Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

# Aufbau einer Faserlaser-Schweißanlage und anschließende Testschweißungen von Magnesium

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

a.o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Liedl
E 311
Institut für Umformtechnik und Hochleistungslasertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

**von**

**Michael Grill**
**Matr.Nr. 0025065**
**Loosgasse 17/19**
**1230 Wien**

Wien, am 29.11.2011

.....
Unterschrift

*Danksagen möchte ich*

*Herrn a.o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn. Gerhard Liedl für die fachliche Betreuung meiner Arbeit,*
*sowie den Mitarbeitern des Instituts für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie Frau Edith Asiemo, Herrn Ing. Christian Zaruba und Herrn Dipl.-Ing. Andreas Kottar für ihren Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit.*
*Weiters meinen lieben Freunden und Kollegen Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Bilik und Dipl.-Ing. Dr.techn. Hesamedin Ostad-A.-Ghorabi die mir mit gutem Rat beiseite standen.*

*Ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin Isabella, meiner Tochter Helene und meinen Eltern.*

# Inhaltsverzeichnis


**1 Einleitung** **9**
- 1.1 Motivation . . . 9
- 1.2 Magnesiumlegierungen . . . 11
  - 1.2.1 Kennzeichnung von Magnesiumlegierungen . . . 11
  - 1.2.2 Magnesium-Gusslegierungen . . . 12
- 1.3 Stoffschlüssiges Fügen von Magnesium . . . 13
  - 1.3.1 Löten von Magnesiumlegierungen . . . 13
  - 1.3.2 Kleben von Magnesiumlegierungen . . . 14
  - 1.3.3 Konventionelle Schweißverfahren . . . 14
- 1.4 Derzeit genutzte Laser-Schweißtechnologien . . . 16
  - 1.4.1 Laserparameter . . . 17
  - 1.4.2 Allgemeine Betrachtung des Schweißvorganges . . . 19
  - 1.4.3 Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen . . . 21
  - 1.4.4 Derzeitige Bemühungen . . . 22

**2 Problemstellung** **23**
- 2.1 Aufgabe . . . 23
- 2.2 Statistische Versuchsplanung . . . 24

**3 Sicherheitsaspekt** **26**
- 3.1 Sicherheit im Umgang mit Laserstrahlung . . . 26
  - 3.1.1 Sekundärgefahren . . . 27
- 3.2 Umgang mit Verfahranlagen . . . 28

**4 Komponenten der Anlage** **29**
- 4.1 YLR-1500CT Ytterbium Faser Laser . . . 29
  - 4.1.1 Funktionsweise . . . 29
- 4.2 Laserbearbeitungskopf BIMO . . . 31
  - 4.2.1 Prinzip der Laserbearbeitungsoptik . . . 31
- 4.3 Faser . . . 33
  - 4.3.1 Energie-Kette . . . 34
- 4.4 3-Achsen-Verfahranlage . . . 35

**5 Aufbau der Anlage** **36**
5.1 Notwendige Schritte und Einrichtungen . . . . . 36
5.2 Verlegen der Prozessfaser . . . . . 37
5.3 Verlegen der Kühlleitungen . . . . . 39
5.4 Verlegen der Datenleitungen von Laser - Verfahranlage - Ansteuerung . . . . . 39
5.5 Verlegen der Schutzgaszuführung . . . . . 40
5.6 Anpassen einer Werkstückaufnahme . . . . . 40
5.7 Verlegen der Druckluftleitung für den Crossjet . . . . . 41
5.8 Anfertigen einer Referenz-Auflage zum Einmessen der Fokuslage am Werkstück . . . . . 42
5.9 Einrichten eines Arbeitsplatzes zur Versuchssteuerung . . . . . 43
5.10 Einrichten der optischen Prozessüberwachung mittels zweier Kameras . 44

**6 Untersuchtes Material** **45**

**7 Versuchsvorbereitung** **46**
7.1 Planung der Versuchsdurchführung . . . . . 46
7.1.1 Der $2^{k-p}$ Teilfaktorplan . . . . . 49
7.2 Makroskopische Bewertung . . . . . 50
7.3 Mikroskopische Bewertung . . . . . 50
7.3.1 Vorgangsweise beim Anfertigen der Schliffbilder . . . . . 50
7.3.2 Verwendete Geräte bei der Präparation/Untersuchung . . . . . 55
7.4 Digitale Radiografie . . . . . 56
7.4.1 Anlagenteile der Radiografie . . . . . 57

**8 Erste Versuchsreihe** **58**
8.1 1.Versuchsgruppe . . . . . 58
8.1.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes . . . . . 59
8.1.2 Ausgesuchte Abbildungen der 1.Versuchsgruppe . . . . . 61
8.1.3 Genauere Untersuchung . . . . . 63
8.1.4 Beurteilung der 1.Versuchsgruppe . . . . . 66
8.2 2.Versuchsgruppe . . . . . 68
8.2.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes . . . . . 68
8.2.2 Ausgesuchte Abbildungen der 2.Versuchsgruppe . . . . . 70
8.2.3 Genauere Untersuchung . . . . . 72
8.2.4 Beurteilung der 2.Versuchsgruppe . . . . . 76
8.3 3.Versuchsgruppe . . . . . 77
8.3.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes . . . . . 77

8.3.2 Ausgesuchte Abbildungen der 3.Versuchsgruppe . . . . . 79
8.3.3 Genauere Untersuchung . . . . . 80
8.3.4 Beurteilung der 3.Versuchsgruppe . . . . . 82
8.4 4.Versuchsgruppe . . . . . 83
8.4.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes . . . . . 83
8.4.2 Ausgesuchte Abbildungen der 4.Versuchsgruppe . . . . . 85
8.4.3 Genauere Untersuchung . . . . . 86
8.4.4 Beurteilung der 4.Versuchsgruppe . . . . . 88
8.5 Abschließende Beurteilung der ersten Versuchsreihe . . . . . 89

**9 Zweite Versuchsreihe** **90**
9.1 5.Versuchsgruppe . . . . . 91
9.1.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes . . . . . 91
9.1.2 Ausgesuchte Abbildungen der 5.Versuchsgruppe . . . . . 93
9.1.3 Genauere Untersuchung . . . . . 96
9.1.4 Beurteilung der 5.Versuchsgruppe . . . . . 101
9.2 Abschließende Beurteilung der zweiten Versuchsreihe . . . . . 103

**10 Abschlussbetrachtung** **106**

**11 Anhang** **108**

# Abbildungsverzeichnis


1.1 Fügen durch Reibschweißen . . . . . 15
1.2 Wärmeleit- Tiefschweißvorgang [32] . . . . . 20

4.1 Schema eines Faserlasers [18] . . . . . 30
4.2 Srahlführung bei gerader Optik [1] . . . . . 31
4.3 Srahlführung bei gewinkelter Optik [1] . . . . . 32
4.4 Aufbau der Faser [18] . . . . . 33
4.5 Die verwendete Energiekette „EasyTriFlex“ . . . . . 34
4.6 Die verwendete 3-Achs-Verfahranlage . . . . . 35

5.1 Führung der Prozessfaser und der Kühlleitungen . . . . . 37
5.2 Stützvorrichtung im Bereich der Lichtleitkabelaufnahme . . . . . 38
5.3 Teilen des Kühlwasserstroms . . . . . 39
5.4 Schutzgaszuführung . . . . . 40
5.5 Crossjet-Modul und Druckluftversorgung . . . . . 41
5.6 Referenz-Auflage . . . . . 42
5.7 Der Arbeitsplatz außerhalb des Bearbeitungsraumes . . . . . 43
5.8 optische Prozessüberwachung mit zwei Kameras . . . . . 44

7.1 Angezeichnete Schnittebenen auf Probe 1.6 . . . . . 51
7.2 Trennen der Proben für Schliffbilder und Radiologie . . . . . 51
7.3 Eingebettete Proben 1.53, 1.63, 2.13, 2.63, 3.43 und 4.33 . . . . . 52
7.4 Anordnung bei der digitalen Radiografie . . . . . 56

8.1 Probe 1.5 in voller Länge . . . . . 61
8.2 Schweißnaht der Probe 1.5 im Detail . . . . . 61
8.3 Probe 1.6 in voller Länge . . . . . 62
8.4 Schweißnaht der Probe 1.6 im Detail . . . . . 62
8.5 Schweißnaht 5 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 63
8.6 Schweißnaht 5 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 63
8.7 Schweißnaht 5 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 64
8.8 Schweißnaht 6 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 64
8.9 Schweißnaht 6 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 65
8.10 Schweißnaht 6 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 65

8.11 radiografische Aufnahmen der Proben 1.5 und 1.6 . . . . . 66
8.12 Probe 2.1 in voller Länge . . . . . 70
8.13 Schweißnaht der Probe 2.1 im Detail . . . . . 70
8.14 Probe 2.6 in voller Länge . . . . . 71
8.15 Schweißnaht der Probe 2.6 im Detail . . . . . 71
8.16 Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 72
8.17 Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 72
8.18 Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 73
8.19 Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 73
8.20 Schweißnaht 6 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 74
8.21 Schweißnaht 6 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 74
8.22 Schweißnaht 6 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 75
8.23 radiografische Aufnahmen der Proben . . . . . 75
8.24 Probe 3.4 in voller Länge . . . . . 79
8.25 Schweißnaht der Probe 3.4 im Detail . . . . . 79
8.26 Schweißnaht 4 der Gruppe 3 im Detail . . . . . 80
8.27 Schweißnaht 4 der Gruppe 3 im Detail . . . . . 80
8.28 Schweißnaht 4 der Gruppe 3 im Detail . . . . . 81
8.29 radiografische Aufnahme der Probe 3.4 . . . . . 81
8.30 Probe 4.3 in voller Länge . . . . . 85
8.31 Schweißnaht der Probe 4.3 im Detail . . . . . 85
8.32 Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail . . . . . 86
8.33 Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail . . . . . 86
8.34 Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail . . . . . 87
8.35 Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail . . . . . 87
8.36 radiografische Aufnahme der Probe 4.3 . . . . . 88

9.1 Probe 5.2 in voller Länge . . . . . 93
9.2 Schweißnaht der Probe 5.2 im Detail . . . . . 93
9.3 Probe 5.3 in voller Länge . . . . . 94
9.4 Schweißnaht der Probe 5.3 im Detail . . . . . 94
9.5 Probe 5.8 in voller Länge . . . . . 95
9.6 Schweißnaht der Probe 5.8 im Detail . . . . . 95
9.7 radiografische Aufnahmen der ausgewählten Proben . . . . . 96
9.8 Schweißnaht 2 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 97
9.9 Schweißnaht 2 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 97
9.10 Schweißnaht 2 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 98
9.11 Schweißnaht 3 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 98
9.12 Schweißnaht 3 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 99
9.13 Schweißnaht 3 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 99
9.14 Schweißnaht 8 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 100
9.15 Schweißnaht 8 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 100
9.16 Schweißnaht 8 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 101

9.17 Grundmaterial AZ31 im Detail . . . . . 104

11.1 Schweißnaht 1 bis 3 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 115
11.2 Schweißnähte 4, 7 und 8 der Gruppe 1 im Detail . . . . . 116
11.3 weitere Schliffbilder der Schweißnaht 5 der Gruppe 1 . . . . . 117
11.4 weitere Schliffbilder der Schweißnaht 6 der Gruppe 1 . . . . . 118
11.5 Schweißnaht 2 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 118
11.6 Schweißnaht 3 bis 5 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 119
11.7 Schweißnähte 7 und 8 der Gruppe 2 im Detail . . . . . 120
11.8 weitere Schliffbilder der Schweißnaht 1 der Gruppe 2 . . . . . 120
11.9 weitere Schliffbilder der Schweißnähte 1 und 6 der Gruppe 2 . . . . . 121
11.10Schweißnaht 1 bis 3 der Gruppe 3 im Detail . . . . . 122
11.11Schweißnähte 5 bis 7 der Gruppe 3 im Detail . . . . . 123
11.12Schweißnaht 8 der Gruppe 3 im Detail . . . . . 124
11.13weitere Schliffbilder der Schweißnaht 4 der Gruppe 3 . . . . . 124
11.14Schweißnaht 1,2 und 4 der Gruppe 4 im Detail . . . . . 125
11.15Schweißnähte 5 bis 7 der Gruppe 4 im Detail . . . . . 126
11.16Schweißnaht 8 der Gruppe 4 im Detail . . . . . 127
11.17weitere Schliffbilder der Schweißnaht 3 der Gruppe 4 . . . . . 127
11.18Schweißnähte 1, 4 und 5 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 128
11.19Schweißnähte 6 und 7 der Gruppe 5 im Detail . . . . . 129
11.20weitere Schliffbilder der Schweißnaht 2 der Gruppe 5 . . . . . 129
11.21weitere Schliffbilder der Schweißnähte 2 und 3 der Gruppe 5 . . . . . 130
11.22weitere Schliffbilder der Schweißnähte 3 und 8 der Gruppe 5 . . . . . 131
11.23weitere Schliffbilder der Schweißnaht 8 der Gruppe 5 . . . . . 132
11.24weitere Schliffbilder des ungeätzten Grundmaterials AZ31 . . . . . 132

# Tabellenverzeichnis


1.1 ASTM-Kurzbezeichnungen für Magnesiumlegierungen [19] . . . . . 11
1.2 Physikalische Eigenschaften von Magnesium, Aluminium und Eisen [24] 21

3.1 Gefährdungen bei den einzelnen Laserklassen [4] . . . . . 26

4.1 Technische Daten der Verfahranlage . . . . . 35

6.1 Eigenschaften von AZ31 [42] . . . . . 45

7.1 Einfluß- und Antwortgrößen . . . . . 46
7.2 Unregelmäßigkeiten an Laserstrahlschweißnähten [11] . . . . . 47
7.3 Versuchsplan . . . . . 48
7.4 Präparationsdurchführung . . . . . 53

8.1 Einfluß- und Antwortgrößen der 1. Versuchsgruppe . . . . . 58
8.2 Versuchsplan für die 1. Versuchsgruppe . . . . . 60
8.3 Poren in Schliffbild der Probe 1.5 . . . . . 66
8.4 Poren in Schliffbild der Probe 1.6 . . . . . 67
8.5 Einfluß- und Antwortgrößen der 2. Versuchsgruppe . . . . . 68
8.6 Versuchsplan für die 2. Versuchsgruppe . . . . . 69
8.7 Poren im Schliffbild der Probe 2.1 . . . . . 76
8.8 Poren im Schliffbild der Probe 2.6 . . . . . 76
8.9 Einfluß- und Antwortgrößen der 3. Versuchsgruppe . . . . . 77
8.10 Versuchsplan für die 3. Versuchsgruppe . . . . . 78
8.11 Poren im Schliffbild der Probe 3.4 . . . . . 82
8.12 Einfluß- und Antwortgrößen der 4. Versuchsgruppe . . . . . 83
8.13 Versuchsplan für die 4. Versuchsgruppe . . . . . 84

