Naht mit Slope Out

Man sieht in der Tabelle sowie in der Abbildung, dass es drei Versuche (A1.1, A2.2, A2.3) ohne jegliche Fehler gibt. Der Versuch A5.3 ist mit 16 Poren der schlechteste dieser Reihe. Generell ist die Serie „schmale Naht“ die schlechteste. Es fällt auf, dass die Versuchsreihen der Fig24 mit EV am besten abgeschnitten haben. Es wurde ein Riss in einer Naht (A1.3) detektiert, alle anderen Risse beschränkten sich auf den Bereich des Slope Out.

Wie schon mehrfach erwähnt wurden die Versuche der Serie B anhand dieser Ergebnisse gewählt. Hierzu wurden Entscheidungskriterien getroffen, welche einem Ampelsystem zugeordnet wurden. Als Kriterien wurden gewählt:

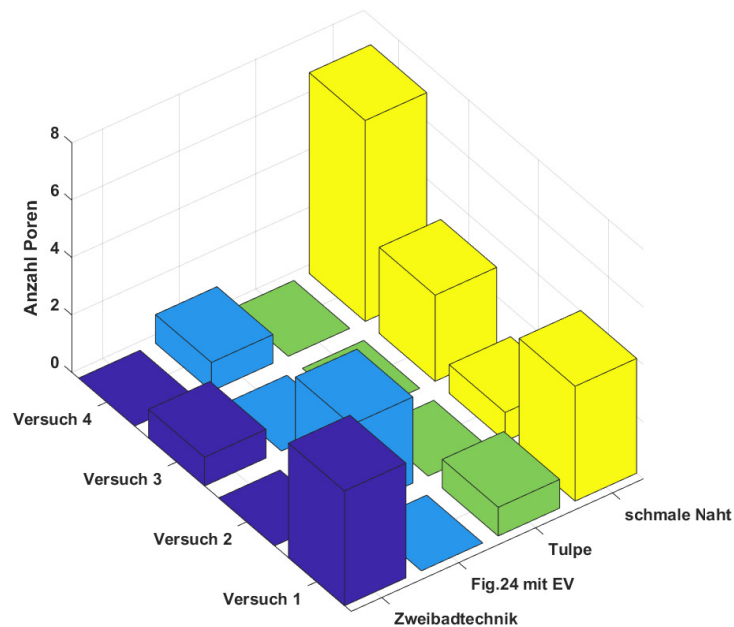
- Rot: Poren  $> 0.375\text{ mm}$ - oder Risse in der Naht (unzulässig lt. Norm)
- Orange: Poren  $> 0.375\text{ mm}$ - oder Risse im Slope Out (nicht näher betrachtet)
- Gelb: Zulässige Poren  $< 0.375\text{ mm}$
- Grün: Fehlerfrei über gesamte Naht inklusive des Slope Out

Die Felder der Matrix stellen dabei wieder die Versuchsmatrix bzw. die Sicht auf die  $x/y$ -Ebene der Grafik 6.15 dar. Mit der Überlagerung der gewählten Kriterien ergibt sich das Bild wie in Tabelle 6.2 dargestellt. Zusätzlich steht in den Feldern eine kurze Beschreibung weshalb die jeweilige Farbe gewählt wurde. Diese Beschreibung soll einen Verweis auf Tabelle 6.1 darstellen und ist mit dieser ergänzend zu lesen.

**Tabelle 6.2:** Entscheidungsmatrix für Versuchsreihe B

3 Poren in Naht	9 Poren in Naht	1Pore in Naht	1 Pore (ges. 3)	schmale Naht
1 Poren	4 Poren (ges. 5) 1 Riss	1 Pore 1 Riss	2Poren alle im SO	Tulpe
1 Pore in Naht			4 Poren alle im SO	Fig24 mit EV
2 Risse	1 Riss in Naht	1 Pore (ges. 2) 1 Riss		Zweibadtechnik
Versuch 4	Versuch 3	Versuch 2	Versuch 1	

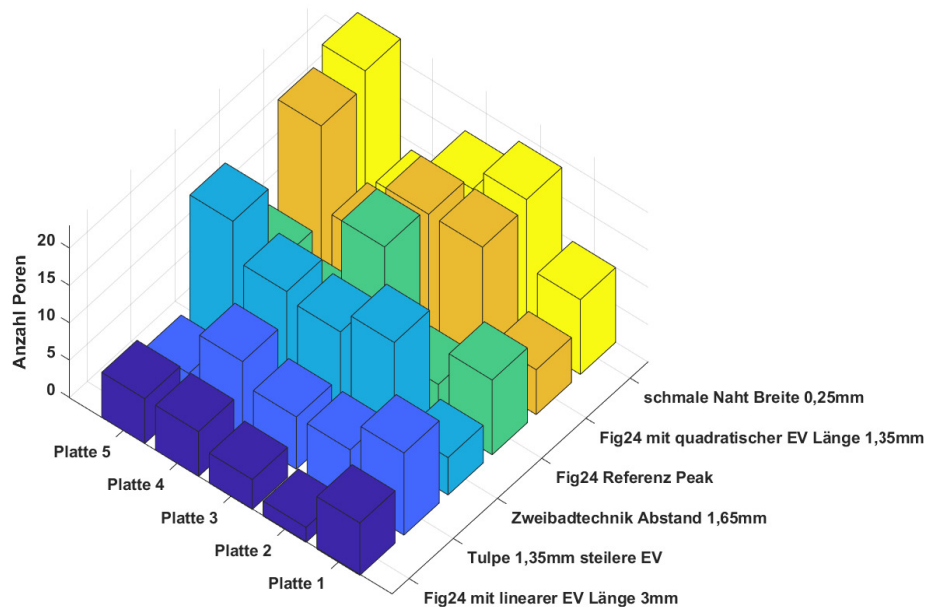
Parallel zu der Entscheidung für die Versuchsreihe B wurden die Bereiche des Slope In zur Röntgenuntersuchung gegeben. Der Nahtbeginn wurde zuerst für die Metallografie benötigt. Die Untersuchung des Slope In wies eine größere Anzahl an Poren auf, weshalb dieser auf die Länge des Slope Out angepasst wurde. Die Entscheidung für die Reihe B blieb durch diese Ergebnisse unverändert. Der Vollständigkeit halber werden die Ergebnisse des Slop In trotzdem angegeben (siehe Abbildung 6.16).

**Abbildung 6.16:** Porenauswertung der Versuchsreihe A: Bereich des Slope In



### 6.3.3 Versuchsreihe B

Bei der Versuchsreihe B wird nun die ganze Naht (Slope In, Naht, Slope Out) betrachtet, da die Proben als ganzes geröntgt werden konnten. Nachstehende Abbildung 6.17 zeigt die bewährte Darstellungsform.



**Abbildung 6.17:** Porenauswertung der Versuchsreihe B: gesamte Naht mit Slope In/Out

Es lassen sich in 6.17 schon einige Trends erkennen, wie z.B. dass die Fig24 mit EV (Länge  $3\text{ mm}$ ) die wenigsten Poren aufweist. Jedoch ist die Menge an Daten ungeeignet, um genauere Interpretationen durchzuführen.

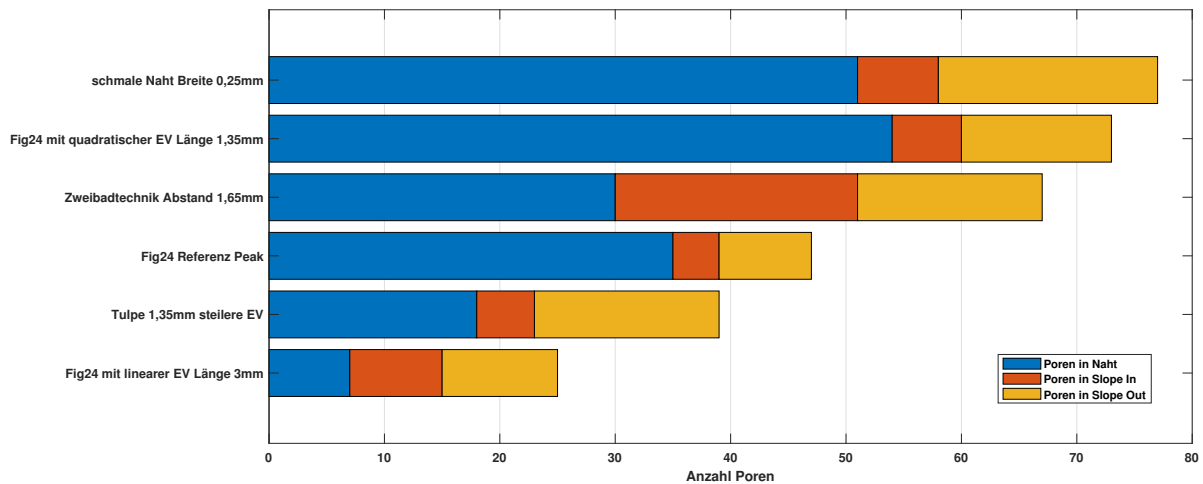
Die Tabelle 6.3 schlüsselt die Fehler auf und gibt zudem den Mittelwert der Poren ( $\bar{x}$ ) und die zugehörige Standardabweichung ( $\sigma$ ) an. Es sei erwähnt, dass die Reihe B keine Risse aufwies, weshalb diese nicht in der Tabelle aufscheinen. Der Slope In-Versuch wurde nicht weiter betrachtet, da es keine bemerkenswerten Unterschiede zwischen den einzelnen Konfigurationen gab.

Um die einzelnen Figuren besser vergleichen zu können, wurde beschlossen die Nähte einer Serie (5.Versuche) zusammenzufassen. Durch das Zusammenfassen der Versuche würde sich eine Gesamtnahtlänge von ca.  $1.5\text{ m}$  ergeben, jedoch ist in dieser Länge auch der Bereich des Slope In/Out enthalten. So wird in den nachfolgenden Darstellungen sowohl auf die Lage der Poren (Slope In/Out, Naht) als auch auf deren Größe eingegangen. Hierzu wird der kritische Durchmesser und die Verteilung der Porengröße herangezogen.

**Tabelle 6.3:** Auswertung der Röntgenergebnisse: Versuchsreihe B

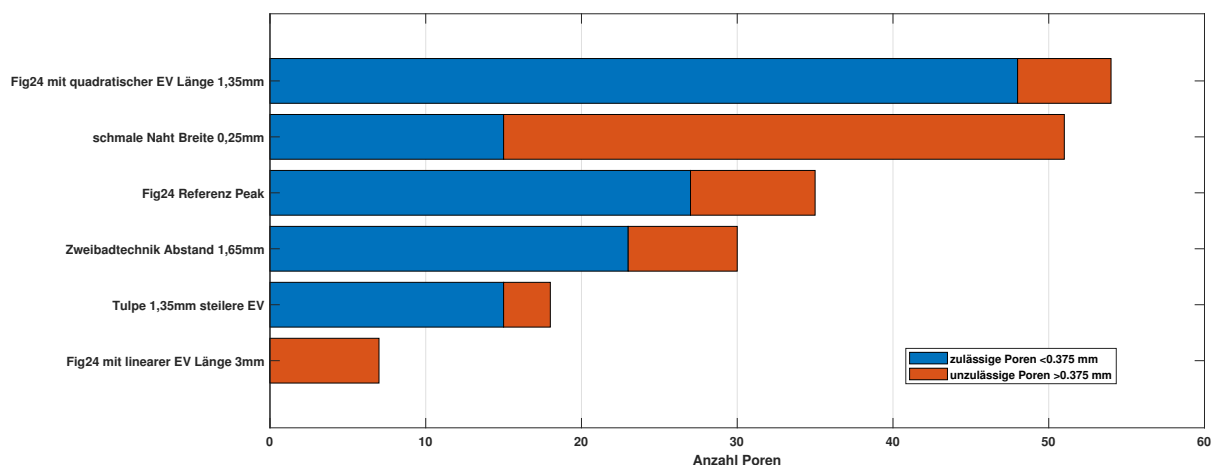
Versuch	Fehler gesamt	Poren in der Naht	Poren im Slope In	Poren im Slope Out	Poren > 0.375		
					Naht	Slope I.	Slope O.
B1.1.1	5	5	-	-	-	-	-
B1.1.2	16	4	7	5	1	4	3
B1.1.3	13	2	7	4	2	2	1
B1.1.4	14	7	4	3	1	2	-
B1.1.6	19	12	3	4	3	2	1
$\bar{x}$	13	6	5	4	2	3	2
$\sigma$	4.7	3.4	1.8	0.7	0.8	0.9	0.9
B2.2.3	6	5	1	-	1	-	-
B2.2.4	18	15	1	2	-	-	-
B2.2.5	18	11	3	4	1	-	1
B2.2.6	10	5	1	4	2	-	-
B2.2.8	21	18	-	3	2	-	1
$\bar{x}$	15	11	2	3	2	-	1
$\sigma$	5.6	5.2	0.9	0.8	0.5	-	0.0
B2.3.2	7	1	3	3	1	1	3
B2.3.3	2	2	-	-	2	-	-
B2.3.4	4	-	2	2	-	-	1
B2.3.7	6	3	3	-	3	2	-
B2.3.8	6	1	-	5	1	-	2
$\bar{x}$	5	2	3	3	2	2	2
$\sigma$	0.8	0.5	1.2	0.8	0.5	0.8	0.0
B3.1.4	11	7	-	4	-	-	1
B3.1.6	7	2	-	5	-	-	1
B3.1.7	7	4	1	2	2	-	-
B3.1.9	10	4	3	3	-	-	-
B3.1.10	4	1	1	2	1	-	-
$\bar{x}$	8	4	2	3	2	-	1
$\sigma$	2.5	2.1	0.9	1.2	0.5	-	0.0
B5.1.2	10	6	2	2	1	-	-
B5.1.3	5	2	1	2	1	-	1
B5.1.4	19	16	-	3	5	-	1
B5.1.6	5	5	-	-	-	-	-
B5.1.7	8	6	1	1	1	-	-
$\bar{x}$	9	7	1	2	2	-	1
$\sigma$	5.2	4.7	0.5	0.7	1.7	-	0.0
B5.3.2	10	5	2	3	5	-	-
B5.3.3	19	13	1	5	9	-	1
B5.3.4	16	10	1	5	6	-	1
B5.3.5	9	5	1	3	3	-	1
B5.3.6	23	18	2	3	13	-	-
$\bar{x}$	15	10	1	4	7	-	1
$\sigma$	5.3	5.0	0,5	1.0	3.5	-	0.0





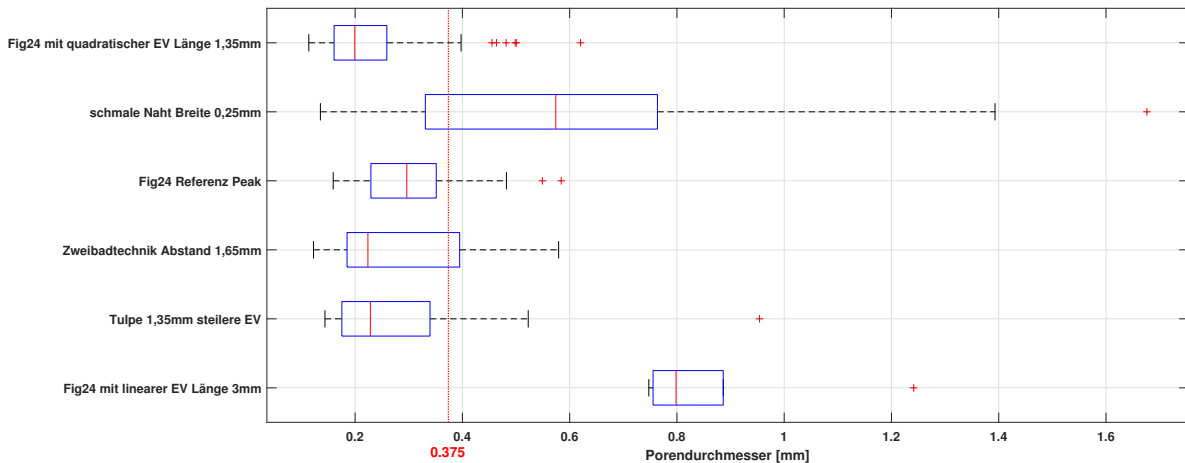
**Abbildung 6.18:** Aufteilung der Poren in Naht Slope In/Out

Es zeigt sich, dass die Fig 24 mit EV (Länge=3 mm) die wenigsten Poren aufweist (25 Poren), gefolgt von der Tulpe mit 39 Poren. Die Versuchsserie der schmalen Naht (Breite=0.25 mm) enthält die meisten Poren. Bei den Versuchsserien Fig 24 mit EV (Länge=3 mm), Zweibadtechnik (Abstand 1.65 mm) und Tulpe liegen mindestens 50% der Poren im Bereich des Slope In/Out. Tendenziell weist der Slope Out mehr Poren auf als der Slope In. Eine Ausnahme bildet hier die Versuchsserie Zweibadtechnik (Abstand 1.65 mm). Da Slope In/Out zweitrangig bei den Untersuchungen dieser Arbeit sind, betrachten wir in weiterer Folge nur mehr den Bereich der Naht (blauer Bereich des Balken in Abbildung 6.18). Dies führt uns zu Abbildung 6.19 in welcher die Poren anhand ihrer „Zulässigkeit“ bzw. „Unzulässigkeit“ beurteilt werden.