9.1 Einfluß- und Antwortgrößen der 5. Versuchsgruppe . . . . . 91
9.2 Versuchsplan für die 5. Versuchsgruppe . . . . . 92
9.3 Poren im Schliffbild der Probe 5.3 . . . . . 102
9.4 Poren im Schliffbild der Probe 5.8 . . . . . 103

# Kapitel 1

# Einleitung

## 1.1 Motivation

Bereits in den dreißiger Jahren des letzten Jahrhunderts fand Magnesium vielfältig Verwendung. Dennoch verschwand dieser Leichtbauwerkstoff nach 1945 praktisch vollständig aus der Palette der metallischen Konstruktionswerkstoffe. Seit etwa 15 Jahren erleben die Magnesiumlegierungen jedoch eine Renaissance in verschiedensten Anwendungsgebieten. Mit einem spezifischen Gewicht von etwa 1.8 g/cm$^3$ ist Magnesium eines der leichtesten großtechnisch nutzbaren Metalle für Strukturanwendungen [21].
Insbesondere die Automobilindustrie erkennt in der Verminderung des Stahlanteils und an dessen Stelle die Verwendung leichterer Materialien wie Aluminium und Magnesium eine Möglichkeit für Gewichtseinsparungen. Das angestrebte Ziel ist es auch zukünftige Auflagen, hinsichtlich Umweltverträglichkeit, erfüllen zu können. Doch auch die Unterhaltungs-Industrie trägt zum Aufschwung des Magnesiums bei. Bei hochwertigen, tragbaren elektronischen Geräten (Laptops, Kameras,..) werden die als „billig“ empfundenen Kunststoffgehäuse zunehmend durch Gehäuse aus Magnesiumlegierungen ersetzt. Mit entsprechenden marktstrategischen Vorteilen ergeben sich auch rein funktionelle Vorteile wie geringes Gewicht bei guter Wärmeabfuhr und hoher Robustheit gegen äußere Einflüsse.
Die herausragendste Eigenschaft von Magnesium und seinen Legierungen ist die bereits anfangs erwähnte geringe Dichte. Zu beachten sind die ausgezeichneten Zerspanungseigenschaften von Magnesium. Geringe Schnittkräfte, kurze Späne, hohe Schnittgeschwindigkeiten, geringer Werkzeugverschleiß und hohe Oberflächengüten sind dabei die wesentlichen Vorteile gegenüber vielen anderen metallischen Werkstoffen. Gute Gießeigenschaften einiger Magnesiumlegierungen erlauben die Herstellung großflächiger und komplizierter Druckgussteile mit hoher Oberflächengüte. Bis zu 50% höhere Schusszahlen sind beim Gießen von Magnesiumlegierungen im Vergleich zu Aluminium-Druckguss realisierbar. Grund dafür sind u.A. niedrige Schmelztemperatur, geringe Schmelzenergie und Wärmekapazität [21].
Ziel der Materialbearbeitung ist es, durch zuführen mechanischer, thermischer oder elektrischer Energie eine bestimmte Form- oder Zustandsänderung herbeizuführen. Für

die thermische Materialbearbeitung, zu der auch das Schweißen zählt, gilt: Je geringer die Leistungsdichte der Energiequelle, wie etwa die der Gasbrennerflamme im Vergleich zum Laserstrahl, desto größer ist die benötigte Energiemenge. Bei geringer Leistungsdichte wird beim Schweißen meist mehr Werkstoff erhitzt und aufgeschmolzen als zum Herstellen einer Verbindung eigentlich notwendig wäre [9]. Diese Überlegung regt dazu an, Energiequellen mit möglichst hoher Leistungsdichte, wie den Laser, zum Schweißen heranzuziehen.

Es ergeben sich eine Reihe von Vorteilen [16]:

- hohe Energiedichte
- berührungsloses Bearbeiten
- kein primärer Werkzeugverschleiß
- fein einstellbar (durch optische Bauteile oder Pulsbetrieb)
- geringe Wärmeeinflusszone
- geringe Wärmebelastung (minimaler Verzug)
- schlanke und tiefe Nahtgeometrie
- hohe Prozessgeschwindigkeit
- nicht leitende Werkstoffe bearbeitbar
- hohe Flexibilität
- gut automatisierbar
- uvm.

Die genannten geringen Nahtbreiten bei kleinen Wärmeeinflußzonen können, gerade bei dicken Blechen, nur noch durch das Elektronenstrahlschweißen übertroffen werden. Nachteilig beim Elektronenstrahlschweißen bleibt allerdings die in der Regel prozessbedingt notwendige Evakuierung des Schweißbereiches, was gerade bei großvolumigen Bauteilen das Handling in der Fertigung erschweren kann. Die berührungslose Bearbeitung und die charakteristischen Nahtgeometrien lassen Verbindungstechniken zu, die z.T. erst durch den Lasereinsatz möglich werden [16].
Wegen der stetigen Verbesserung der Werkstoffeigenschaften, beispielsweise durch Nutzung immer subtilerer Wärmebehandlungstechnologien kommt bei den thermischen Fügeverfahren den möglichst schädigungsarmen Varianten eine hohe Bedeutung zu. Strahl-basierte Verfahren, und dabei insbesondere das Laserstrahlschweißen, nehmen dabei wegen der genannten Vorteile eine besondere Stellung ein [6].

## 1.2 Magnesiumlegierungen

Für reines Magnesium besteht nur eine schlechte Eignung zur Kaltumformung, da Magnesium in der hexagonal dichtesten Kugelpackung (hdp) kristallisiert und es damit nur wenig Gleitsysteme gibt, die ein entsprechendes Umformen erlauben. Reines Magnesium und konventionell gegossene Magnesiumlegierungen zeigen eine Tendenz zu sprödem Verhalten durch interkristallines Versagen und zu lokalisiertem transkristallinen Bruch (besonders bei Druckbelastung) obwohl die Dämpfungskapazität von reinem Magnesium höher liegt als der entsprechende Wert für Gusseisen.
Aufgrund dieser Eigenschaften wird versucht, mit Hilfe geeigneter Legierungselemente das Eigenschaftsprofil positiv zu beeinflussen. Magnesium bildet mit den meisten Legierungselementen intermetallische Phasen, die desto stabiler sind, je größer die Elektronegativität des Legierungselementes ist [19].
An dieser Stelle soll näher auf die Einteilung und die Kennzeichnung von Magnesiumlegierungen und die Wirkung der verschiedenen Legierungselemente eingegangen werden.

### 1.2.1 Kennzeichnung von Magnesiumlegierungen

Die Kennzeichnung von Magnesiumlegierungen nach der ASTM-Norm (American Society for Testing and Materials) hat sich weltweit durchgesetzt. Die Legierungen werden hierbei durch einen Kurzbuchstaben der Hauptlegierungselemente, gefolgt von deren gerundeten Anteilen in Gewichtsprozent gekennzeichnet.

| **Kurzbuchstabe** | **Legierungselement** | **Kurzbuchstabe** | **Legierungselement** |
|---|---|---|---|
| A | Aluminium | N | Nickel |
| B | Wismut | P | Blei |
| C | Kupfer | Q | Silber |
| D | Cadmium | R | Chrom |
| E | seltene Erden | S | Silizium |
| F | Eisen | T | Zinn |
| H | Thorium | W | Yttrium |
| K | Zirkonium | Y | Amonium |
| L | Lithium | Z | Zink |
| M | Mangan | | |

Tabelle 1.1: ASTM-Kurzbezeichnungen für Magnesiumlegierungen [19]

Dieser Bezeichnung können Buchstaben folgen, die die verschiedenen Entwicklungsstufen der entsprechenden Legierung kennzeichnen (A, B, C, ...). Diese Buchstaben stellen meist eine Kennzeichnung des Gehalts an Verunreinigungen dar. **Beispiel:** Bei der Legierung AZ91D handelt es sich nach der Kennzeichnung um eine Magnesiumlegierung

mit 9 Gew.-% Aluminium (A) und 1 Gew.-% Zink (Z) in der vierten Entwicklungsstufe (D).

### 1.2.2 Magnesium-Gusslegierungen

Eine Vorrangstellung nimmt das Legieren des Magnesiums mit Aluminium ein. Mithilfe des Aluminiums kommt es zu einer deutlichen Steigerung der Zugfestigkeit und der Härte in Folge von Mischkristallbildung. Ähnliche Effekte können durch Zugabe der Elemente Zink und Mangan erzielt werden, während Silber zu einer Erhöhung der Warmfestigkeit führt. Aufgrund der genannten Wirkung von Aluminium, enthalten die am häufigsten verwendeten Magnesiumlegierungen etwa 3-9% Al. Dieser Al-Gehalt führt nicht nur zu guten mechanischen Eigenschaften, sondern erhöht auch die Korrosionsbeständigkeit. Zudem bewirkt die Aluminiumzugabe, dass diese Legierungen sehr gut gießbar sind und zwar umso besser, desto größer der Gehalt an Aluminium ist. Da der überwiegende Teil der Gusslegierungen im Druckguss verarbeitet wird, hat sich hier die Legierung AZ91 weitgehend etabliert. Sie erlaubt exzellente Gießbarkeit auch bei komplizierten, dünnwandigen Bauteilen [19].

**Eigenschaften der AZ-Legierungen:**

- gute Raumtemperatureigenschaften
- geringe Warmfestigkeit und Kriechbeständigkeit
- gute Gießbarkeit

Der Nachteil eines hohen Aluminium-Gehalts ist jedoch die Bildung einer interdendritischen Korngrenzenphase, die in der Legierung AZ91 oberhalb einer Einsatztemperatur von 120°C zu einem raschen Absinken der Festigkeit im feinkörnigen Druckgussgefüge führt. Zudem ist das Verformungsvermögen der Legierungen mit Aluminium und Zink begrenzt[19].
Um Magnesiumlegierungen mit höherer Duktilität zu erhalten, wurde der Aluminium Anteil gesenkt und auf die Zugabe von Zink völlig verzichtet. Diese Legierungen der Familie Aluminium-Mangan wie z.B. AM50 und AM60 (die Mn-Gehalte liegen zwischen ca. 0.2 und 0.4%) weisen ein deutlich höheres Verformungsvermögen auf. Bei Raumtemperatur sind ihre Festigkeitswerte zwar geringer, sie verhalten sich jedoch nicht so spröde wie die Legierungen auf Basis von Magnesium-Aluminium-Zink. Die Reduzierung des Aluminium-Anteils führt erwartungsgemäß zu schlechteren Gießeigenschaften [19].

**Eigenschaften der AM-Legierungen:**

- geringerer Aluminium und Zink Anteil führt zu gesteigerter Duktilität
- eingeschränkte Raumtemperatureigenschaften
- eingeschränkte Gießbarkeit

## 1.3 Stoffschlüssiges Fügen von Magnesium

Damit Bauteile aus Blech, wie sie im Automobilbau in Form von tailored blanks verwendet werden, oder auch gegossene Formteile in geeigneter Weise in der Produktion verarbeitet werden können, bedarf es auch entsprechender Fügeverfahren. Heute spielen die Lichtbogenschweißverfahren und in zunehmenden Maße auch die Strahlschweißverfahren als Hochleistungsverfahren eine entscheidende Rolle, da sie im Bezug auf Wirtschaftlichkeit bei Massenfertigung neue Möglichkeiten für die Verarbeitung von Magnesiumlegierungen liefern [19]. Eine Verbindung mit unterschiedlichsten Knoten-, Profil- und Blechstrukturen muss sichergestellt werden können. Die Entwicklung neuer Fügeverfahren bringt für den Werkstoff Magnesium immer breitere Einsatzmöglichkeiten. Demgemäß haben auch die Forschungsanstrengungen in diesem Bereich entsprechend zugenommen.

Zu den möglichen Verfahren zählen nach O.Hahn [14] unter anderem:

- löten
- kleben
- schweißen

### 1.3.1 Löten von Magnesiumlegierungen

Im Gegensatz zum Schweißen definiert sich das Löten dadurch, dass beim Löten nur der Zusatzwerkstoff aufgeschmolzen wird, während der Grundwerkstoff aufgrund seines höheren Schmelzpunktes fest bleibt [30].
In erster Linie ist beim Löten von Magnesiumbauteilen darauf zu achten, dass die Lote aus elektrochemischer Sicht eine gute Kompatibilität zu den Grundwerkstoffen aufweisen. Um die Potenzialdifferenz zwischen Grundwerkstoff und Lot möglichst gering zu halten und das Risiko der Elektrokorrosion zu minimieren, sollten die angewendeten Lote möglichst unedel sein. Grund dafür ist das geringe Standardpotenzial von Magnesium in der elektrochemischen Spannungsreihe.
Problematisch ist das Löten von Magnesiumwerkstoffen aufgrund der stabilen, oxidischen Oberflächenschicht, die sich unter atmosphärischen Bedingungen sofort auf der metallisch blanken Oberfläche bildet. Die Benetzung zwischen Lot und Grundwerkstoff wird durch diese Oberflächenschicht verhindert. Um diese Schicht zu entfernen, werden unter anderem Flussmittel verwendet, die die Oxide chemisch beseitigen, sowie für eine bestimmte Zeit eine Neubildung von Oxiden verhindern. Wird auf die so vorbereitete Oberfläche geschmolzenes Lot aufgebracht, kann das Lot die Metalloberfläche benetzen und verdrängt dabei das dort befindliche Flussmittel. Es entsteht eine adhäsive Bindung zwischen Lot und dem Grundstoff. In weiterer Folge kommt es zu Diffusionsvorgängen und an den Grenzflächen zur Legierungsbildung, die eine Verstärkung der Haftung bewirkt [24].

Prozessschritte des Lötens [24]:

- Erwärmen der zu fügenden Teile auf Löttemperatur
  (ca. 339 °C je nach verwendetem Lot [14])
- Eindringen des flüssigen Lotes in den Lötspalt zwischen den zu verbindenden Teilen
- Wechselwirkung zwischen dem Grundstoff und dem geschmolzenen Lot
- Erstarren der flüssigen Phasen, die sich zwischen den verbundenen Oberflächen der Lötteile befinden

Generell wird beim Löten von Magnesium eine Vorgehensweise wie beim Fügen von Aluminium empfohlen, jedoch spielte das Löten von Magnesiumlegierungen zu keiner Zeit eine wesentliche Rolle in der Fügetechnik [19].

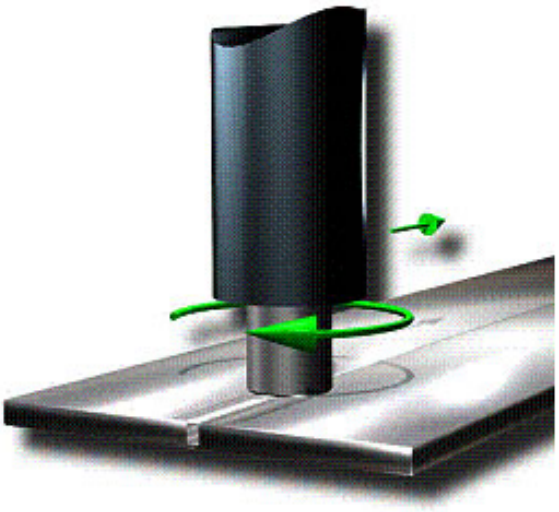
### 1.3.2 Kleben von Magnesiumlegierungen

Als Vorteile der Klebetechnik stellen sich dabei die Möglichkeiten zur Isolation der Fügepartner gegeneinander dar, wodurch sowohl die elektrochemische als auch die Spaltkorrosion bei Mischverbindungen weitgehend vermieden werden. Darüber hinaus wird durch die großflächige Krafteinleitung eine hohe dynamische Festigkeit der Verbindungen erreicht. Beim Kleben von Bauteilen aus Magnesiumwerkstoffen liegen derzeit allerdings nur begrenzte Kenntnisse vor. So ist beispielsweise noch nicht umfassend geklärt, inwieweit Vorbehandlungssysteme, die auf Aluminiumwerkstoffen zu guten Verbindungsfestigkeiten von Klebungen führen, auch für die Vorbehandlung von Magnesiumlegierungen geeignet sind. Untersuchungen der Festigkeitseigenschaften von Klebeverbindungen mit Fügeteilen aus Magnesium haben ergeben, dass die mechanische Festigkeit in höchstem Maße von der jeweiligen Vorbehandlung abhängt. Auch die Morphologie der Oberfläche ist, wie bei Klebeverbindungen im Allgemeinen, für den Grad der erreichten Adhäsion ausschlaggebend. Weiters ist zu beachten, dass es für Magnesium derzeit keine speziell entwickelten Klebstoffe gibt [14].

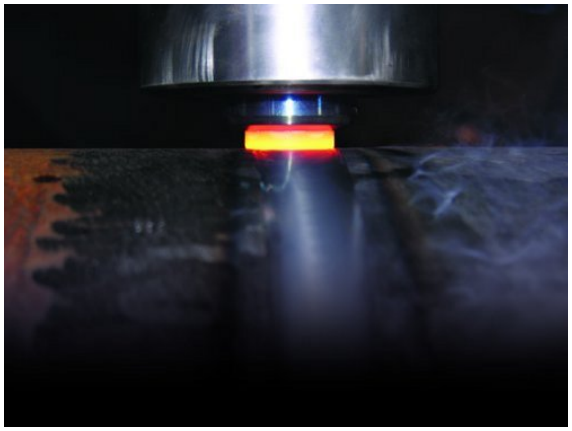
### 1.3.3 Konventionelle Schweißverfahren

Im Wesentlichen werden heute das MIG- und das WIG-Verfahren im Bereich der Lichtbogenschweißverfahren zum Fügen von Magnesiumbauteilen eingesetzt. Der Vorteil beider Verfahren liegt in den geringen Investitionskosten für neue Anlagen, beziehungsweise in der Möglichkeit bereits bestehende Systeme zu verwenden. Beide Verfahren bieten darüber hinaus die Möglichkeit zum manuellen Schweißen, was besonders für kleine Stückzahlen, Reparatur- und Instandsetzungsschweißungen von Bedeutung ist. Im Gegensatz dazu haben Strahlschweißverfahren wie Elektronenstrahlschweißen und Laserstrahlschweißen ein sehr hohes Automatisationspotential, mit dem (für Strahlverfahren typischen) Nachteil der hohen Investitionskosten [19].

Eine weitere Möglichkeit stellt das Reibschweißen bzw. Rührschweißen, welches zur Gruppe der Press-Schweißverfahren gehört, dar. Die durchaus positiven Bedingungen beim Reibschweißen, wie niedriges Temperaturniveau und damit geringe Wärmebelastung der Fügepartner, symmetrische Wärmeeinbringung über den gesamten Schweißquerschnitt und damit geringe Spannungen in den zu fügenden Bauteilen, hohe Wiederholgenauigkeit sowie relativ kurze Schweißzeiten führen zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit in der Serienproduktion. Das Verfahren eignet sich besonders für Magnesiumwerkstoffe, aber auch artfremde Werkstoffe bzw. Mischverbindungen wie Magnesium/Stahl, Magnesium/Aluminium [24].



(b) Schema [3]



(c) Reibschweißen [23]

Abbildung 1.1: Fügen durch Reibschweißen

Die Erwärmung der zu fügenden, fest eingespannten Teile erfolgt durch mechanische Reibung. Sie wird durch eine Relativbewegung zwischen einem rotierenden Werkzeug (meist bestehend aus einer Schulter die an der Oberfläche bewegt wird und einem Dorn der in den Fügespalt reicht) und den zu fügenden Bauteilen erzeugt. Eine andere Möglichkeit besteht darin, rotationssymmetrische Bauteile direkt aneinander rotieren zu lassen um so die notwendige Schweißwärme zu erzeugen. Die Kombination aus Werkzeugrotation und translatorischen Kräften führt zu einem Fließen des Werkstoffes wodurch sich der Fügespalt, ohne beifügen eines Zusatzstoffes schließt [37].
Die Fügetemperatur ist verfahrensbedingt immer etwas geringer als die Schmelztemperatur der zu fügenden Materialien. Die Verbindung erfolgt durch Diffusionsprozesse über die Grenzfläche hinweg, wobei die während des Schweißprozesses aufgebrachte Kraft diese erheblich unterstützt [17]. Der intensive Kontakt der Fügepartner und die

durch die Reibung direkt an den Fügeflächen erzeugte Schweißwärme ermöglicht auch das Reibschweißen von Werkstoffen mit stark unterschiedlichen Schmelzpunkten und Gitterstrukturen [24].
Nachteile des Reibschweiß-Verfahrens sind [35]:

- Durchmesser und Länge der Bauteile sind durch Maschinengröße begrenzt
- eingeschränkte zerstörungsfreie Prüfmöglichkeit
- eingeschränkte Bauteilgeometrie
- hohe Maschinenanschaffungskosten bei geringer Flexibilität bezüglich veränderter Anforderungsprofile

## 1.4 Derzeit genutzte Laser-Schweißtechnologien

Der Grundstein für den Einsatz des Lasers in der Materialbearbeitung wurde Mitte der sechziger Jahre mit der Entwicklung der ersten $CO_2$- und Nd:YAG- Laser gelegt. Der Einsatz von Lasersystemen zur Materialbearbeitung und insbesondere zum Fügen von Bauteilen nahm seither sprunghaft zu und gilt seit Mitte der achtziger Jahre als Schlüsseltechnologie.

Im Bereich der Laserschweißtechnik unterscheidet man zwei Gruppen, die sich in der Strahlerzeugung und somit in der Art der Strahlquelle unterscheiden: Hierbei handelt es sich einerseits um die Gruppe der Gaslaser, deren aktives Medium ein definiertes Gasgemisch (zum Beispiel $CO_2$, CO, HeNe, $N_2$, XeF, uva.) darstellt. Wird im Gegensatz dazu als Lasermedium ein Kristallstab (zum Beispiel Neodym dotierten Yttrium-Aluminium Granat) genutzt spricht man von einem Festkörper-Laser. Die Unterschiede beider Systemgruppen liegen unter anderem in Strahlleistung, Strahlqualität (Fokussierbarkeit), und natürlich in den unterschiedlichen Wellenlängen $\lambda$ des emittierten Lichtes.
Die Wellenlänge des Nd:Yag Lasers beträgt $\lambda$=1.06$\mu$m während die Wellenlänge des $CO_2$ Lasers $\lambda$=10.6$\mu$m beträgt. Für die Bearbeitung unterschiedlicher Werkstoffe mit unterschiedlichem Absorptionsverhalten können diese verschiedenen Eigenschaften, der verwendeten Laserquellen, entscheidende Auswirkungen auf die Schweißgeschwindigkeit haben [19].
Beide Systeme haben zudem verfahrensspezifische Vorteile, die einen voneinander unabhängigen Einsatz rechtfertigen. Die $CO_2$ Laser zeichnen sich durch eine höhere Ausgangsleistung von bis zu 100kW bei einem Wirkungsgrad von ca. 20% aus. In Gegenüberstellung dazu liegen Festkörperlaser in Form eines Scheibenlasers in einem Bereich von ca. 16kW bei ca. 25% Wirkungsgrad [39].
Da die Wellenlänge des Nd:Yag Lasers nahe am sichtbaren Bereich des Lichtes liegt (0.38 bis 0.75 $\mu$m) liegt ein großer Vorteil in der Möglichkeit zur Verwendung von Glasfaseroptiken zur Strahlführung, die einen besonders flexiblen Einsatz des Lasersystems ermöglichen [19].

Im Gegensatz dazu kann der Strahl $CO_2$ Laser nur über Spiegeln und Linsen geführt werden. Er wird auf diese Weise zur entsprechenden Bearbeitungsoptik geleitet was im Vergleich zum Nd:Yag Laser zu einer etwas eingeschränkten Flexibilität führt.
Die Schweißnaht ist in der Regel während des Bearbeitungsvorganges durch ein Schutzgas vor Reaktionen mit der Luft zu schützen. Abhängig davon, welche Nahtart gewünscht ist und wie groß der Spalt zwischen den Bauteilen ist, wird mit entsprechenden Zusatzwerkstoffen gearbeitet.

Die Vorteile des Laserschweißens:

- Energieeinwirkung in einem kleinen Bereich, somit geringe thermische Belastung und äußerst geringe Wärmeeinflusszone sowie geringer Verzug.
- Berührungslos, daher wird auf das Werkstück keine Kraft ausgeübt.
- Hohe Festigkeit bei geringem Nahtvolumen, Werkstücke können anschließend umgeformt werden, etwa durch Biegen oder InnenHochdruckUmformen (IHU).
- Schlanke Nahtgeometrien und glatte Oberflächen; dadurch verringern sich Nacharbeiten oder entfallen ganz.
- Laserschweißen kann mit anderen Fertigungsschritten wie z.B. Biegen oder Justieren kombiniert werden.
- Kurze Bearbeitungs- und Zykluszeiten aufgrund hoher Prozessgeschwindigkeiten.
- Laserschweißen lässt sich sehr gut automatisieren.

Zu beachten ist, dass der Durchmesser des Laserstrahls im Fokus nur wenige Zehntelmillimeter beträgt. Zwischen den Bauteilen, die verbunden werden, darf daher nur ein minimaler, möglichst konstanter Spalt bleiben. Daher sind die Vorbereitung der Werkstücke und das Positionieren beim Laserschweißen vergleichsweise aufwendig.

### 1.4.1 Laserparameter

Das Ergebnis beim Laserstrahlschweißen hängt neben den üblichen Maschinen,- Werkstück,- und Werkstoffparameter von einer Vielzahl von Laserparameter ab.

#### Gepulste Laser

Lasersysteme stellen die Energie auf unterschiedliche Weise zur Verfügung. Neben einer kontinuierlichen Strahlung auf das Werkstück können gepulste Systeme ihre Energie über einen sehr kurzen Zeitraum hinweg bereitstellen. Gepulste Systeme geben ihre Leistung innerhalb weniger Millisekunden ab [20] (derzeitiger wissenschaftlicher Fokus liegt auf Pulsen im Femto- und sub-Femtosekundenbereich). Die abgegebenen Pulse

können Spitzenleistungen von mehreren Kilowatt erreichen. Die mittlere Leistung beträgt in der Regel einige hundert Watt. Neben der Leistung der Systeme ist entscheident, wie viel Pulsenergie in den Schweißprozess eingebracht wird. Insbesondere das Nahtbild wird hiervon maßgeblich bestimmt. Zu hohe Leistungen und Energien verursachen besonders bei dünnen Bauteilen schnell eine fehlerhafte Naht, da übermäßig viel Material verdampft und somit Fehlstellen in der Naht auftreten [20]. Der gesamte Puls setzt sich zusammen aus dem Puls selbst und einer Pause bis zum nächsten Puls. In vielen Fällen wird der sogenannte Rechteckpuls verwendet. Er stellt über die gesamte Pulslänge die gleiche Pulsleistung zur Verfügung. Dem gegenüber können modulierte Pulse die Leistung über die Länge des Pulses variieren und so Einfluss auf das Schmelzbad oder die Werkstoffoberfläche nehmen [20].

**CW-Laser**

Im Gegensatz zu gepulsten Lasern geben CW-Laser (Continuous-Wave-Laser) ihre Energie über einen längeren Zeitraum kontinuierlich ab. Die einstellbaren Parameter beschränken sich bei diesen Systemen deshalb vornehmlich auf die einzustellende Leistung [20].

**Strahlqualität**

Die Strahlqualität bildet die Grundlage für die Fokusierbarkeit des Laserstrahls.

Sie berechnet sich aus:

$$K = \frac{1}{M^2} \tag{1.1}$$

K - Strahlqualität

$M^2$ - Beugungsmaßzahl

Für einen idealen Strahl nimmt K den Wert 1 an. Reale Strahlen erreichen diesen Wert jedoch nicht, sondern nähern sich immer nur an (K<1). Die Beugungsmaßzahl ergibt sich aus dem Strahlparameterprodukt (SPP) und der Wellenlänge der Strahlquelle und nimmt immer einen Wert größer als 1 an. Singlemodelaser, die derzeit die höchste Strahlqualität aufweisen erreichen Werte von 1,1 [20].