**Abbildung 6.19:** Anzahl unzulässiger Poren in Naht (ohne Slope In/Out)

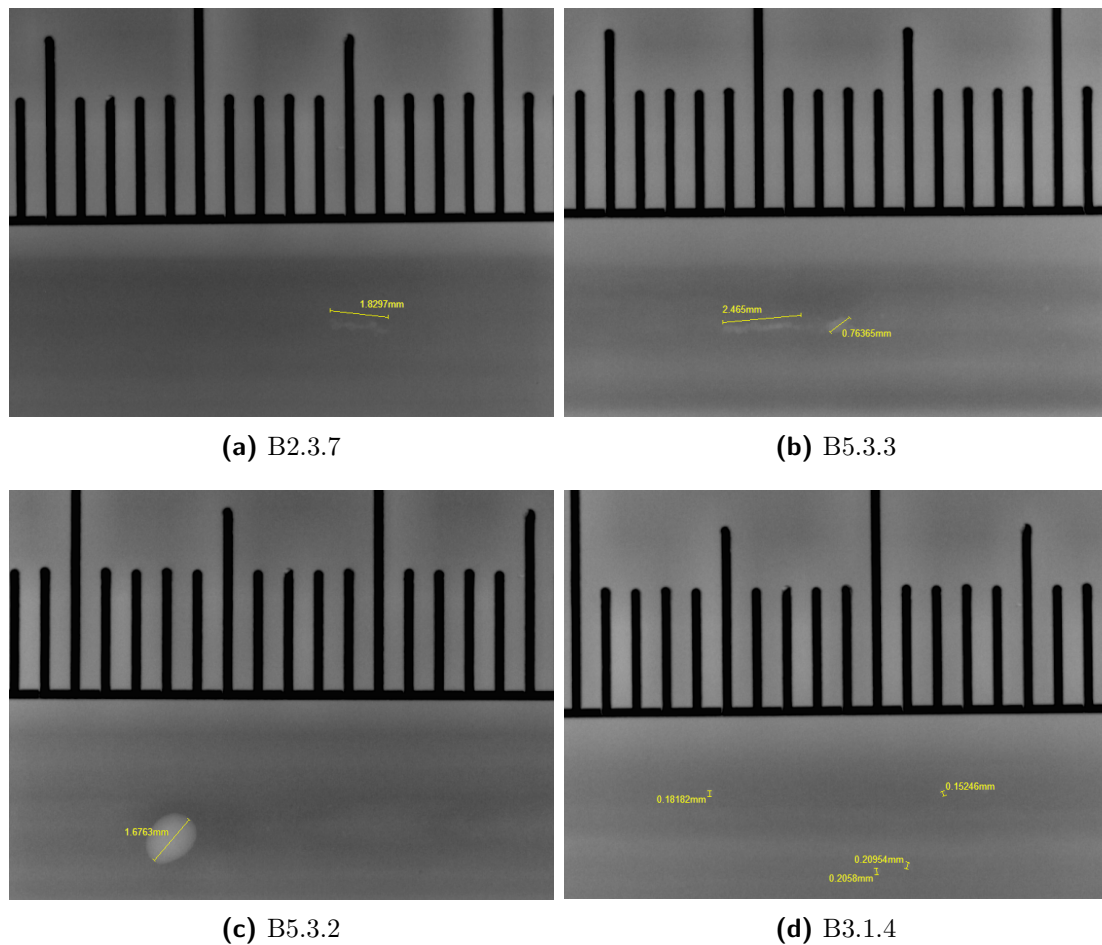
Hier sieht man, dass die schmale Naht (Breite=0.25 mm) die meisten unzulässigen Poren aufweist. Die Fig 24 mit EV (Länge=3 mm) besitzt zwar die wenigsten Poren, jedoch sind alle größer als zugelassen. Bei den restlichen Versuchsserien bilden die unzulässigen Poren einen geringen Anteil in der Naht, es ist jedoch keine der Versuchsserien frei von unzulässigen Poren. Um ein Gefühl für die Verteilung der Porengröße zu erhalten, wurde, wie in Abbildung 6.20 dargestellt, ein Boxplot für jede Versuchsserie erstellt.



**Abbildung 6.20:** Größenverteilung der Porendurchmesser, in der Naht (ohne Slope In/Out)

Den geringsten Mittelwert (0.2 mm) sowie die kleinste durchschnittliche Streuung um diesen besitzt die Versuchsserie der Zweibadtechnik ( $B2.2.x$ ), allerdings weist diese auch die meisten Ausreißer auf (rote Kreuze). Als Ausreißer sind jene Daten definiert, welche einen Wert  $> 1.5 \times$  Interquartilsabstand (länge der blauen Box) aufweisen. Den weitesten Ausreißer im Verhältnis zur Intervallbreite hat die Tulpe ( $B3.1.x$ ). So ist ihr oberes Maximum bei ca. 0.53 mm Porendurchmesser und der Ausreißer hat einen Wert von ca. 0.95 mm. Anhand der großen Streuung sieht man, dass die Versuchsserie der schmalen Naht ( $B=0.25$ ) die Versuchsserie mit der größten Porenvielfalt ist. Dies bestätigt, was die vorangegangenen Darstellung schon gezeigt haben. Ebenso wird bestätigt, dass die Fig 24 mit EV (Länge=3 mm) die wenigsten Poren mit der geringsten Intervallbreite aufweist, jedoch sind diese ausnahmslos unzulässig.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass zwei Versuche ( $B2.3.7$ ,  $B5.3.3$ ) je eine Schlauchpore aufwiesen (siehe Abbildung 6.21 a/b). Diese wurden für die Betrachtung der Porengröße nicht mit aufgenommen. Die Abbildung 6.21 zeigt des Weiteren noch zwei interessante Aufnahmen. Zum einen die größte detektierte Pore im Versuch  $B5.3.2$  (c), zum anderen eine Ansammlung an Poren, welche unter allen Versuchen herausstach ( $B3.1.4$ , d).



**Abbildung 6.21:** Besondere Poren und Schlauchporen

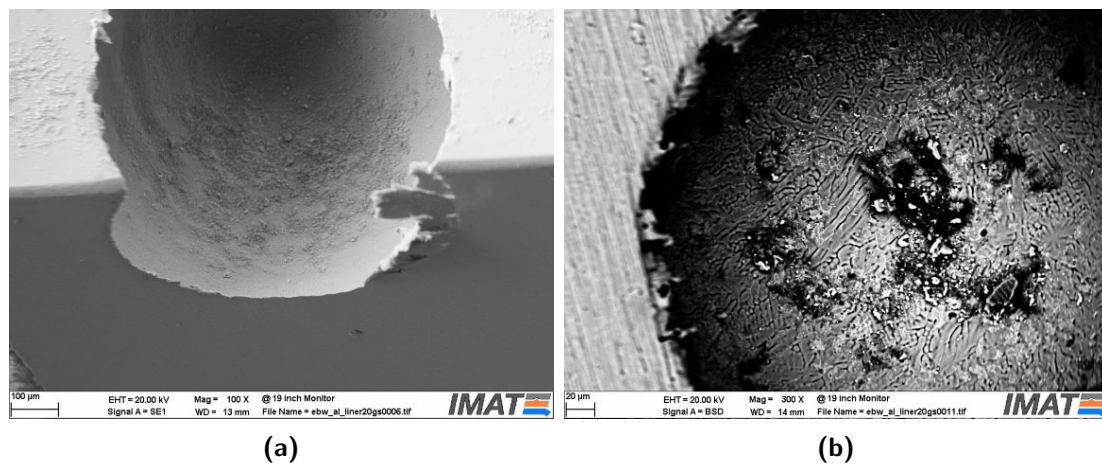
## 6.4 REM/EPMA

Es wurde eine REM-Untersuchung zur Analyse der Poren durchgeführt. Ebenfalls wurde versucht, die Elemente zu detektieren. Hierfür wurde ein Linescan mittels EDX durchgeführt, welcher aber keine aussagekräftigen Daten lieferte. Dies führte dazu, dass weitere Analysen mittels EPMA durchgeführt wurden. Ein Auszug bzw. die wichtigsten Ergebnisse dieser beiden Untersuchungen werden hier dargestellt.

### 6.4.1 REM

Nachfolgende Bilder stammen von einem Naht-Längsschliff des Ring04. Abbildung 6.22 (a) zeigt eine Pore, welche von zwei Seiten angeschliffen wurde. Dies geschah aus dem Grund, dass bei ersten Betrachtungen in der Pore ein Artefakt gesichtet wurde. Es war unklar, ob es sich um Rückstände der Präparation handelte, da das Artefakt mit dem Porenrand verbunden schien. Durch einen zweiten Schliff senkrecht zum ersten konnte aber bestätigt

werden, dass es sich um Präparationsrückstände handelte. Dies wurde bei nachfolgenden Präparationen berücksichtigt und so konnte die Poreninnenfläche begutachtet werden, wie in Abbildung 6.22 (b) ersichtlich.



**Abbildung 6.22:** REM-Aufnahmen: a) belegte Porenoberfläche, b) Oberflächenstruktur

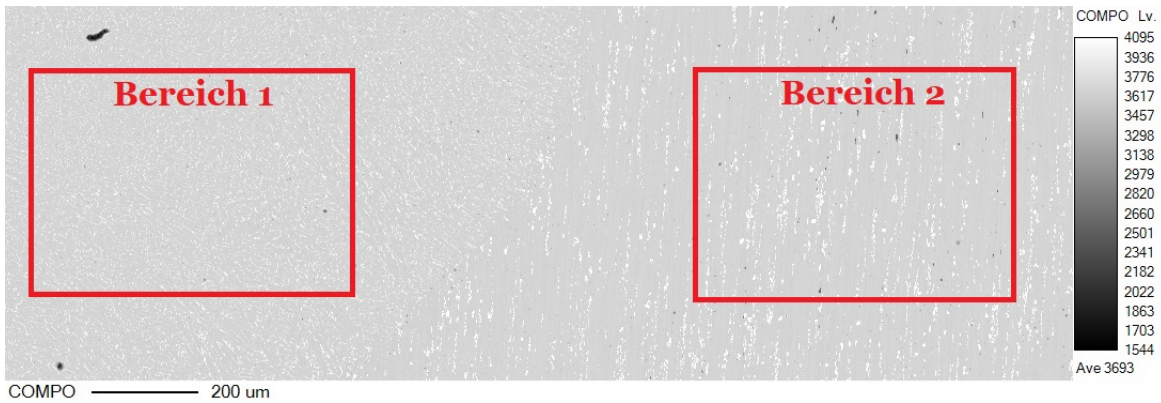
Am linken Bild erkennt man, dass die Porenoberfläche belegt ist. Bei der Belegung handelt es sich wahrscheinlich um Verunreinigungen der Probe. Im rechten Bild sieht man eine für Gasporen übliche strukturierte Oberfläche, welche aber ebenfalls leichte Verunreinigungen aufweist.