Es gilt:

$$M^2 = \frac{\pi * SPP}{\lambda} \tag{1.2}$$

SPP - Strahlparameterprodukt

$\lambda$ - Wellenlänge der Strahlquelle

Es wird entweder $M^2$ oder SPP von Herstellern der Strahlquellen angegeben. Hohe Strahlqualitäten erlauben kleine Fokusdurchmesser mit hohen Intensitäten. Auf diese Weise lassen sich hohe Einschweißtiefen mit sehr schmalen Schweißnähten erreichen. Damit einher geht eine geringe thermische Belastung der gefügten Bauteile [20].

#### Polarisation

Die Polarisation beschreibt die Schwingungsrichtung des Lichtes das die Laserquelle emittiert. Viele Laser erzeugen einen linear polarisierten Laserstrahl. Zum Schneiden metallischer Werkstoffe wird jedoch ein zirkular polarisierter Strahl benötigt, wenn die Schnittqualität unabhängig von der Schnittrichtung sein soll. Die einfachste Möglichkeit zur Umwandlung der linearen in zirkulare Polarisation ist der Einsatz eines 90°- Phasenschieberspiegels (auch Lambda/4-Spiegel genannt) [27].

#### Wellenlänge

Generell kann gesagt werden, dass kürzere Wellenlängen auf Metallen eine höhere Absorption (der Teil der Laserleistung, die vom Werkstück aufgenommen wird) aufweisen als längere. Diese Absorptionseigenschaft ist gerade am Beginn des Schweißvorganges, also vor der Ausbildung der Dampfkapillare, von Bedeutung. So wird beim Schweißen mit Festkörperlasern weniger Leistung benötigt als beim Einsatz von $CO_2$-Lasern. Eisen weist beispielsweise eine Absorbtion von ca.5% für $CO_2$-Laser ($\lambda$=10.6$\mu$m) auf. Für Festkörperlaser (z.B.: $\lambda$=1.06$\mu$m) erhöht sich der Wert jedoch bereits auf 30% [20].

### 1.4.2 Allgemeine Betrachtung des Schweißvorganges

Um ein Verschweißen der Fügepartner zu ermöglichen muss die Laserenergie im Werkstoff in Wärme umgewandelt werden. Trifft der Laserstrahl auf das Werkstück wird ein Teil der Strahlung reflektiert und ein Teil absorbiert. Bei Leistungsdichten unter $10^4$ bis $10^6$ W/cm$^2$ hängt die absorbierte Leistung von der Wellenlänge der Strahlung, den Materialeigenschaften und der Oberflächenbeschaffenheit ab [24].
Die Absorption erfolgt durch die Wechselwirkung mit den freien Elektronen des Metalls. Bei ausreichender Leistung wird der Bereich der Eindringtiefe (0.01 bis 0.1$\mu$m) aufgeschmolzen wobei die Wärme radial in alle Richtungen in das Werkstück abgeleitet wird.
Werden Laserstrahl oder Werkstück bewegt, bildet sich eine Schweißnaht. Da die Geometrie des Schmelzbades in diesem Fall im wesentlichen durch die Wärmeleitung bestimmt ist wird dieser Schweißvorgang als Wärmeleitungsschweißen bezeichnet [41].

Wird die Leistungsdichte über den kritischen Wert von etwa $10^6$ W/cm$^2$ gesteigert tritt ein völlig neuer Effekt auf. Durch die hohe Laserintensität erfolgt eine lokale Erwärmung des Grundstoffes auf seine Verdampfungstemperatur und damit die Erzeugung eines laserinduzierten Metalldampfes.

Für den Phasenübergang von Metallschmelze zu Metalldampf muss die Laserintensität über der kritischen Intensität liegen, so dass die absorbierte Energie größer ist als die durch Wärmeleitung in das Werkstück abführbare Energie. Nach Erreichen der Verdampfungstemperatur bildet sich durch den Rückstoßdruck des aufsteigenden Metalldampfes eine Dampfkapillare (Dampfkanal) aus, auch Keyhole genannt, welche von flüssigem Schmelzgut umgeben ist (siehe Abb.1.2).
Die Laserstrahlung ionisiert einen Teil des Metalldampfes. Bei zunehmender Leistungsdichte und durch Vielfachreflexionen in der Kapillare, wird ein immer größerer Teil des, aus der Kapillare strömenden Dampfes ionisiert und es entsteht ein Plasma welches einen großen Teil der Laserstrahlung absorbiert. Es werden so Absorptionsgrade von über 90% erreicht. Beim Schweißen bewegt sich das metalldampfgefüllte Keyhole durch das Werkstück und schmilzt dabei an seiner Front ständig neuen Grundwerkstoff auf. Dieser umströmt teilweise die Kapillare und erstarrt an dessen Rückseite [26].
Der damit verbundene Schweißvorgang wird als Laser-Tiefschweißen bezeichnet.

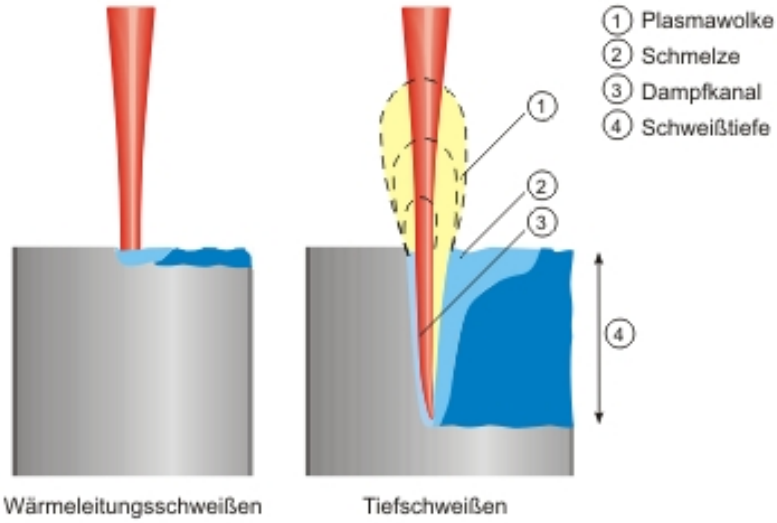



Abbildung 1.2: Wärmeleit- Tiefschweißvorgang [32]

Bei gleicher Nahttiefe ist die eingebrachte Wärmemenge deutlich kleiner als bei konventionellen Schweißverfahren. Daraus ergibt sich ein wesentlich geringerer Verzug und die hohe Leistungsdichte ermöglicht außerdem sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten.

Die schmalen und tiefen Nähte sind aber auch mit schweißtechnologischen Nachteilen verbunden. Sie verlangen eine exakte Nahtvorbereitung und hohe Positioniergenauigkeit des Werkstückes bzw. des Laserstrahls [24].

### 1.4.3 Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen

Die Schweißbarkeit eines Werkstoffes, unter Verwendung eines Lasers, wird von seinen optischen und thermischen Eigenschaften bestimmt. Es ist wichtig zu wissen, von welchen Parametern die Zeit abhängt, nach der eine entsprechende Oberflächentemperatur T erreicht wird. Nach H.Hügel [15] gilt:

$$t = \frac{T^2 * \lambda * \rho * c}{A^2 * I^2} \tag{1.3}$$

t - Zeit zum Erreichen einer Oberflächentemperatur T

T - Temperatur an der Oberfläche des Werkstückes

$\lambda$ - Wärmeleitfähigkeit

$\rho$ - Dichte

c - spezifische Wärme

A - Absorptionsgrad

I - Leistungsdichte

Die Gleichung zeigt die Bedeutung des Absorptionsgrads und, dass zum Schweißen von Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit und/oder hoher Schmelztemperatur große Leistungsdichten notwendig sind.
Die Schweißbarkeit nimmt offensichtlich mit steigender Wärmeleitfähigkeit, zunehmender spezifischer Wärmekapazität und steigender Dichte ab.

| Werkstoff | Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/cmK] | Dichte $\rho$ [g/cm$^2$] | spezifische-Wärme c [Ws/gK] | Schmelztemperatur Ts [K] | Absorptionsgrad A bei $\lambda$=1.06$\mu$m |
|---|---|---|---|---|---|
| Magnesium | 1.57 | 1.74 | 1.02 | 923 | 0.08 |
| Aluminium | 2.30 | 2.70 | 0.89 | 933 | 0.06 |
| Eisen | 0.73 | 7.87 | 0.45 | 1809 | 0.11 |

Tabelle 1.2: Physikalische Eigenschaften von Magnesium, Aluminium und Eisen [24]

### 1.4.4 Derzeitige Bemühungen

Die einfache Manipulation und Steuerung des Strahls eines Nd:YAG Lasers durch eine Glasfaser macht ihn derzeit zur ersten Wahl bei der Bearbeitung komplexer dreidimensionaler Geometrien. Gerade in diesem Bereich kann auch der Faserlaser seine Vorteile geltend machen. Durch seine Anwendung in anderen Bereichen der Fertigungs- und Bearbeitungstechnik wurden auch immer wieder Versuche unternommen mittels $CO_2$ Lasern Magnesiumlegierungen schweißend zu fügen.
Die derzeitigen Anstrengungen beziehen sich hauptsächlich darauf, die optimalen Prozessparameter bei unterschiedlichen Kombinationen zwischen Laserquellen und bearbeiteten Materialien zu bestimmen. Im Zuge dieser Optimierung ergeben sich immer wieder materialspezifische Eigenschaften die gerade bei der Bearbeitung mit dem Laser zum Tragen kommen.
Versuche haben beispielsweise gezeigt, dass es beim Schweißen von Aluminium-Magnesiumlegierungen zu einem starken Anstieg der Härte im Bereich der Verbindungszone kommen kann [22]. Grund dafür ist die geringe Siedetemperatur von Magnesium (ca. 1090 °C) im Vergleich zu Aluminium (ca. 2450 °C). Dies führt zu einem Anstieg der Aluminiumkonzentration in der Verbindungszone, da ein Teil des Magnesiums in diesem Bereich verdampft.
Wie sich aus weiteren Versuchen ergeben hat, sollte die eingebrachte Energie in erster Linie über die Schweißgeschwindigkeit geregelt werden. Ist die Laserenergie, die eingebracht wird, höher als jene Energie die für eine entsprechende Tiefenwirkung notwendig ist, kann es zum Einsinken der Schweißnaht kommen. Dieser Effekt führt zu einer signifikanten Reduzierung der Belastbarkeit der Schweißverbindung [45].

Auch der Einfluss des Schutzgasstroms ist nicht zu vernachlässigen. Ist der Zustrom an Schutzgas zu gering kommt es zwangsläufig zur Reaktion mit Sauerstoff aus der Umgebung wodurch die Schweißnaht infolge der Oxidation geschwächt wird. Ist der Gasstrom wiederum zu stark (zu hohe Strömungsgeschwindigkeit) kommt es zu einem „verblasen“ der Schmelze und so zu einer gestörten Schweißnaht-Geometrie welches ebenfalls zu einer reduzierten Tragfähigkeit der Schweißverbindung führt [45].

Untersuchungen an gewalzten Magnesiumfeinblechen aus AZ31, welche in Stumpfstoßausführung mit und ohne Zusatzwerkstoffe lasergeschweißt wurden, zeigten, dass Eigenschaften wie Festigkeit, Duktilität, Mikrohärte und Bruchzähigkeit durch den Einsatz sowie die Art der Zusatzdrähte nicht beeinflusst werden. Die Eigenschaften der mit Zusatzdraht geschweißten Proben unterscheiden sich unwesentlich von den Eigenschaften der ohne Zusatzdraht hergestellten Verbindung. Daraus lässt sich ableiten, dass keine Notwendigkeit besteht, beim Laserstrahlschweißen des Feinblechs, legierungskonforme Zusatzwerkstoffe einzusetzen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann der Verzicht auf Zusatzdrähte sich vorteilhaft auf die Herstellungskosten auswirken [42].

# Kapitel 2

# Problemstellung

## 2.1 Aufgabe

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist der Aufbau einer CNC-Schweißanlage unter Verwendung eines Faserlasers als Leistungsquelle. Im Zuge der Übersiedelung des Instituts für Umformtechnik und Hochleistungslasertechnik in neue Räumlichkeiten bestand die dringende Notwendigkeit, vorhandene Anlagenteile in einen betriebsfähigen Zustand zu bringen um den, möglichst reibungslosen, Laborbetrieb wieder aufnehmen zu können. Sowohl sicherheitsrelevante Aspekte, zum Schutz von Studenten und bedienenden Mitarbeitern, als auch anlagenspezifische Besonderheiten die eine Verwendung in einem Universitätslabor mit sich bringen wie zum Beispiel die Mehrfachnutzung der verwendeten Verfahranlage mit verschiedenen Laserquellen und die Verwendung verschiedener Schutz- und Prozessgase waren zu berücksichtigen.
Die Anlage kann somit sowohl für weitere Forschungsaufträge als auch für Schulungszwecke genutzt werden.
Im Anschluss wurden bei der Erstinbetriebnahme Probeversuche zum Stumpfstoßschweißen von gewalztem Magnesiumblech aus AZ31 durchgeführt. Auf die verwendete Laserquelle und die Legierung wird in den Kapiteln 4 und 6 näher eingegangen.
Ziel war es, unter den gegebenen Voraussetzungen eine entsprechende Verbindung zwischen den Probeblechen herzustellen und die Schweißnähte metallurgisch zu untersuchen und zu bewerten. Um die Anzahl der notwendigen Versuche möglichst gering zu halten und auf ein sinnvolles Minimum zu reduzieren ist das Verfahren der statistischen Versuchsplanung zur Anwendung gekommen (siehe Kapitel 2.2). Die Versuchsreihe soll klären ob die Verwendung eines Faserlasers in diesem Anwendungsbereich sinnvoll ist und mit welchen gegebenenfalls auftretenden Problemen zu rechnen ist. Es gilt das Anwendungspotential des Faserlasers, im Bezug auf die Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen, aufzuzeigen und unter Beweis zu stellen.

## 2.2 Statistische Versuchsplanung

Die Lösung einer gestellten Aufgabe beginnt meist damit, dass man Versuche durchführt, diese auswertet und sich nach der Beurteilung der Ergebnisse überlegt wie weiter zu verfahren ist. Bei der herkömmlichen Versuchsplanung liegt die Gefahr einer unsystematischen Veränderung mehrerer Einflussgrößen nahe. Dadurch ist die vollständige Vergleichbarkeit der Versuche untereinander nicht möglich, weil durch unsystematische Parameteränderung die Vergleichsbasis gestört wird.
Häufig werden Limite wie begrenzte Zeit, begrenzte Kosten, vorgegeben die gezwungenermaßen zu einer Minimierung des Versuchsaufwandes führen müssen. Will man im Bereich des maximalen Nutzens bleiben, muss man mit einem begrenzten Informationsgrad auskommen. Das kann man aber nur, wenn die Wahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der aus den Informationen gezogenen Schlussfolgerungen bzw. der daraufhin getroffenen Entscheidungen genügend groß ist. Die Zuverlässigkeit von experimentellen Ergebnissen wird durch Versuchsfehler eingeschränkt [34].