### 6.4.2 EPMA

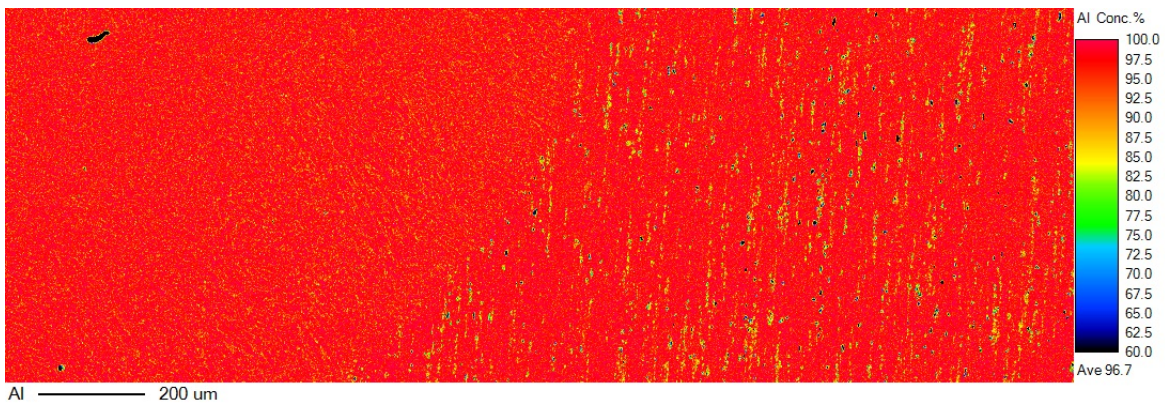
Bei der EPMA-Analyse geht es nun nicht mehr um die Untersuchung der Oberfläche, sondern auch darum, eine (semi-)qualitative Elemente-Verteilung zu ermitteln. Hierzu wurde zum einen ein Übergang von Naht zu Grundwerkstoff betrachtet und zum anderen die direkte Umgebung eines Porenrandes. Zuerst wird nun auf den Nahtübergang, wie in Abbildung 6.23 gezeigt, eingegangen. Das Bild (a) stellt ein Übersichtsbild des untersuchten Bereiches dar (rechts: Grundwerkstoff, links: Naht). Ebenfalls sind zwei Bereiche markiert, welche für separate Messungen verwendet werden, auf die zu einem späteren Zeitpunkt eingegangen wird. Wie in Kapitel 4.6 bereits erklärt, wird das Bild mittels rückgestreuten Elektronen (BSE) erstellt. Durch die WDS-Detektoren lassen sich nun auch die einzelnen Elemente erfassen. So zeigen die Bilder (b) und (c) die an der jeweiligen Stelle detektierte Elementen-Konzentration. In Bild (b) wurde hierfür Aluminium betrachtet, da es das Hauptelement der Legierung ist. Die Rötung des Bildes stellt hierbei den Anteil an Aluminium dar. Man sieht nun einige gelb/grünliche Bereiche, welche die anderen Legierungselemente repräsentieren. Man erkennt den Übergang der Fusionslinie an der



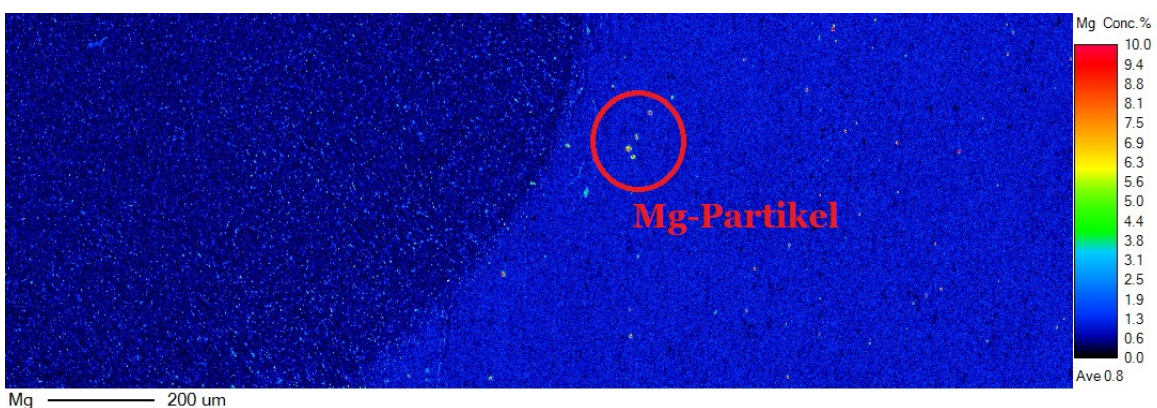
Struktur der Elemente-Verteilung. Diese ist im Grundwerkstoff durch den Walzenprozess länglich, in der Schweißnaht hingegen fein verteilt. Im Bild (c) wurde Magnesium detektiert. Dieses ist mit ca. 1% Anteil an der Legierung in Relation zu Al wenig vorhanden, weswegen das Bild blau dargestellt wird (je dunkler, desto weniger Magnesium). Es fallen jedoch einige hellere Punkte im Bild auf, welche die Teilchen der Aushärtung widerspiegeln.



(a) BSE-Bild



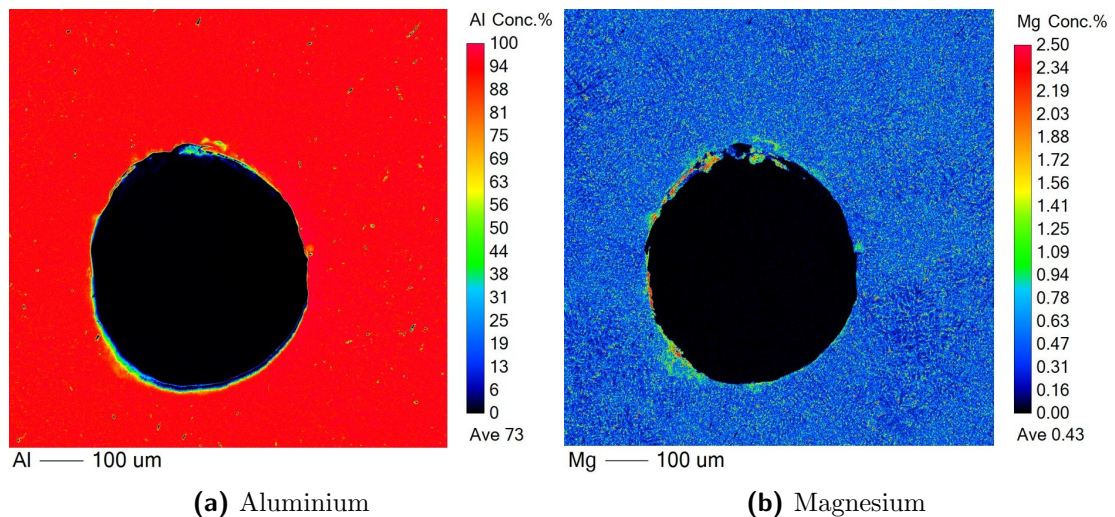
(b) Aluminium



(c) Magnesium

**Abbildung 6.23:** Verteilung Al, Mg über den Nahtübergang (1000×350 pixel, pixelgröße 2 µm)

Nun wird mit der gleichen Methodik in Abbildung 6.24 der Rand einer Pore betrachtet (hier wurde auf das zugehörige SE-Bild verzichtet). Es sind wieder die Rot- bzw. Blaufärbungen der Bilder zu sehen, welche Auskunft über die Elemente-Konzentration geben. In Bild (a) ist jedoch entlang des Porenrandes eine Abnahme des Aluminiums zu verzeichnen. Gegenteiliges ist in Bild (b) zu vermerken, hier nimmt das Magnesium zu, sprich besitzt der Porenrand eine Anreicherung an Magnesium. Es wurden die anderen in dieser Legierung enthaltenden Elemente ebenfalls detektiert und betrachtet, jedoch ist keine signifikante Anreicherung eines anderen Elementes zu verzeichnen.



**Abbildung 6.24:** Verteilung Al, Mg in Porennähe (1000×1000 pixel, pixelgröße 1 µm)

In den zuvor erwähnten Bereichen (Bereich 1 = Schweißnaht, Bereich 2 = Grundwerkstoff) wurde zudem eine qualitative Erhebung der Konzentration der Elemente durchgeführt. Zusätzlich wurden fünf „Grids“ gemessen, drei in der Naht und zwei im Grundwerkstoff. Diese Grids bestehen aus je neun Messpunkten, bei denen eine größere „Spotsize“ sowie „Count time“ (siehe Kapitel 4.6) verwendet wurden. Beide Messungen (Bereich-, Grid-Messung) sowie der Wert des Magnesiums aus dem Materialzeugnis sind in Tabelle 6.4 vermerkt.