Fehler können entstehen durch:

- die Messeinrichtung (ungenügende Empfindlichkeit, dejustiert, schadhaft usw.)
- das zu untersuchende Objekt (Störgrößen usw.)
- das Beurteilungsverfahren (für das zu untersuchende Objekt nicht geeignet usw.)
- dem Versuchsdurchführenden (Ablesefehler, Rechenfehler usw.)

Diese Fehler können systematischer und zufälliger Natur sein. Die Zuverlässigkeit wird vor allem durch die Richtigkeit (betrifft systematische Fehler) und durch die Präzision (betrifft zufällige Fehler) charakterisiert.
Zufällige Fehler werden durch unberücksichtigte Einflussgrößen, Störgrößen, zufällige Messfehler sowie durch unvermeidbare Schwankungen bei der Einstellung der Einflussgrößen und bei der Messung der Antwortgrößen hervorgerufen.

Je treffsicherer und gezielter die Informationen gewonnen werden, um so effektiver wird die Erlangung und Verarbeitung der minimal notwendigen Informationen, das heißt, um so ökonomischer wird die Untersuchung eines bestimmten Problems. Die statistische Versuchsplanung kann helfen, mit geringem Aufwand das Gebiet zu finden, in dem man sinnvoll nach dem Optimum suchen muss. Die Steigerung der Effektivität beginnt demnach mit der bewussten Einschränkung der Fragen an das zu untersuchende System. Einschränkung der Fragen (Versuche) heißt auf Ergebnisse im nicht optimalen Bereich bewußt zu verzichten.
Man benötigt nicht eine allgemeine Theorie für ein größeres Gebiet, um Aussagen über die optimale Arbeitsweise in einem kleinen Bereich davon machen zu können [34].

Der Versuchsplan und die Auswertung der Ergebnisse müssen deshalb die Beantwortung der folgenden beiden Fragen ermöglichen:

1. Welche Änderungen bei den Ergebnissen werden durch Änderung von Parametern hervorgerufen?

2. Wie müssen die Parameter beschaffen sein, damit die Ergebnisse die gewünschte Form annehmen?

Besondere Beachtung muss den Wechselwirkungseffekten geschenkt werden. Allgemein kann man sagen, ein Wechselwirkungseffekt liegt dann vor, wenn der Effekt eines Faktors von der Höhe eines anderen Faktors abhängig ist.
Wegen dieser Abhängigkeit bezeichnet man Wechselwirkungseffekte auch als bedingte Effekte. Je nach der Anzahl der Faktoren, die an der Wechselwirkung beteiligt sind, spricht man von

- 2-Faktor-Wechselwirkungen (2FW)

- 3-Faktor-Wechselwirkungen (3FW) usw. bzw. von

- 2-Faktor-Wechselwirkungseffekten (2FWE)

- 3-Faktor-Wechselwirkungseffekten (3FWE)

Die statistische Versuchsplanung erlaubt, im Vergleich zur herkömmlichen Versuchsplanung, bei gleicher Versuchszahl viel mehr und zuverlässigere Aussagen bzw. benötigt man für einen etwa gleich hohen Aussagewert viel weniger Versuche.
Man arbeitet grundsätzlich mit tabellarischen Übersichten, die eine einfache Handhabung und Auswertung auch umfangreicher Systeme gestatten. Gerade dabei bringt die statistische Versuchsplanung die in ihr liegenden Möglichkeiten voll zur Geltung. Unter vielen möglichen Variablen können die signifikanten erkannt und für weitere Untersuchungen ausgesiebt werden. Wechselwirkungen können erkannt und auch quantitativ erfasst werden [34].

# Kapitel 3

# Sicherheitsaspekt

## 3.1 Sicherheit im Umgang mit Laserstrahlung

Aufgrund der notwendigen Zugangsbeschränkungen oder Schutzkabinen sind die in der industriellen Fertigung eingesetzten Lasersysteme generell nicht gefährlicher als andere Betriebsmittel einzustufen. Allerdings ist bei Wartung, Reparatur und Einrichtarbeiten die laserspezifische Gefährdung für Augen und Haut zu beachten. Ein Laserstrahl kann über weite Strecken parallel verlaufen, reflektiert oder gestreut werden. Die Laserstrahlung ist immer dann gefährlich, wenn die Leistung bzw. Energie nicht am gewünschten Wirkort umgesetzt wird [16].
Zur Orientierung des Anwenders bezüglich der Gefährlichkeit von Laserstrahlung sind Hersteller weltweit verpflichtet, Laser in Klassen einzuteilen. Diese Klassifizierung soll die größtmögliche Gefährdung nach dem „worst-case-Prinzip“ durch Laserstrahlung beschreiben. Ungefährliche Laser fallen in die Klasse 1, die potenziell gefährlichsten Laser sind der Klasse 4 zuzuordnen.

| | **Direkte Langzeit-bestrahlung** | | **Direkte Kurzzeit-bestrahlung** | | **Diffuse Streuung Reflektion** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | opt.Instrum. | freies Auge | opt.Instrum. | freies Auge | Auge | Haut |
| 1 | sicher | sicher | sicher | sicher | sicher | sicher |
| 1M | / | sicher | / | sicher | sicher | sicher |
| 2 | **!** | **!** | sicher | sicher | sicher | sicher |
| 2M | **!** | **!** | **!** | sicher | sicher | sicher |
| 3R | **!** | **!** | Risk. gering | Risk. gering | sicher | sicher |
| 3B | **!** | **!** | **!** | **!** | Risk. gering | sicher |
| 4 | **!** | **!** | **!** | **!** | **!** | **!** |

Tabelle 3.1: Gefährdungen bei den einzelnen Laserklassen [4]

Die Klassen sind in der Lasersicherheitsnorm IEC 60825 1 definiert, die in Österreich als ÖNORM ÖVE EN 60825-1 identisch veröffentlicht wird [4].

### 3.1.1 Sekundärgefahren

Bei der Anwendung von Lasergeräten sollten so genannte sekundäre Gefahren, die mit dem Betrieb der Lasergeräte aber nicht direkt mit dem Laserstrahl zusammenhängen nicht außer Acht gelassen werden.

#### Mechanische Gefahren

Mechanische Gefahren stellen vor allem maschinell schnell bewegte Teile dar. Dazu zählen Roboter, automatische Türverschlüsse und Koordinatentische bzw. Werkstücke, die bewegt werden. Spezielle Gefahren sind mit Gasdruck verbunden. Gaszuführungen, z.B. für $CO_2$ Lasergase oder für Prozessgase, stehen unter Überdruck. Im Gegensatz dazu werden die meisten Gaslaser mit Unterdruck im Resonator betrieben. Auskoppelfenster oder Glasrohre müssen daher sorgfältig eingespannt bzw. fixiert sein. Schließlich können mechanische Stöße und Vibrationen zu einer Fehlausrichtung der Strahlachse, und damit zu gefährlichen Situationen führen (z.B. Reflexionen).

#### Elektrische Gefahren

Jedes leistungsstärkere Lasergerät benötigt eine entsprechend ausgelegte Stromversorgung. Geräteintern liegen manche Kontakte auf Spannungen im kV-Bereich. In gepulsten Lasergeräten können sich Kondensatoren befinden, die auch nach dem Abschalten noch einige Zeit geladen bleiben. Bei manchen Lasersystemen kann auch die Steuerelektronik auf einem erhöhten Potenzialniveau liegen!

#### Chemische Gefahren

Chemische Gefahren gehen in erster Linie von den im Laserbau verwendeten Materialien aus. In Excimer-Lasern wird beispielsweise giftiges Fluor und Chlor verwendet. Gasflaschen für Excimer-Laser müssen daher sicher verwahrt werden. Bei modernen Excimer-Lasern ist das Gasreservoir bereits im Lasergerät eingebaut. Der Staub zerbrochener ZnSe-Linsen (Optikmaterial für $CO_2$-Laser) ist giftig. ZnSe-Staub ist mit Schutzbrille, Handschuhen, Schutzanzug und Atemmaske einzusammeln.

#### Brand- und Explosionsgefahr

Entflammbares Material stellt bei Verwendung leistungsstarker Laser eine Gefahrenquelle dar. Brandgefahr besteht durch brennbares Material im Strahlführungssystem, an der Bearbeitungsstelle und in der Umgebung. Die Brandgefahr ist in sauerstoffangereicherten Atmosphären erhöht (Sauerstoff wird bei manchen Laseranwendungen wie Laser-Brennschneiden verwendet) [4].

## 3.2 Umgang mit Verfahranlagen

Mehrachs-Verfahranlagen stellen aus sicherheitstechnischer Sicht durchaus ein komplexes System dar. Im Gegensatz zu vollautomatisierten Fertigungseinrichtungen ist bei der gegebenen Einrichtung ein unmittelbarer Zugang des Bedieners zum Arbeitsraum, zum Beispiel um den Werkstückwechsel durchzuführen, notwendig. Um einen möglichst hohen Grad an Zugänglichkeit zu gewährleisten und gegebenenfalls das Verletzungsrisiko zu minimieren, sollte schon in der CNC-Programmierung eine entsprechende Parkposition vorgesehen werden. Diese wird nach der abgeschlossenen Bearbeitung angefahren und soll dem Bediener erlauben ohne Gefahr das bearbeitete Werkstück zu entnehmen und neue Rohlinge einzulegen. Beim manuellen Verfahren zum Beispiel im Zuge einer Teach-In Programmierung ist besonders auf entsprechende Leitungen (Pressluft, Kühlung, Schutzgas, Faser, Datenleitungen,...) zu achten. Gerade beim Betrieb von Verfahranlagen sei auf die Labor- und Werkstatt-Ordnung der TU Wien gesondert hingewiesen.
Diese besagt auszugsweise [40]:

- Alle Einrichtungen, Geräte, Maschinen und sonstige Arbeitsmittel dürfen nur in vorschriftsmäßigem Zustand, nach Betriebsanleitung sowie nach entsprechender Einschulung eingeschaltet, genutzt und außer Betrieb gesetzt werden
- Absperrventile sind langsam zu öffnen (um Druckschläge zu vermeiden)
- Vor Inbetriebnahme ist Kenntnis zu Funktionsweise und Bedienung zu erlangen (Bedienungsanleitung)
- Vor Inbetriebnahme ist eine Kontrolle auf eventuelle Beschädigungen oder Defekte vorzunehmen

Aufgrund der beengten Platzsituation kann es in diesem besonderen Fall vorkommen, dass auch andere Mitarbeiter in unmittelbarer Nähe der Anlage Versuche oder andere Arbeiten durchführen. Gerade bei Einrichtarbeiten wie „Teach-In“ Programmierung an der Verfahranlage müssen auch diese Kollegen in Kenntnis gesetzt werden um das Unfallrisiko möglichst gering zu halten.
Während der Bearbeitung besteht keine unmittelbare Gefahr durch die Verfahranlage, da sich, aufgrund der notwendigen Sicherheitsbestimmungen für den Betrieb der Laserquelle, ohnehin niemand innerhalb des Bearbeitungsraumes aufhalten darf.

# Kapitel 4

# Komponenten der Anlage

## 4.1 YLR-1500CT Ytterbium Faser Laser

Als Laserquelle für die untersuchten Schweißvorgänge wird ein Ytterbium Faser Laser der Firma IPG verwendet. Der YLR-1500CT ist ein Hochleistungslaser der bei einer Wellenlänge von 1070 nm eine optische Leistung von 1500 Watt produziert. Das Instrument ist klassifiziert als Hochleistungs- Klasse 4 - Laser nach 21 CFR 1040.10 und nach IEC 60825.
Obwohl die Strahlung unsichtbar ist, kann der gestreute Strahl (wie in Kapitel 3.1, Seite 26 erwähnt) irreversible Schäden an der Netzhaut verursachen. Am Bearbeitungskopf und am Werkstück kann Streustrahlung auftreten bzw. reflektiert werden. Auch wenn diese intensitätsschwächer ist als die Strahlung die für die Bearbeitung genutzt wird, kann sie Schäden an den Augen und Verbrennungen verursachen [2].

### 4.1.1 Funktionsweise

Der Faserlaser als Quelle hochintensiver Strahlung erschließt immer weitere industrielle Anwendungen, die bisher konvetionellen Lasersystemen wie dem $CO_2$- oder dem Nd:YAG-Laser vorbehalten waren. Der Grund dafür ist, neben dem hohen Wirkungsgrad und der kompakten Bauweise, die exzellente Strahlqualität. Diese beruht auf den speziellen lichtführenden Eigenschaften der Faser als verstärkendes Medium [38].
Der Faserlaser ist eine spezielle Form des Festkörperlasers. Der dotierte Kern einer Glasfaser bildet bei einem Faserlaser das aktive Medium. Es handelt sich also um einen Glaslaser mit Lichtwellenleiter-Eigenschaften. Dieser ist mit geringen Mengen eines aktiven Materials dotiert - meist handelt es sich um Neodym oder Ytterbium [26].

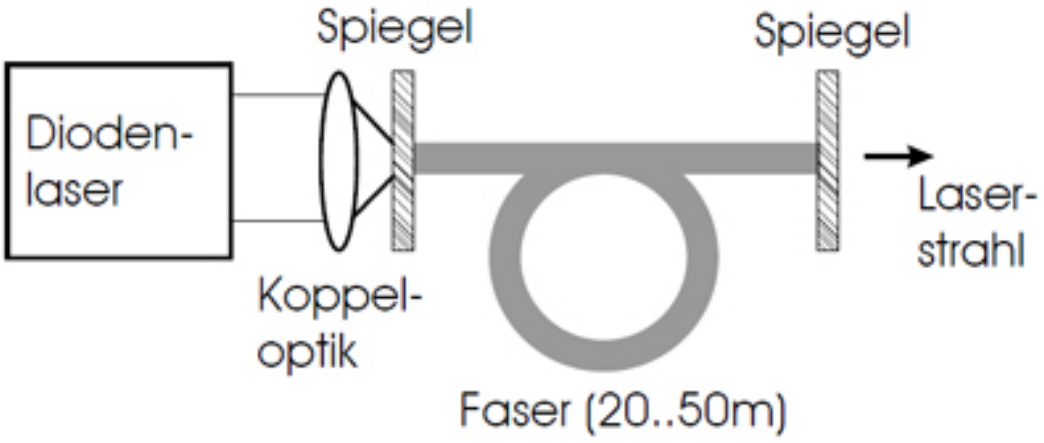



Abbildung 4.1: Schema eines Faserlasers [18]

Das Laserlicht, welches durch die Faser geleitet wird, erfährt aufgrund der großen Länge eine sehr hohe Verstärkung. Faserlaser werden optisch gepumpt, indem parallel zum Faserkern oder in diesen Strahlung von Diodenlasern eingekoppelt wird. Ein Faserlaser besteht (im Vergleich zu einem Faserverstärker) aus zwei zusätzlichen Spiegeln an seinen Endflächen, die einen Resonator bilden und somit einen kontrollierten Laserbetrieb ermöglichen. Wesentliche Vorteile dieser Bauform sind die hohe Strahlqualität des erzeugten Lichts und die gute Kühlung durch die große Oberfläche [26].
Ein weiterer Vorteil liegt in der kompakten und, gegenüber mechanischen Belastungen, robusten Bauweise. Dies erlaubt auch einen mobilen Einsatz und einen flexiblen Transport zum Beispiel innerhalb einer Anlage [20]. Positiv anzumerken ist, dass von der Strahlerzeugung in der Diode bis zur Bearbeitungsoptik der Laserstrahl die Faser nicht mehr verlässt. Damit wird eine Justierung des Lasers weitgehend überflüssig, der Wartungsaufwand wird, bei hoher Lebensdauer, minimiert.
Die Strahlqualität der emittierten Strahlung der zur Zeit am Markt verfügbaren Systeme ist mit bis zu 8mm x mrad deutlich besser als die eines vergleichbaren Nd:YAG-Lasers, seine Leistung (derzeit bis 30kW) erschließt ihm dabei zahlreiche Anwendungsfelder in der Materialbearbeitung, wie zum Beispiel hochqualitatives Schneiden, Löten und Schweißen von Metallen.
Aufgrund der hohen Strahlqualität sind dabei vergleichsweise große Arbeitsabstände (zum Beispiel Metallschweißen in einem Abstand von 1m) realisierbar, was völlig neue Möglichkeiten in der automatisierten Fertigung eröffnet, zum Beispiel das Bearbeiten schwer zugänglicher Stellen oder die Strahlablenkung mittels Spiegelscannern (Remote-Schweissen) [26].
(Anzumerken ist, dass mit Laserleistungen von bis zu 16kW und Strahlqualitäten von 2 mm x mrad die Firma TRUMPF derzeit einen der weltweit leistungsfähigsten fasergeführten Festkörperlaser in Form eines Scheibenlasers anbietet [39]).

## 4.2 Laserbearbeitungskopf BIMO

Der Laserbearbeitungskopf BIMO ist für die Bearbeitung von metallischen Werkstücken in Laserbearbeitungszellen konzipiert. Er ist ausgelegt für das Verschweißen von Blechen und unterscheidet sich von herkömmlichen Laserbearbeitungsköpfen durch seinen modularen Aufbau [1].

### 4.2.1 Prinzip der Laserbearbeitungsoptik

Das aus der Lichtleitfaser (1) heraustretende Licht formt einen kegelförmigen Strahl (2). Dieser Strahl trifft auf die Kollimationsoptik (3) und wird in einen parallelen Strahl (4) umgeformt. Die Fokussieroptik (5) fokussiert dieses Laserlicht auf den Bearbeitungspunkt (6). Hierdurch wird die notwendige Energiedichte für den Bearbeitungsprozess erreicht [1].

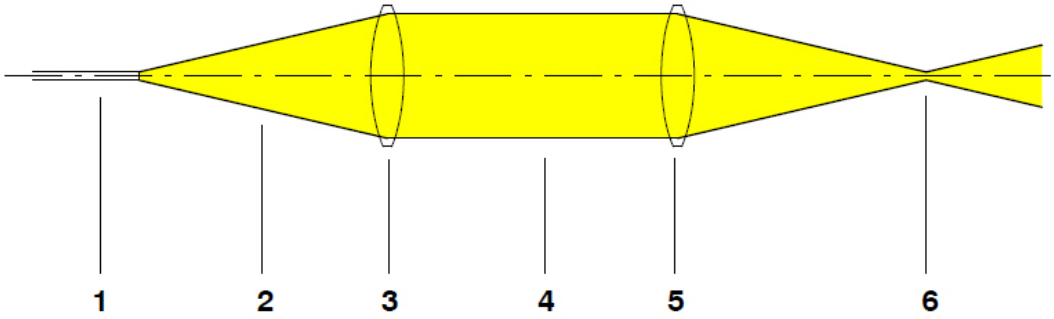



Abbildung 4.2: Srahlführung bei gerader Optik [1]

Durch zusätzliche optische Elemente im Bereich des kollimierten Strahls (4) kann die Strahlform beeinflusst werden. So können mit Hilfe entsprechender Fokusformungsmodule zum Beispiel Doppelfokus, Linienfokus oder Ringfokus erzeugt werden.

Bei einer gewinkelten Optik besteht die Möglichkeit, einen Umlenkspiegel (7) einzusetzen, der das Laserlicht reflektiert, aber für das sichtbare Licht durchlässig ist. Dieses kann so aus der Bearbeitungsoptik, zum Beispiel in eine CCD-Kamera, geführt werden um den Prozess entsprechend beobachten zu können [1].

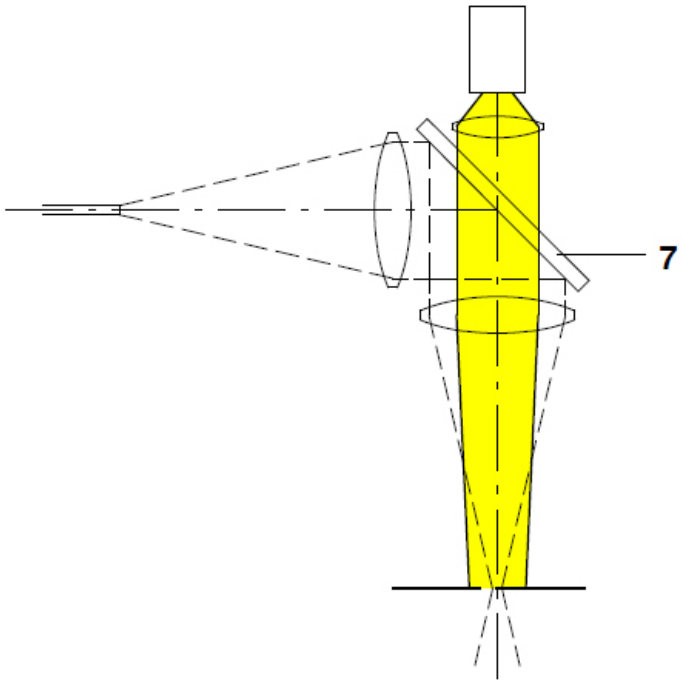



Abbildung 4.3: Srahlführung bei gewinkelter Optik [1]

Die Auskopplung für das CCD-Kamera-System ist in das Prozessbeobachtungsmodul integriert. Der Auskoppelspiegel kann schon ab Werk in verschiedenen Richtungen montiert werden.
Neben dem CCD-Kamera Modul bietet der verwendete Laserbearbeitungskopf eine Reihe an anderen, optionalen Konfigurationsmöglichkeiten wie zum Beispiel ein Crossjet-Modul oder ein Kühlmodul. Der bereits erwähnte modulare Aufbau erhöht somit zusätzlich die Flexibilität der gesamten Anlage.

## 4.3 Faser

Die Faser stellt einen optischen Wellenleiter dar in dem sich Pumplicht und erzeugte Laserstrahlung als geführte Wellen ausbreiten. Dazu besteht die Faser aus einem Kern mit Brechzahl $n_{co}$ im Inneren, der das Licht führt und einem Mantel mit der Brechzahl $n_c$. Die Ummantelung besteht aus einem Polymer und dient vor allem dem mechanischen Schutz der Faser [18]. Dieser Aufbau ist in Abbildung 4.4 verdeutlicht.

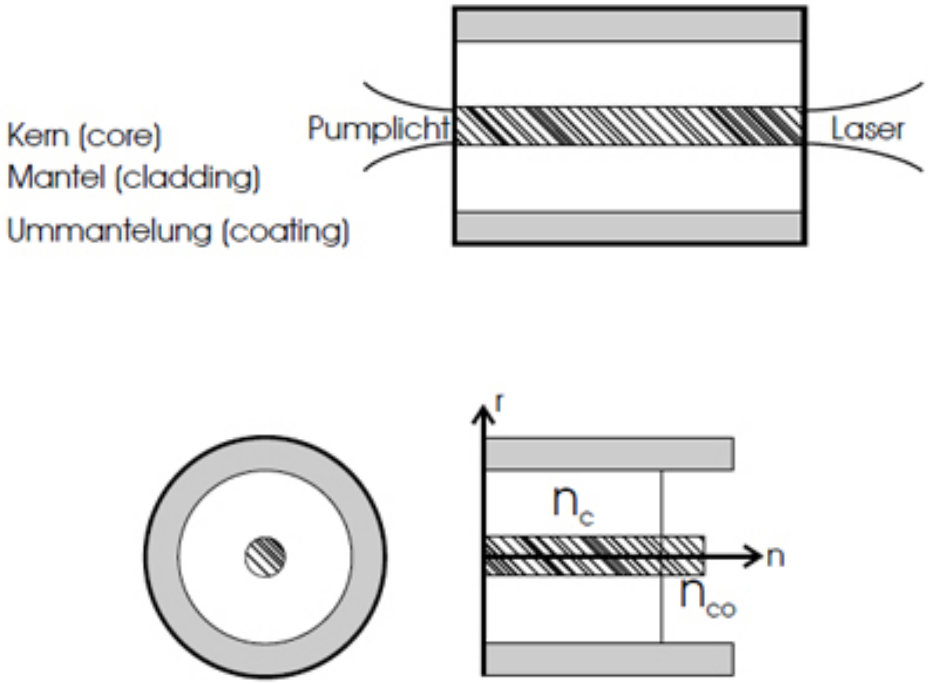



Abbildung 4.4: Aufbau der Faser [18]

Um eine bestmögliche Strahlqualität zu erhalten wird die Faser so konstruiert, dass sich in ihr nur der transversale Grundmode ausbreiten kann. Ein Kriterium dafür ist der V-Parameter [18]:

$$V_{SI} = 2\pi \frac{r_{co}}{\lambda} \sqrt{n_{co}^2 - n_c^2} = 2\pi \frac{r_{co}}{\lambda} NA \tag{4.1}$$

$V_{SI} < 2.405$ single-mode Faser
$V_{SI} > 2.405$ multi-mode Faser

$V_{SI}$ - V-Parameter

$r_{co}$ - Kernradius

$n_{co}$ - Kern-Brechzahl

$n_c$ - Mantel-Brechzahl

NA - numerische Aperatur der Faser

Aufgrund der technisch realisierbaren Brechzahlunterschiede wird somit ein kleiner Kernradius $r_{co}$ benötigt um eine single-mode Faser zu realisieren, in welcher nur der transversale Grundmode ausbreitungsfähig ist. Allerdings sind in diesem Fall auch Pumpquellen mit einer hohen Strahlqualität notwendig, um diese in eine solche Faser einkoppeln zu können [18].
Als Prozessfaser wird eine optische Faser mit 100$\mu$m Kerndurchmesser und einer Länge von 10m verwendet. Bei der Verlegung der Faser ist besonders auf die zulässigen Biegeradien der Faser zu achten um eine Beschädigung zu vermeiden.
Für die verwendete Prozessfaser gilt ein Mindest-Verlegeradius von 200mm im dynamisch belasteten Fall. Sollte keine dynamische Belastung auf die Faser wirken kann der Mindest-Verlegeradius auf 100 mm reduziert werden [2].

### 4.3.1 Energie-Kette

Um den erwähnten Mindest-Verlegeradius der Prozessfaser keinesfalls zu unterschreiten findet eine so genannte Energiekette Anwendung.

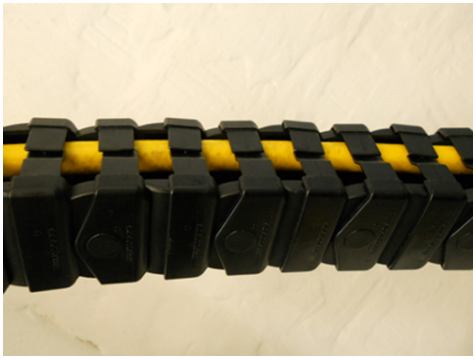


Abbildung 4.5: Die verwendete Energiekette „EasyTriFlex“

Sie gewährleistet, dass die Faser während einer dreidimensionalen Bewegung sicher geführt wird und stellt durch ihren Aufbau weiters sicher, dass ein Mindestradius nicht unterschritten wird. In diesem Fall wird eine „EasyTriFlex“ E-Kette der Firma „Igus“ verwendet in der gleichzeitig die Kühlleitungen geführt werden und die den gegebenen Ansprüchen vollends gerecht wird.

## 4.4 3-Achsen-Verfahranlage

Als Verfahranlage wird ein bereits bestehendes System einer 3-Achs-Verfahranlage entsprechend adaptiert. Die in Abbildung 4.6 gezeigte Anlage wurde am Institut gebaut um mit Hilfe eines Wechselsystems für die entsprechenden Bearbeitungsköpfe, möglichst flexibel, für die unterschiedlichsten Aufgaben zur Verfügung zu stehen.