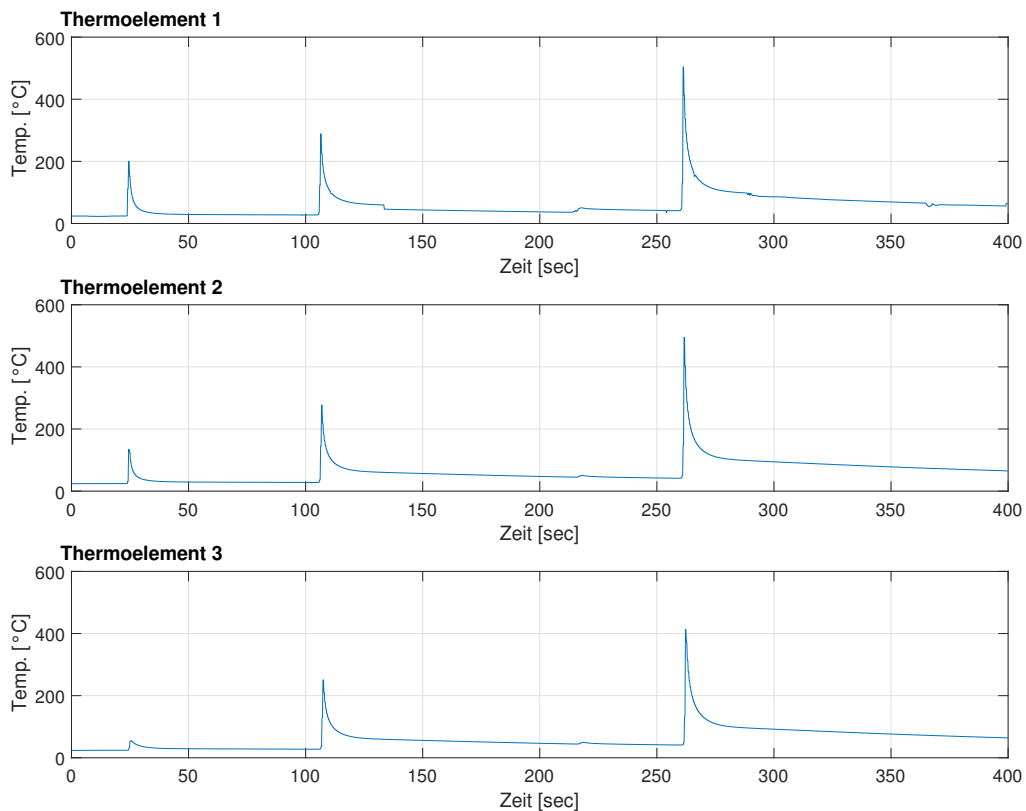
**Tabelle 6.4:** Messung von Magnesium EPMA-Analyse

	Bereichsmessung Mg [Massen%]	Grid-Messung Mg [Massen%]	Grid-Fehler [%]	Materialzeugnis Mg [Massen%]
Grundwerkstoff	0.93	0.85	2.77	0.93
Schweißnaht	0.56	0.49	3.83	-

Es ist eine deutliche Abnahme des Magnesiums in der Schweißnaht zu vermerken. Im Fall der Grid-Messung bis zu ca. 43%. (Materialzeugnis im Anhang)

## 6.5 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung stellt das letzte Ergebnis dar. In Abbildung 6.25 ist die Messung des Versuches *T.M.1* zu sehen. Jeder Verlauf entspricht der Messung eines der Thermoelemente, welche wie in Kapitel 4.2 positioniert wurden. Thermoelement 1 ist hierbei dasjenige, welches als erstes vom Schmelzbad passiert wird und ihm am nächsten liegt.

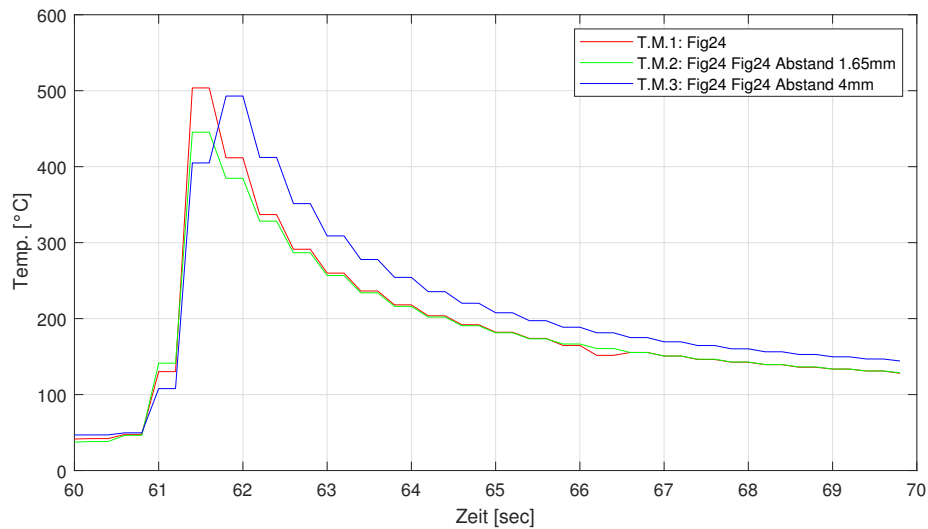


**Abbildung 6.25:** Temperaturkurve des Versuches *T.M.1*

Die ersten beiden Ausschläge der Kurve zeigen sowohl den Einzelhefter als auch die Heftnaht an. Der dritte Ausschlag stellt die eigentliche Schweißung dar. Es ist ersichtlich, dass das erste Thermoelement dem Schweißbad am nächsten war, da es eine Spitzentemperatur von ca.  $500^{\circ}\text{C}$  gemessen hat. Thermoelement 3, welches den größten Abstand zur Schweißnaht hatte, weist einen Wert von ca.  $400^{\circ}\text{C}$  auf.

Die Versuche *T.M.2* und *T.M.3* lieferten ähnliche Kurven, jedoch mit unterschiedlichen Temperaturspitzen. Um diese vergleichbar zu machen, wurden die Kurven aller drei Versuche übereinandergelegt. Hier wurde jedoch nur mehr das Thermoelement 1. betrachtet. Zudem wurde ein  $10\text{ sec}$  Intervall gewählt (siehe Abbildung 6.26). Die Messung der Versuche *T.M.1* und *T.M.2* zeigen so gut wie keine Abweichung voneinander, lediglich

die Spitzentemperatur ist unterschiedlich. *T.M.3* zeigt eine verlangsamte Abkühlung an, somit ist die Temperatur länger auf einem höheren Niveau. Betrachtet man die Zeit der Kurven (*T.M.1* und *T.M.3*) vom Überschreiten der  $400^{\circ}\text{C}$  Marke bis zum Unterschreiten derselbigen, so ist ein Unterschied von ca.  $0.5\text{ sec.}$  zu vernehmen. Die Stufung der Kurven ist der Messfrequenz der Thermoelemente von  $5\text{ Hz}$  geschuldet.



**Abbildung 6.26:** Vergleich der Temperaturmessungen anhand Thermoelement 1.



# 7 Diskussion der Ergebnisse

Nun da alle Ergebnisse dieser Arbeit dargelegt wurden, folgt ihre Betrachtung und Interpretation. Hierzu unterteilt sich dieses Kapitel in zwei Teile. Der erste Teil behandelt die Ergebnisse der visuellen Betrachtung sowie die Metallografie inklusive der REM- und EPMA-Analyse. Im zweiten Teil wird auf die Porosität der Schweißnaht eingegangen, welche die Röntgenergebnisse lieferten. Weiters werden die Ergebnisse aus den Temperaturmessungen betrachtet.

## 7.1 Allgemeine Ergebnisse

Betrachtet man die Nahtquerschnitte der Versuchsreihe A, erkennt man, dass die Nähte sehr breit im Vergleich zu einer charakteristischen EBW-Naht sind. Anders die Nähte der Vorversuche, diese weisen einen schlanken Querschnitt auf. Auch wenn man bedenkt, dass die Figuren der Reihe A verschiedene Formen aufweisen ist die Ähnlichkeit der Nähte sehr groß. Selbst die Figur der „Tulpe“, welche eine anderer Form besitzt, hat eine ähnliche Nahtbreite. Da die Breite der verwendeten Figuren (außer bei der „schmalen Naht“) ident ist, lässt sich somit darauf schließen, dass die Länge der Schweißfigur keinen Einfluss auf die Breite der Naht hat. Die minimalen Unterschiede innerhalb einer Serie sind auf die unterschiedlichen Strahlströme zurückzuführen.

Die aus der längeren Figur entstehende EV deutet auf Wärmeleitungsschweißen hin, was Keyholeeffekte zur Porenbildung eher in den Hintergrund setzt (wie von Chen beschrieben [25]). Ersichtlich war jedoch, dass die Durchlauffrequenz ( $f_F$ ) einen Einfluss auf den Nahteinfall bzw. Wurzeldurchhang hat. So waren diese bei niedrigen Frequenzen stärker ausgebildet als bei höheren. Dies zeigt die Betrachtung der Vorversuche und der von der *Peak Technology GmbH* geschweißten Nähte. Ein Grund hierfür könnte das stärkere „Rühren“ des Strahles im Schmelzbad darstellen. Die Schmelze ist somit mehr Strömungsbewegung ausgesetzt und das flüssige Material hat weniger Zeit herabzusacken. Auch das Auftreten von Materialverlagerungen an der Nahtoberfläche in den Vorversuchen stützt diese Theorie, da mit steigender Frequenz der Nahteinfall verschwand.

Die Ähnlichkeit des Gefüges der Reihe A ist- wie von Kuzicheva [11] beschrieben- der Form der Figur bzw. wie diese durchlaufen wird geschuldet. Im Fall der Fig24 bewegt sich der Strahl am Ende des Schmelzbades, von der Mitte der Figur zu den Rändern. Dies hat Einfluss auf die Erstarrungsform des Gefüges, wie es auch Wang in seinem Artikel [14]

beschreibt. So ist es logisch, dass sich das Gefüge der Versuche von Reihe A sehr stark gleicht, da alle Versuche die Fig24 beinhalten (auch das hintere Ende der Tulpe).

Eine weitere Gefüge-Untersuchung stellte die Elementverteilung mittels EPMA dar. Hier konnte ein Verlust von Magnesium in der Schweißnaht detektiert werden, was sich mit dem Artikel von Zhan [28] deckt. Auch wurde festgestellt, dass es am Porenrand eine Magnesium-Anreicherung gibt. Zusammen mit der Oberflächenstruktur an der Poreninnenseite lässt sich daraus schließen, dass das ausgasende Magnesium die treibende Kraft der Porenbildung darstellt.

## 7.2 Porosität der Schweißnaht

Die beiden Versuchsreihen zeigten, dass es nicht gelungen ist, porenfrei zu schweißen.