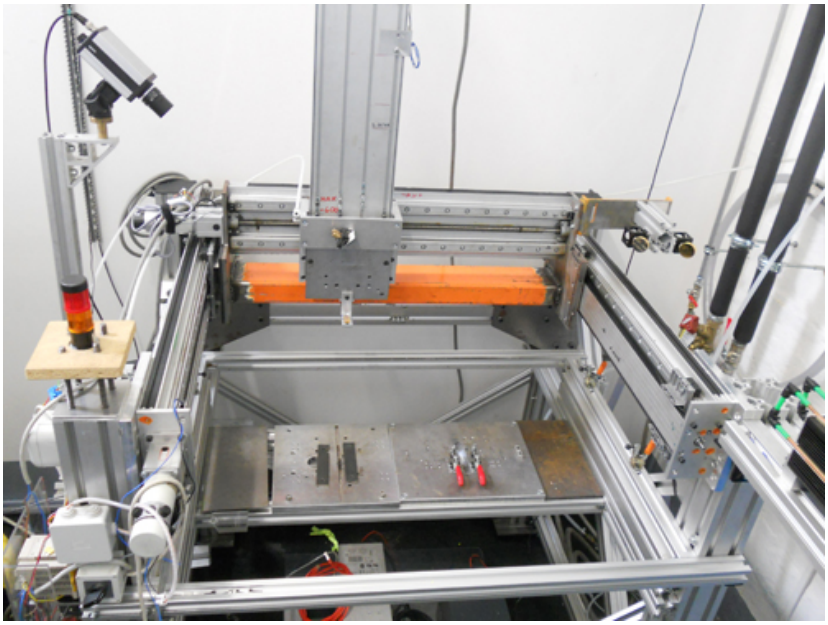


Abbildung 4.6: Die verwendete 3-Achs-Verfahranlage

Die Steuerung erfolgt über das Programmpaket „isel-Pro-DIN“ der Firma „Iselautomation“. Neben der Möglichkeit den Prozess über ein entsprechendes CNC-Programm zu steuern, können, um beispielsweise das notwendige Einrichten zu ermöglichen, alle Achsen auch manuell verfahren werden. Dies kann gegebenenfalls auch im Schrittbetrieb erfolgen.

| Verfahrweg in [mm] | x= 880 | | y= 780 | | z= 850 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Achsgeschwindigkeit in [mm/sek] | 1 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| Distanz bei Schrittbetrieb in [mm] | 0.05 | 0.1 | 1 | 5 | 10 | 50 |

Tabelle 4.1: Technische Daten der Verfahranlage

# Kapitel 5

# Aufbau der Anlage

## 5.1 Notwendige Schritte und Einrichtungen

Die folgende Aufzählung beinhaltet die notwendigen Schritte und Maßnahmen um die Schweißanlage, den Anforderungen entsprechend, aufzubauen.

- Verlegen der Prozessfaser Laser - Bearbeitungskopf
- Verlegen der Kühlleitungen Kühler – Bearbeitungskopf
- Verlegen der Datenleitungen Laser - Verfahranlage - Ansteuerung
- Verlegen der Schutzgaszuführung
- Anpassen einer Werkstückaufnahme
- Verlegen der Druckluftleitung für Crossjet
- Anfertigen einer Referenz-Auflage zum Einmessen der Fokuslage am Werkstück
- Einrichten eines Arbeitsplatzes zur Versuchssteuerung
- Einrichten der optischen Prozessüberwachung mittels zweier Kameras

## 5.2 Verlegen der Prozessfaser

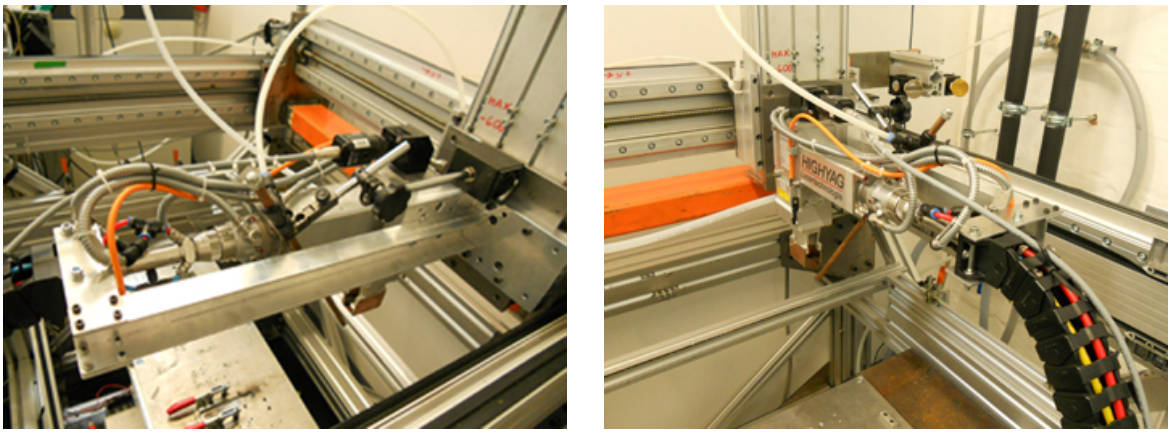
Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten musste die Prozessfaser über mehrere Meter von der Laserquelle zur Verfahranlage beziehungsweise dem Bearbeitungskopf geführt werden. Um die Bewegungsfreiheit im, ohnehin schon verhältnismäßig engen, Bearbeitungsraum nicht noch zusätzlich einzuschränken wird die Faser zum Teil in 2.6 m Höhe geführt.
Dies erlaubt zumindest im größten Teil des Raumes ein ungehindertes Bewegen ohne Mitarbeiter und Studenten zu gefährden oder die Prozessfaser zu beschädigen.
Um die zulässigen Mindest-Biegeradien nicht zu unterschreiten kommt im Bereich des Bearbeitungskopfes die in Kapitel 4.3.1 beschriebene Energiekette zur Anwendung. Diese erlaubt ein gefahrloses Handling des Kopfes beim Abbauen beziehungsweise Ablegen und schützt die Faser auch bei Bewegungen der Verfahranlage.

(a) (b)

Abbildung 5.1: Führung der Prozessfaser und der Kühlleitungen

In der Abbildung 5.1(a) ist erkennbar, dass in jenem Bereich in dem die Faser unbewegt verbleibt diese frei geführt wird. Führungsblöcke verhindern das Durchhängen der Faser die entlang eines Tragseils geführt wird.
Die durchgängige Nutzung einer Energiekette vom Laser bis zum Bearbeitungskopf würde in erster Linie einen, nicht zwingend notwendigen, finanziellen Mehraufwand bedeuten. Wie in Abbildung 5.1(b) zu sehen ist, wird in dem Bereich in dem die Prozessfaser vom Laser zum erwähnten Tragseil geführt wird, eine einfache Energiekette, die nur in einer Achse den Biegeradius begrenzt, verwendet. Dies ist möglich, da die Faser auch in diesem Bereich nicht bewegt wird.

Um die Faser im Bereich der Lichtleitkabelaufnahme optimal zu schützen wurde eine entsprechende Stützvorrichtung konstruiert die einen nahtlosen Übergang des vorhandenen Knickschutzes in die Energiekette erlaubt.




(a) (b)

Abbildung 5.2: Stützvorrichtung im Bereich der Lichtleitkabelaufnahme

Die schon angesprochene Mehrfachnutzung macht ein häufigeres An- und Abbauen des Bearbeitungskopfes notwendig. Gerade dabei erleichtert die fixe Anbindung der Energiekette das Handling ungemein.
Mithilfe dieser Vorrichtung wird die Energiekette direkt an den Träger des Bearbeitungskopfes angebunden und das umknicken der Prozessfaser wird wirkungsvoll vermieden.

## 5.3 Verlegen der Kühlleitungen

Die Kühlwasserleitungen vom Kühler zum Bearbeitungskopf werden, wie in den Abbildungen 5.1(a) und 5.1(b) erkennbar, gemeinsam mit der Prozessfaser entlang des Tragseils und durch die Energiekette geführt. Wie für die Prozessfaser reduziert sich somit auch für die Kühlwasserleitungen die Gefahr des hängen bleiben.
Bei der Einmündung zum Bearbeitungskopf wird mittels T-Verbinder MB15 Ø6 der Firma Stasto (roter Kreis in Abbildung 5.3) sowohl Vor- als auch Rücklauf geteilt um den Kühlwasserstrom zum Lichtleitkabelstecker und zur Lichtleitkabelaufnahme beziehungsweise in weiterer Folge zum Kühlmodul der Kollimation, zum Prozessbeobachtungsmodul und zum Fokussiermodul führen zu können.

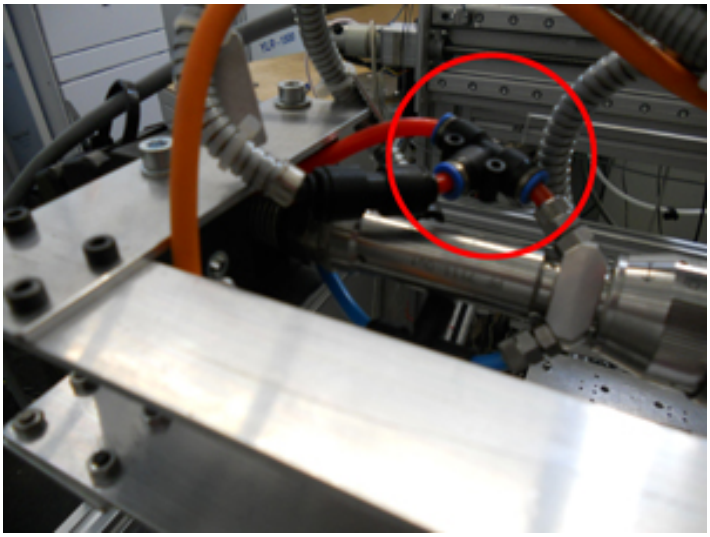


Abbildung 5.3: Teilen des Kühlwasserstroms

## 5.4 Verlegen der Datenleitungen von Laser - Verfahranlage - Ansteuerung

Um die notwendige „Vernetzung“ zwischen Laser, Verfahranlage und Ansteuerung zu ermöglichen, wurde neben den üblichen Netzwerkkabeln ein 37-poliges Datenkabel entsprechend konfiguriert und angeschlossen. Dieses erlaubt über das so genannte Hardwireing den Laser per Fernbedienung von außerhalb der Bearbeitungszelle zu aktivieren und deaktivieren. Bei der Verlegung wurde stets auf etwaiges Gefahrenpotential wie stolpern, hängen bleiben, usw. geachtet. Alle Leitungen wurden daher in entsprechend montierten Kabelkanälen, oder oberhalb der Trennwände der Bearbeitungszelle geführt.

## 5.5 Verlegen der Schutzgaszuführung

Wie bereits erwähnt wird die Verfahranlage für mehrere Versuchsanwendungen gleichzeitig genutzt. Da dabei unterschiedliche Schutzgase Anwendung finden, wird mittels Schnellkupplung ein Wechsel der entsprechenden Gase schnell und einfach ermöglicht. Wie in Abbildung 5.4 erkennbar wird durch die farbliche Unterscheidung der Zufuhrleitungen eine Zuordnung der Gase beim Wechsel zwischen den beiden Schutzgasen erleichtert. Mithilfe entsprechender Durchflussmesser (grünes Rechteck) kann der gewünschte Volumenstrom eingestellt werden. Weiters ist im linken Bereich ein Magnetventil erkennbar (roter Kreis) welches das Ein- und Ausschalten des Schutzgasstromes über die CNC-Steuerung ermöglicht.

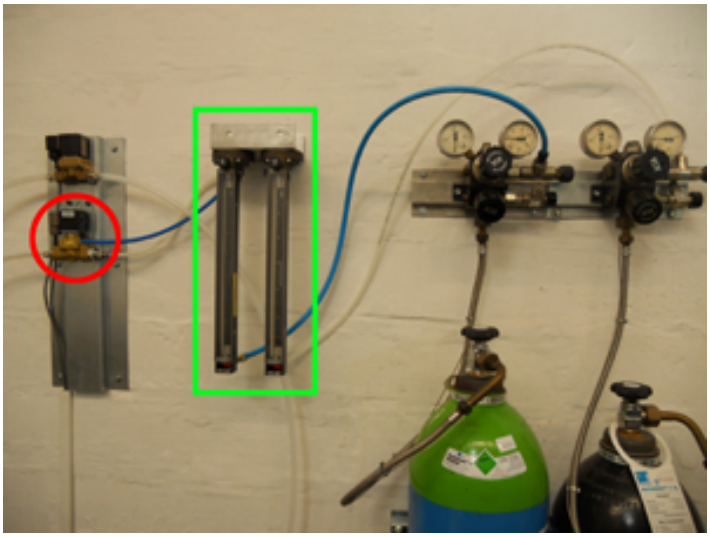


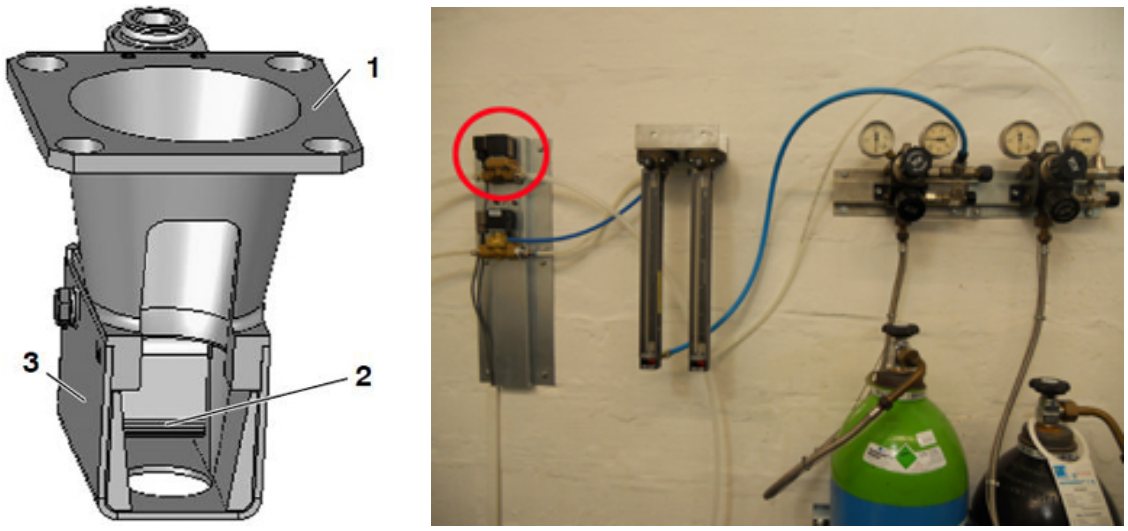
Abbildung 5.4: Schutzgaszuführung

## 5.6 Anpassen einer Werkstückaufnahme

Eine bereits vorhandene Aufnahmeplatte für Werkstücke wurde so abgeändert, dass sie für die beiden verwendeten 50x100x1.5 mm Blechproben Verwendung finden kann. In erster Linie wurden an den passenden Stellen entsprechende Passstifte vorgesehen, die für die Proben als Anschläge dienen. Somit kommt der Fügespalt bei allen Proben an gleicher Stelle zum liegen. Außerdem wurden entsprechende Spannhebel angebracht die die beiden Probebleche in ihrer Lage fixieren. Die Aufnahme ist in Abbildung 5.6(b) im unteren Bereich erkennbar.