Doch zeigen die Ergebnisse deutlich, dass die Schweißfigur einen Einfluss auf die Porosität bzw. die Porengröße hat. Die „Zweibadtechnik“ lieferte zwar nicht den erhofften Erfolg, doch steckt sicher viel Potential in ihr. Der Ansatz, das Schweißbad so zu gestalten, dass ein Ausgasen der Blasen verbessert wird, scheint möglich zu sein. Es zeigte sich, dass die Versuche der „Fig24 mit EV“ Möglichkeiten bieten, die Porenanzahl zu verringern. Jedoch ist es nicht trivial, welche Länge der Figur geschweißt wird. So hat diese und auch womöglich die Art der Energieverteilung (linear, quadratisch), Einfluss auf die Porenanzahl. Die Serie *B2.2.x* hatte zwar die geringste Porenanzahl, jedoch stieg die Porengröße markant an. Dies deutet auf ein kumulieren der Gasblasen während des Aufstieg hin.

Der Ansatz, die Energieverteilung in Richtung Schweißnahtmitte zu verlagern, stellt ebenfalls einen guten Lösungsweg dar. So schnitt die „Tulpe“ sowohl bei Anzahl als auch Größe der Poren sehr gut ab. Die derzeit angewandte Fig24 der *Peak Technology GmbH* lag im Mittelfeld der Versuche. Der Ansatz der „Schmalen Naht“ zeigte keinen Erfolg, da die Poren durch das kleinere Schmelzbad bzw. der schnelleren Erstarrung weniger Zeit zum ausgasen hatten. Die „negative“ Referenz (*B5.3.x*) zeigte deutlich, dass sich auch schlechte Ergebnisse reproduzieren lassen. Auch Nahtanfang bzw. -ende wiesen äußerst schlechte Ergebnisse auf, so muss diesen Bereichen mehr Bedeutung geschenkt werden.

Die Konfiguration der Energieverteilung bzw. der Form der Figur und deren Abstand konnten leider nur in sehr geringem Maße untersucht werden. Doch zeigten die Temperaturmessung und der Vergleich der verschiedenen Abstände zwischen den Schmelzbädern, dass eine verlangsamte Abkühlung erreicht wird. Dies würde das Ausgasen der Blasen begünstigen. Um solche Konfigurationen logisch zu wählen, fehlte in dieser Arbeit leider ein ausreichend genaues Simulationsmodell (siehe Anhang ii-iv).

# 8 Conclusio

Nachstehend folgen eine Zusammenfassung dieser Arbeit, welche die wichtigsten Aspekte abdeckt, sowie ein Ausblick, welcher mögliche Folgethemen dieser Arbeit präsentiert.

## 8.1 Zusammenfassung

Es wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass die Herstellung einer optisch sauberen Naht im Dünoblech Bereich mittels Elektronenstrahlschweißen möglich ist. Die verwendete Strahl-Knick spielte hierbei sicher eine wesentliche Rolle.

Das Schweißen mit verschiedenen Strahlfiguren und deren Erzeugung wurde ausführlichst behandelt. Der Umgang mit diesen Figuren und der Prozess der Parameterfindung finden sich ebenso in dieser Arbeit, wie auch die hierfür verwendeten Methodiken. Die aus diesen Analysen entstandenen Überlegungen wurden erläutert und getroffene Entscheidungen begründet. Anschließende Auswerteverfahren und Messmethodiken sind erklärt worden und die daraus resultierenden Ergebnisse wurden besprochen und thematisiert. Es wurden interessante Erkenntnisse gewonnen und der Einfluss der Strahlfigur auf die Porenbildung gezeigt. Auch die Porenentstehung an sich war Teil dieser Arbeit. So wurde zumindest das Ausgasen von Magnesium als Entstehungsmechanismus nachgewiesen.

Das Schweißen porenfreier Nähte stellt sich aufgrund des ausgasendem Magnesium als sehr schwierig dar, da ein vollkommener Magnesiumverlust in der Naht nicht zu erreichen bzw. nicht Zielführend ist. Es besteht, wie gezeigt, die Möglichkeit über eine kontrollierte Schmelzbadeführung den Prozess zu steuern. Ob jedoch die geforderte Prozesssicherheit erreicht werden kann ist fraglich. Für dies müssen weitere Untersuchungen mit einem größeren Probenaufwand durchgeführt werden. Diese Arbeit stellt hierbei eine gute Ausgangssituation dar.

## 8.2 Ausblick

Wie mehrfach in dieser Arbeit erwähnt, ist das Feld der möglichen Strahlmanipulation sehr groß. Da diese Arbeit nur einen kleinen Teil dieses Feldes abdeckt, stehen weitere Untersuchungen in einer Fülle an Möglichkeiten zur Verfügung.

Um Mechanismen der Porenbildung im Schmelzbad besser zu verstehen, sind erdenklich umfassendere Erhebungen im Bereich der Erstarrung des Schmelzbades zu tätigen. Es liegt auch der Gedanke nahe, den Arbeitsruck der Kammer zu erhöhen um die Verdampfungstemperatur des Mg zu erhöhen. Auch eine Vermeidung des Ausgasens mittels zugeführten Legierungselementen durch Schweißzusatz wäre eventuell möglich.

Da die Abmessung der Figuren wesentlichen Einfluss auf das Schmelzbad haben, wäre es sinnvoll, verschiedene Größen einer Figur zu untersuchen. In weiterer Folge könnte auf dieser Arbeit aufgebaut werden und eine optimierte Figur (z.B. mit abnehmender Energie in verschiedenen Konfigurationen) getestet werden. Auch ist die Frage der Reproduzierbarkeit zu klären.

Ebenso, könnte der bereits hier erdachte Versuch der Mehrbadtechnik umgesetzt werden, um mit gezielter Einbringung von Druckspannung zu arbeiten. Wie diese Arbeit gezeigt hat muss ebenso auf das Problem des Naht-anfangs bzw. -ende eingegangen werden. So ist zukünftig auch eine detaillierte Modellierung und Analyse des Slope In/Out denkbar.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Festigkeit verschiedener Al-Legierungen . . . . .	4
2.2	Wärmebehandlung von aushärtbaren Al-Legierungen . . . . .	5
2.3	Drucktank . . . . .	6
2.4	Versuchsringe . . . . .	7
2.5	Kantenanarbeitung . . . . .	7
2.6	EBW-Anlage . . . . .	9
2.7	Tiefschweißeffekt . . . . .	10
2.8	Strahlqualität im Vakuum . . . . .	10
2.9	Mögliche Strahlfiguren . . . . .	11
2.10	„Lissajoussche Figuren“ . . . . .	13
2.11	Figur: „Fig24“ . . . . .	13
2.12	Beispiel für Mehrbadtechnik . . . . .	14
2.13	Mehrbadtechnik zur Vermeidung von Heißbrissen . . . . .	15
2.14	Vorwärmen mittels zweiten Schmelzbades . . . . .	15
2.15	Figuren der Vorversuche . . . . .	16
2.16	Schmelzbadströmungen . . . . .	19
2.17	Verdampfungstemperatur Magnesium . . . . .	19
2.18	Pore in Schweißnaht . . . . .	20
2.19	Porenposition am Ringumfang . . . . .	21
2.20	Porenverteilung über Nahtdicke . . . . .	22
3.1	Porenentstehung . . . . .	25
3.2	Blasenaufstieg durch Auftrieb . . . . .	26
3.3	Blasenaufstiegsgeschwindigkeit . . . . .	27
3.4	Fig24 $f_F = 1 \text{ Hz}$ , $v = 0 \text{ mm/s}$ . . . . .	29
3.5	Fig24 $f_F = 1 \text{ Hz}$ , $v = 2 \text{ mm/s}$ . . . . .	29
3.6	Fig24 $f_F = 100 \text{ Hz}$ , $v = 20 \text{ mm/s}$ . . . . .	30
3.7	Raster zur Bestimmung der EV . . . . .	30
3.8	Energieverteilung Fig24 . . . . .	31
3.9	Energieverteilung quer zur Naht Fig24 . . . . .	31
3.10	Energieverteilung der Vorversuche quer zur Naht . . . . .	32
3.11	Energieverteilung der Vorversuche . . . . .	33
4.1	Elektronenschweißanlage IMAT . . . . .	35
4.2	Strahlknickung . . . . .	36

4.3	Spannvorrichtung . . . . .	37
4.4	Position der Thermoelemente . . . . .	37
4.5	Aufbau der Temperaturmessung . . . . .	38
4.6	Metallurgischer Schliff . . . . .	39
4.7	Probenpräparation mit Poren . . . . .	41
5.1	Fig24 aus Codebeispiel . . . . .	44
5.2	Ansatz der Zweibadtechnik . . . . .	45
5.3	Fig24 mit linear abnehmender Energie . . . . .	46
5.4	Fig24 mit quadratisch abnehmender Energie . . . . .	47
5.5	Figur „Tulpe“ . . . . .	47
5.6	Energieverteilung der Figur „Tulpe“ . . . . .	48
5.7	Energieverlauf der Tulpe quer zur Naht „steiler“ & „flacher“ . . . . .	48
5.8	Heftschweißung . . . . .	49
5.9	Beispiel eines Vorversuch (V1.1) . . . . .	51
5.10	Versuch der Reihe A (A1.1) . . . . .	54
5.11	Testschweißungen Versuchsreihe A . . . . .	56
5.12	Slope In Vergleich . . . . .	64
6.1	Nahtoberfläche & Endkraterriss bei Vorversuchen . . . . .	66
6.2	Sichtbare Schweißnahtfehler . . . . .	66
6.3	Schliffe der Vorversuche SW . . . . .	67
6.4	Poren in den Querschliffen der Vorversuche . . . . .	68
6.5	Beispiel des Gefüges anhand V1.2 . . . . .	69
6.6	Schliffe der Vorversuche in polarisiertem Licht . . . . .	70
6.7	Schliffe der Versuchsreihe A: SW . . . . .	71
6.8	Versuch A5.4 mit ausgasender Pore . . . . .	71
6.9	Schliffe der Versuchsreihe A in polarisiertem Licht . . . . .	72
6.10	Gefüge des Versuchs A5.1 . . . . .	72
6.11	Gegenüberstellung der Referenznaht und des Ring04 . . . . .	73
6.12	Härtemessung über Schweißnaht . . . . .	74
6.13	Beispiel einer Röntgenaufnahme . . . . .	75
6.14	Porenauswertung der Vorversuche . . . . .	75
6.15	Porenauswertung der Versuchsreihe A: Naht . . . . .	77
6.16	Porenauswertung der Versuchsreihe A: Bereich des Slope In . . . . .	78
6.17	Porenauswertung der Versuchsreihe B . . . . .	79
6.18	Position der Poren Versuchsreihe B . . . . .	81
6.19	Anzahl unzulässiger Poren in Naht . . . . .	81
6.20	Größenverteilung der Porendurchmesser . . . . .	82
6.21	Besondere Poren und Schlauchporen . . . . .	83

6.22	REM-Aufnahmen von Poren . . . . .	84
6.23	Verteilung der Elemente Al, Mg über Nahtübergang . . . . .	85
6.24	Verteilung der Elemente Al, Mg in Porennähe . . . . .	86
6.25	Temperaturkurve des Versuches <i>T.M.1</i> . . . . .	87
6.26	Vergleich von <i>T.M.1</i> , <i>T.M.2</i> , <i>T.M.3</i> . . . . .	88
1	Simulationsmodell . . . . .	ii
2	Vergleich der Fusionslinien . . . . .	iii
3	Vergleich der gemessenen- mit der simulierten Temperaturkurve . . . . .	iv

# Tabellenverzeichnis

2.1	Bereich der chemischen Zusammensetzung der Legierung AL6082 [4] . . . . .	4
2.2	Eindringtiefe der Elektronen in verschiedene metallische Werkstoffe [8] . . . . .	10
2.3	Dampftemperaturen der relevanten Elemente bei $5e-4$ mbar [27] . . . . .	20
4.1	Werte der verwendeten Barker-Ätzung . . . . .	39
4.2	Parameter der EPMA-Analyse . . . . .	42
5.1	Versuchsmatrix Vorversuche . . . . .	52
5.2	Versuchsmatrix der Versuchsreihe A . . . . .	53
5.3	Versuchsserie A: Zweibadtechnik . . . . .	57
5.4	Versuchsserie A: Fig24 mit EV . . . . .	57
5.5	Versuchsserie A: Tulpe . . . . .	58
5.6	Versuchsserie A: Schmale Naht . . . . .	58
5.7	Versuchsmatrix der Versuchsreihe B . . . . .	59
5.8	Versuchsserie B: Zweibadtechnik . . . . .	61
5.9	Versuchsserie B: Fig24 mit EV (EV=quadratisch, $L = 1.35\text{ mm}$ ) . . . . .	61
5.10	Versuchsserie B: Fig24 mit EV (EV=linear $L = 3\text{ mm}$ ) . . . . .	62
5.11	Versuchsserie B: Tulpe . . . . .	62
5.12	Versuchsserie B: Schmale Naht „Referenz“ . . . . .	63
5.13	Versuchsserie B: Schmale Naht $B = 0.25\text{ mm}$ . . . . .	63
5.14	Temperaturmessung Parameter: $U_S = 80\text{ kV}$ , $v = 20\text{ mm/s}$ , $f_F = 500\text{ Hz}$ . . . . .	64
6.1	Auswertung der Röntgenergebnisse: Versuchsreihe A . . . . .	76
6.2	Entscheidungsmatrix für Versuchsreihe B . . . . .	78
6.3	Auswertung der Röntgenergebnisse: Versuchsreihe B . . . . .	80
6.4	Messung von Magnesium EPMA-Analyse . . . . .	86



# Literaturverzeichnis

- [1] Günter Schulze. *Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe - nichteisenmetallische Werkstoffe*. 4., neu bearb. Aufl. VDI-Buch. OCLC: 552261541. Berlin: Springer. 614 S. ISBN: 978-3-642-03182-3 978-3-642-03183-0.
- [2] Friedrich Ostermann. *Anwendungstechnologie Aluminium*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-43806-0 978-3-662-43807-7. DOI: 10.1007/978-3-662-43807-7. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-43807-7>.
- [3] Aluminium-Zentrale. *Merkblatt W7: Wärmebehandlungen von Aluminiumlegierungen*.
- [4] Granta EduPack2020. *AL6082*.
- [5] Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze, Hrsg. *Werkstoffkunde*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-642-17716-3 978-3-642-17717-0. DOI: 10.1007/978-3-642-17717-0. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-17717-0>.
- [6] Ulrich Dilthey. *Schweiß- und Schneidtechnologien*. 3., bearb. Aufl. Schweißtechnische Fertigungsverfahren Ulrich Dilthey ; Bd. 1. OCLC: 179886294. Berlin: Springer. 327 S. ISBN: 978-3-540-21673-5.
- [7] Volkmar Schuler und Jürgen Twrdek. *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-24265-7 978-3-658-24266-4.
- [8] V. Adam. *Elektronenstrahlschweißen: Grundlagen einer faszinierenden Technik*. pro-beam.
- [9] Helmut Schultz. *Elektronenstrahlschweißen*. Fachbuchreihe Schweißtechnik 93. OCLC: 75092669. Düsseldorf: DVS-Verl. 183 S. ISBN: 978-3-87155-111-6.
- [10] Klaus-Rainer Schulze. *Elektronenstrahltechnologien*. 1. Auflage. Bd. Band 1. Wissen Kompakt. DVS Media. 80 S. ISBN: 978-3-87155-225-0.
- [11] Alina Kuzicheva. *Influence of beam figures on bead on plate welding of aluminium*. Projektbericht. Graz.
- [12] Genyu Chen u. a. "Research on the infinity-shaped laser scanning welding process for aluminum alloy". In: *Optics & Laser Technology* 115 (), S. 32–41. ISSN: 00303992. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.01.046. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030399218313410>.

- [13] Tugce S. Kabasakaloglu und Metehan Erdogan. “Characterisation of figure-eight shaped oscillation laser welding behaviour of 5083 aluminium alloy”. In: *Science and Technology of Welding and Joining* 25.7 (), S. 609–616. ISSN: 1362-1718, 1743-2936. DOI: 10.1080/13621718.2020.1794652. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13621718.2020.1794652>.
- [14] Lei Wang u. a. “Effect of beam oscillating pattern on weld characterization of laser welding of AA6061-T6 aluminum alloy”. In: *Materials & Design* 108 (), S. 707–717. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.07.053. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516309534>.
- [15] Soumitra Kumar Dinda u. a. “Effect of beam oscillation on porosity and intermetallics of electron beam welded DP600-steel to Al 5754-alloy”. In: *Journal of Materials Processing Technology* 265 (), S. 191–200. ISSN: 09240136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.10.026. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013618304680>.
- [16] Alina Kuzicheva und Matthias Moschinger. *Comparison of LBW and EBW using the material 6082-T6*.
- [17] Klaus Lüders und Robert O. Pohl, Hrsg. *Pohls Einführung in die Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-48662-7 978-3-662-48663-4. DOI: 10.1007/978-3-662-48663-4. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-48663-4>.
- [18] *Lissajous-Figur – Wikipedia*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lissajous-Figur>.
- [19] Mingshen Li u. a. “Controlling welding residual stress and distortion by a hybrid technology of transient thermal tensioning and trailing intensive cooling”. In: *Science and Technology of Welding and Joining* 24.6 (), S. 527–537. ISSN: 1362-1718, 1743-2936. DOI: 10.1080/13621718.2018.1564473. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13621718.2018.1564473>.
- [20] Gerd Eibisberger. *Elektronenstrahlschweißen von duktilem Gusseisen GGG-40*. Auftragsarbeit. Graz: IMAT TU-Graz, S. 57.
- [21] *Vivianisches Fenster – Wikipedia*. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Vivianisches\\_Fenster](https://de.wikipedia.org/wiki/Vivianisches_Fenster).
- [22] *ÖNORM EN ISO 6520-1*.
- [23] *ÖNORM EN ISO 13919-2*.
- [24] *ECSS-Q-ST-70-39C*.

- [25] Guoqing Chen u. a. “Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding”. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 138 (), S. 879–888. ISSN: 00179310. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.112. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931018360332>.
- [26] Hidetoshi Fujii u. a. “Bubble formation in aluminium alloy during electron beam welding”. In: *Journal of Materials Processing Technology* 155-156 (), S. 1252–1255. ISSN: 09240136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.141. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013604004972>.
- [27] Michael Schmid. *Vapor Pressure Calculator [IAP/TU Wien]*. Vapor Pressure Calculator. URL: [https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/vapor\\_pressure](https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/vapor_pressure).
- [28] Xiaohong Zhan u. a. “Microstructure and magnesium burning loss behavior of AA6061 electron beam welding joints”. In: *Materials & Design* 99 (), S. 449–458. ISSN: 02641275. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.058. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264127516303331>.
- [29] Marc J Assael u. a. “Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Aluminum and Liquid Iron”. In: *J. Phys. Chem. Ref. Data* 35.1 (), S. 17.

# Materialzeugnis Ring04



BIKAR-METALLE GmbH  
 Industriestrasse 3-17  
 D-57319 Bad Berleburg  
 Telefon: +49-2751-9551 111  
 Telefax: +49-2751-9551 555  
 E-Mail: info@bikar.com  
 Internet: http://www.bikar.com  
 Germany

Abschrift / Werkzeugeugnis / Quality Certificate  
 EN 10204 - 3.1

Peak Technology GmbH  
 Technologiepark Straße 6  
 A - 4615 Holzhausen

BM-ID-Nr.: BM-ID-No.:	128182/604848
Kunden-Bestell-Nr.: Customer-Order-No.:	BE-191748
Bestell-Datum: Order-date:	13.05.2019
Lieferschein-Nr.: Delivery-No.:	1408361/1

Werkstoff Alloy	Materialform Product	Abmessung Dimension
Aluminium Al Mg Si1 EN AW-6082	Walzplatte	600x600x40 mm

Normen Standards/norms				Lieferzustand Temper
EN485-2	EN515	EN573-3		T651

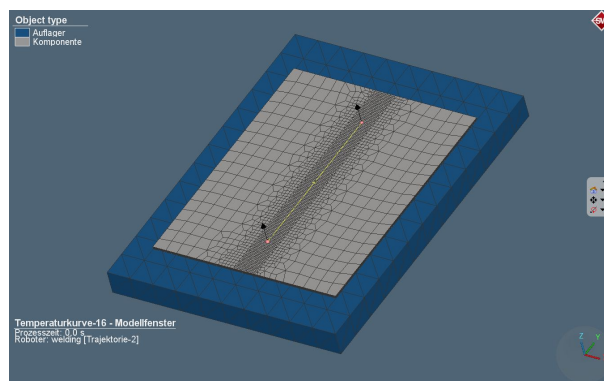
Mechanische Eigenschaften / mechanical properties						
WE-Nr. ID-No.	Charge Batch	Gieß-Nr. Cast-No.	Zugfestigkeit Tensile strength Rm N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze Yield limit Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung Elongation A50 %	Härte Hardness HB
2452CB	70214925	S28126137	314	287	11.5	

Chemische Eigenschaften / chemical properties in %									
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga
rem	1.08	0.48	0.1	0.7	0.93	0.16	0.015	0.11	0.011
V	Ti	Pb	Sn	Bi	Zr	Ag	Li	B	andere/others
0.018	0.02								/

Dieses Schreiben wurde maschinell erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.  
 This letter is done automatically and is valid without signature.

# Simulation

Es wurde angedacht, parallel zu den Versuchen eine Simulation der Schweißung zu erstellen. Dieses Modell sollte genutzt werden, um die Abstände der Schmelzbäder bei der Zwei- bzw. Mehrbadtechnik zu simulieren, um somit vernünftige Startparameter zu finden. Hierzu wurde die Software *Simufact* verwendet, welche ein umfangreiches Spektrum an verschiedenen Schweißprozessen, Materialien, Modellierungstools und Parameter zur Erstellung eines Modells bietet. Ebenso können über das Definieren von Einspannungen und Auflagern thermomechanische Simulationen berücksichtigt werden, was im Zuge der Mehrbadtechnik von Interesse wäre. Es wurde ein vereinfachtes Modell der Schweißnahtgeometrie erstellt, da die Stoßgeometrie in dieser Simulation nicht von Bedeutung ist (Beat on Plate). So wurde eine Platte mit den Abmessungen  $L = 150\text{ mm}$   $B = 120\text{ mm}$   $H = 1.5\text{ mm}$  modelliert, was der Versuchsanordnung entspricht, jedoch um 50% verkürzt.

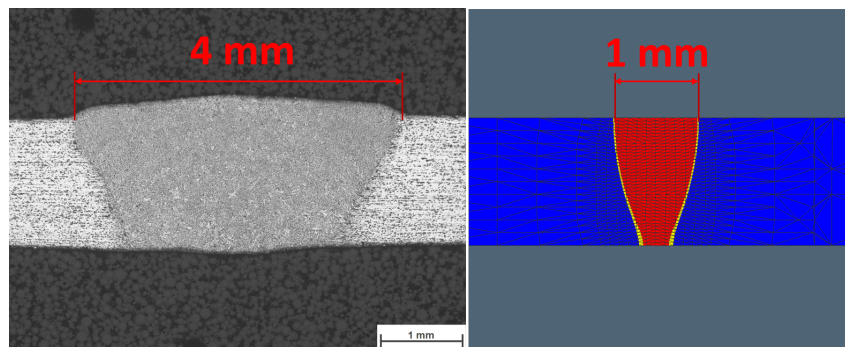


**Abbildung 1:** Modellgeometrie für Simulation mit Schweißnahttrajektorie

Der Vorteil dieser Vereinfachung ist eine kürzere Naht und somit kürzere Rechenzeiten der Simulation. Zudem wurde eine Platte aus austenitischem Stahl als Auflage definiert, um den Wärmefluss über die Schweißplatte an die Umgebung abzubilden. Auf Spannelemente wurde in dieser ersten Konfiguration verzichtet, da eine rein thermische Simulation durchgeführt wurde. Nachdem alle Rahmenbedingungen modelliert wurden, konnte mit der Schweißnahtmodellierung begonnen werden. Hierzu wurde ein „Roboter“ definiert, welcher die Schweißnahttrajektorie abfährt, in diesem Fall einer 100 mm langen, linearen Schweißnaht. Bei der Erstellung der Wärmequelle, was den Kern dieser Simulation darstellt, wurde wie von Simufact empfohlen vorgegangen:

- 1) Definieren der Strahlparameter:  $I_s = 10.9 \text{ mA}$   $U_s = 80 \text{ kV}$  (Werte von Versuch A5.1).
- 2) Definieren einer Wärmequelle: hier wurde die Goldak-Wärmequelle gewählt.
- 3) Wärmequelle durch verschiedenen Parameter (Länge, Breite, Verteilungsfaktor...) so beeinflussen, das Form der Fusionslinie der Realität entspricht (zB. durch Schliffbild).

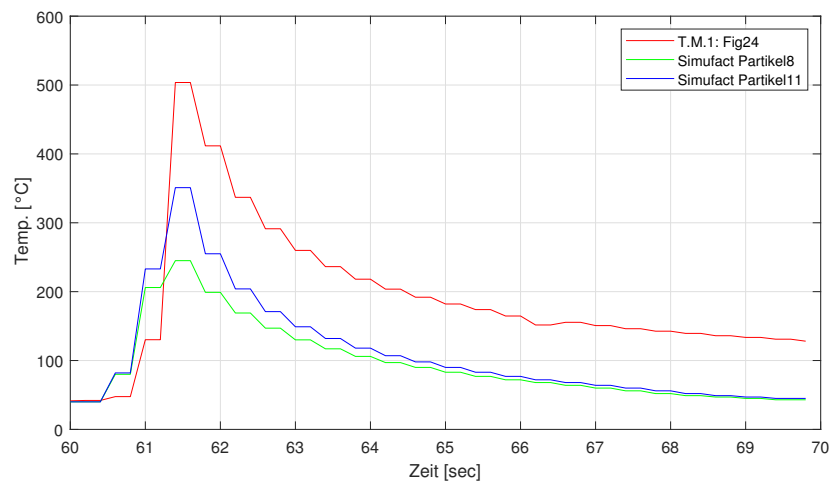
Es stehen zwei Modelle für Wärmequellen zur Verfügung, zum einen eine konische, welche normalerweise für EBW- und Laserschweißen verwendet wird und zum anderen die Goldak-Wärmequelle, welche in den meisten anderen Schweißprozessen Anwendung findet. Es wurden einige Testsimulationen, mit beiden Wärmequellen durchgeführt, da die Form des Nahtquerschnittes auf Wärmeleitungsschweißen und nicht auf ein Keyhole hindeutet. Es zeigte sich, dass die Goldakwärmequelle die Geeignetere der beiden ist. Durch diese konnte die Figurenlänge besser abgebildet werden, jedoch entsprechen beiden Modelle nicht dem Realbild der Schweißfiguren. Die Fusionslinien und die Größe der Schweißnaht weichen deutlich voneinander ab. So sieht man in Abbildung 2 einen deutlichen Unterschied in der Breite der Naht, auch das Verbreitern der Goldakwärmequelle änderte nichts an der Breite der simulierten Naht.



**Abbildung 2:** Vergleich der Fusionslinien: links: reale Naht, rechts Simulation

Durch Rücksprache mit dem Support von *Simufact* wurde in Erfahrung gebracht, dass es möglich ist, eine Wärmequelle selbstständig in das Programm zu implementieren, jedoch stand der Aufwand nicht in Relation zu dieser Arbeit. Da diese Simulation parallel zu den Versuchen stattfand, spielte auch der Zeitaspekt eine wichtige Rolle, welcher ein Detaillieren der Simulation nicht mehr sinnvoll machte. Nichtsdestotrotz wurde mit dieser Wärmequelle eine Simulation durchgeführt, welche Temperaturzyklen wiedergibt, die anschließend mit Messungen an der EBW verglichen wurden.

Abbildung 3 zeigt die Kurve des Thermoelement 1, des Versuches *T.M.1*, im Vergleich zu den Daten, welche mithilfe der Simulation generiert wurden. Partikel 8 entspricht der Position, welche das Thermoelement im realen Versuch einnahm ( $2.8\text{ mm}$  von Schweißnahtmitte entfernt). Das zweite Partikel (11) wurde näher zur Schweißnaht gerückt ( $1.6\text{ mm}$  von Schweißnahtmitte entfernt), um den gleichen Abstand von der Fusionslinie zu haben wie beim Versuch *T.M.1*. Die Kurven weisen einen ähnlichen Verlauf, jedoch nicht die gleichen Spitzentemperaturen, auf. Selbst das Partikel 11 ist  $150^\circ\text{C}$  unter dem gemessenen Wert.



**Abbildung 3:** Vergleich der gemessenen- mit der simulierten Temperaturkurve