## 5.7 Verlegen der Druckluftleitung für den Crossjet

Die Standzeit des Schutzglases wird durch den Einsatz des Crossjet-Moduls deutlich verlängert. Der Crossjet bläst einen gebündelten Luftstrom senkrecht zur Laserstrahlrichtung vor das Schutzglas und reduziert so die Verschmutzung des Schutzglases durch Schweißspritzer oder Rauch [1].




(a) Crossjet [1] (b) Schutzgas und Druckluft

Abbildung 5.5: Crossjet-Modul und Druckluftversorgung

Das Crossjet–Modul besteht im wesentlichen aus folgenden Teilen
(siehe Abbildung 5.5(a)):

1 - Montagefläche

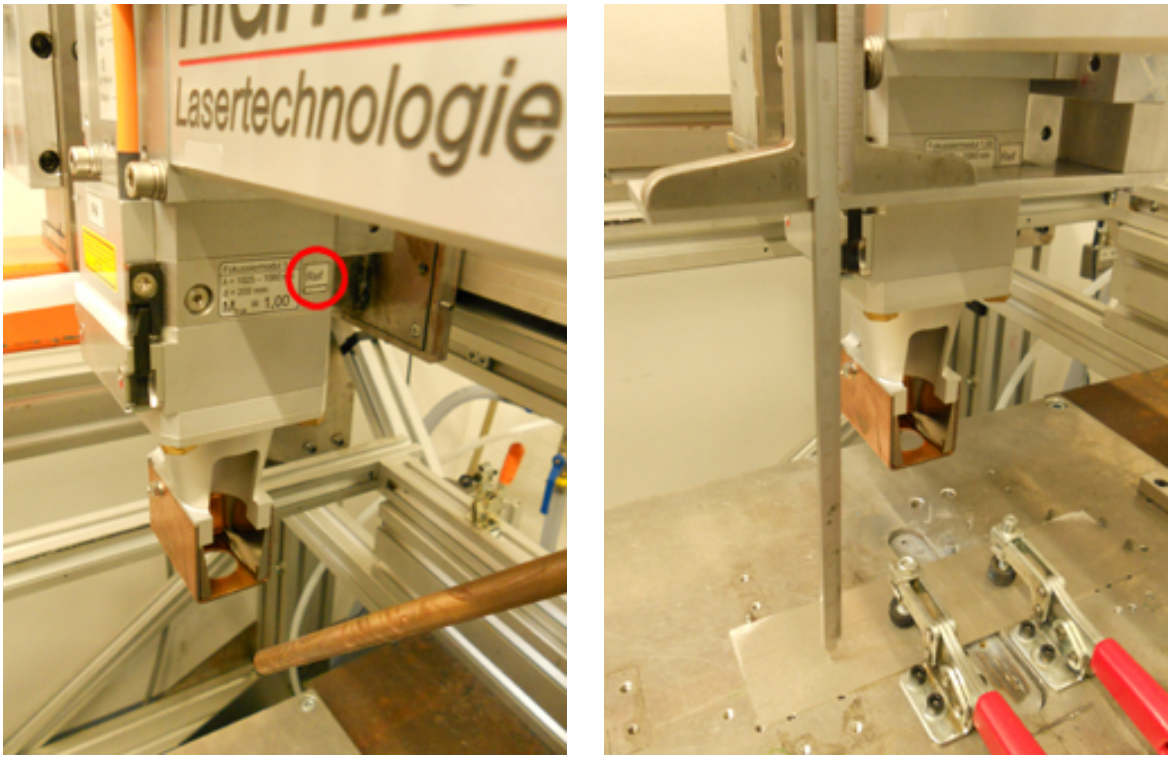
2 - Crossjet

3 - Spritzschutzabdeckung

Für die Druckluftversorgung des Crossjet-Moduls ist ein Ventil vorzusehen, dass so angesteuert wird, dass der Crossjet vor Einschalten der Laserleistung angeschaltet und erst nach Ausschalten der Laserleistung wieder abgeschaltet wird [1].
Um die Beeinträchtigung des laufenden Laborbetriebs möglichst gering zu halten, wird, wie bei der bereits beschriebenen Schutzgaszuführung, auch die Druckluft für den Crossjet über ein Magnetventil (roter Kreis in Abbildung 5.5(b)) ein- und ausgeschalten. Dies aktiviert den Crossjet nur so lange wie unbedingt notwendig, da es bei eingeschalteten Crossjet zu einer erheblichen Geräuschentwicklung kommt.

## 5.8 Anfertigen einer Referenz-Auflage zum Einmessen der Fokuslage am Werkstück

Wie in Abbildung 5.6(a) (roter Kreis) erkennbar, ist die Markierung der Referenzebene am Bearbeitungskopf in diesem Fall leider sehr unzugänglich angebracht.
Der Laser wird 200mm unterhalb dieser Referenzmarke fokussiert.




(a) (b)

Abbildung 5.6: Referenz-Auflage

Um das Einrichten und „Teachen“ der angefahrenen Punkte zu erleichtern, wurde eine Auflage für ein Tiefenmaß eingerichtet. Diese Auflage wurde in den bestehenden Träger des Bearbeitungskopfes integriert und ist somit ein fixer Bestandteil der Bearbeitungskopf-Einheit.
Wie Abbildung 5.6(b) zeigt, kann mithilfe dieser Auflage das Tiefenmaß vernünftig angesetzt und die Lage des Fokuspunktes leicht eingerichtet werden.

## 5.9 Einrichten eines Arbeitsplatzes zur Versuchssteuerung

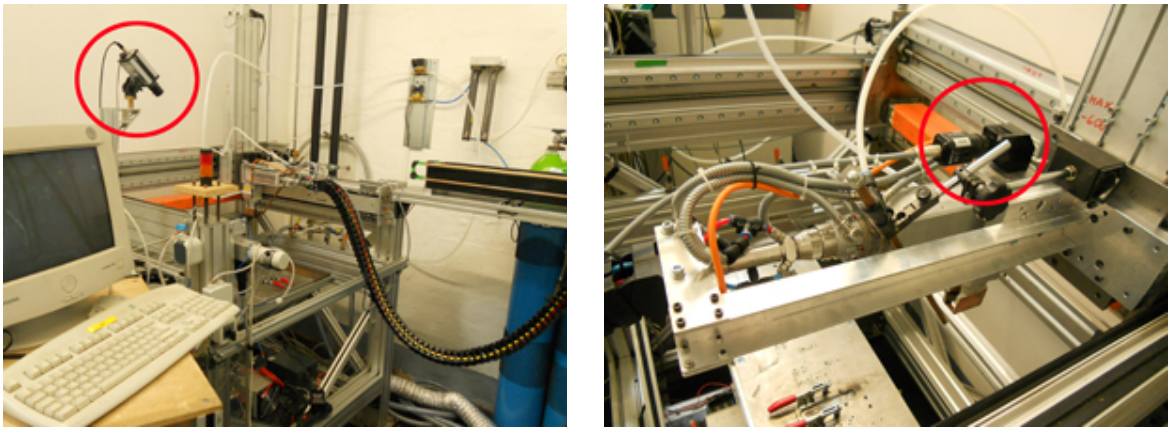
Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, können durch den verwendeten Klasse-4 Laser auch infolge des gestreuten Strahls irreversible Schäden an der Netzhaut verursacht werden. Aus diesem Grund befindet sich die Anlage vollständig in einem blickdichten, geschlossenen Raum. Aus bereits bekannten Gründen kann die Anlage prinzipiell erst in Betrieb gesetzt werden, wenn die Türe geschlossen ist und dadurch ein Interlock-System die Anlage „frei“ gibt.

Abbildung 5.7: Der Arbeitsplatz außerhalb des Bearbeitungsraumes

Infolge dieses Umstandes besteht die Notwendigkeit die Steuerung und Überwachung des gesamten Versuchsablaufes zu ermöglichen, ohne sich direkt beim Versuchsaufbau zu befinden. Dazu sind neben den beiden Bildschirmen die die Bilder der Überwachungskameras zeigen, auch zwei Monitore notwendig die einerseits das Programm für die Verfahranlage und andererseits das Steuerprogramm für den Laser darstellen.
Um die Flexibilität zu erhöhen und vor allem das „Teachen“ von Punkten bei der CNC-Programmierung zu erleichtern, ist das Eingabekeyboard für die Verfahranlage per Funk mit dem entsprechenden Computer vernetzt. Dies ermöglicht auch innerhalb des Bearbeitungsraumes ein Ansteuern der Verfahranlage beziehungsweise ein Schalten der Relais für die entsprechenden Prozessgase.
Weiters wird zur Freigabe der Laserstrahlung und Auswahl des entsprechenden Programms eine „Hardwireing-Box“ verwendet die über eine 37-polige Datenleitung mit dem Laser verbunden ist. Dadurch kann der Laser getrennt von der Computeranlage aktiviert, beziehungsweise deaktiviert werden, was eine weitere Erhöhung der Sicherheit darstellt.

## 5.10 Einrichten der optischen Prozessüberwachung mittels zweier Kameras

Wie bereits erwähnt, wird der Bearbeitungsbereich mittels Kameras beobachtet. Die notwendigen BNC-Leitungen wurden über Kabelkanäle beziehungsweise oberhalb der Trennwände des Bearbeitungsraumes geführt. In Abbildung 5.8(a)(roter Kreis) ist jene Kamera erkennbar, die ein Bild über den gesamten Bearbeitungsbereich liefert. Für diese Aufgabe wurde eine EYSEO Standardkamera TV 7002 1/3“ SONY SUPER HAD CCD mit entsprechendem 1/3“ Varioobjektiv (2.9-8.2mm) herangezogen.



(a) (b)

Abbildung 5.8: optische Prozessüberwachung mit zwei Kameras

Weiters findet zur Prozessbeobachtung eine weitere CCD-Kamera Anwendung (siehe Abbildung 5.8(b) roter Kreis) die den Fokuspunkt des Lasers beobachtet und in Form eines Prozessbeobachtungsmoduls im Bearbeitungskopf integriert ist.

# Kapitel 6

# Untersuchtes Material

Wie in Kapitel 2.1 bereits kurz erwähnt handelt es sich bei dem verwendeten Material um die Magnesiumlegierung AZ31-O. Der Zusatz „-O“ steht für „abschlußgeglüht“, was eine bessere Umformbarkeit mit sich bringt. Die Oberfläche wurde nicht weiter behandelt und wird vom Hersteller mit „wie gewalzt“ bezeichnet. Dies bedeutet, dass entsprechende Oxidbelegungen, Schmierstoffreste und ggf. vorhandene weitere Randzonenverunreinigungen durch ausreichendes Beizen oder mechanisch zum Beispiel durch Schleifen zu entfernen sind um ein optimales Fügerergebnis zu erreichen.

| | Element | min % | max % |
|---|---|---|---|
| **Chemische Eigenschaften von AZ31:** | Al | 2.5 | 3.5 |
| | Zn | 0.6 | 1.4 |
| | Mn | 0.2 | 0.6 |
| | Si | / | 0.05 |
| | Cu | / | 0.008 |
| | Fe | / | 0.005 |
| **Physikalische Eigenschaften von AZ31:** | Dichte | 1760 | $kg/m^3$ |
| | Zugfestigkeit | 240 | $N/mm^2$ |
| | spez. elektrischer Widerstand | 92 | $n\Omega m$ |
| | Wärmeleitfähigkeit | 76.9 | W/mK |
| | Härte | 53-56 | HV10 |

Tabelle 6.1: Eigenschaften von AZ31 [42]

Die Abmessungen der Blechproben betragen, wie in Kapitel 5.6 bereits angesprochen, 50x100x1.5 mm, wobei die Bleche entlang der 50 mm Kante verschweißt wurden. Die erwähnte Vorbereitung der Fügekante erfolgte vorerst rein mechanisch durch überfräsen.

# Kapitel 7

# Versuchsvorbereitung

## 7.1 Planung der Versuchsdurchführung

Wie schon im Kapitel 2.2 angesprochen, gilt es möglichst gezielt Informationen aus den durchgeführten Versuchen zu gewinnen. Dazu benötigt man im Vorfeld eine tabellarische Übersicht der variablen Einflussgrößen mit Dimension und Festlegung der Stufen.

| | | Bezeichnung | Dimension | - | + |
|---|---|---|---|---|---|
| Variable | x1 | Leistung P | W | | |
| Einfluss- | x2 | Schweißgeschwindigkeit v | mm/sek | | |
| größe | x3 | Lage des Fokuspunktes | mm | | |
| | x4 | Schutzgasmenge | l/min | | |
| | x5 | Schutzgaszuführung | stechend | | |
| Antwort- | y1 | Porenfläche in Naht | $mm^2$ | | |
| größe | y2 | Gleichmäßigkeit der Naht | Punkte 0-10 | | |
| | y3 | durchgeschweißt | Punkte 0-10 | | |
| | y4 | Nahtdurchhang | Punkte 0-10 | | |
| | y5 | Schweißspritzer Nahtunterseite | Punkte 0-10 | | |
| | y6 | Randzone Nahtoberseite | Punkte 0-10 | | |

Tabelle 7.1: Einfluß- und Antwortgrößen

Weiters ist eine Beurteilung der Versuchsergebnisse notwendig, um in diesem Zusammenhang entsprechende Antwortgrößen definieren zu können. Eine Hilfestellung stellt dabei das Merkblatt DVS 3214 [11] dar, in den Unregelmäßigkeiten in Laserstrahlschweißnähten und deren mögliche Gründe angeführt sind. Tabelle 7.2 zeigt daraus einen Auszug.

| Unregelmäßigkeit | Entstehungsursache | Abhilfemaßnahmen |
|---|---|---|
| Wurzelüberhöhung (Nahtdurchhang) | Schweißgeschwindigkeit zu gering,<br>Spaltweite zu groß | Schweißgeschwindigkeit erhöhen, ggf. Badsicherung benutzen<br>Spaltbreite verringern |
| Nahtunterwölbung<br>Wurzelrückfall<br>Wurzelkerbe | Spaltweite zu groß<br><br>zu geringe Strahlleistung | Spaltbreite verringern<br><br>Strahlleistung erhöhen, ggf. Schweißzusatz verwenden |
| Nahtunterwölbung<br>Wurzelüberhöhung (Nahtdurchhang) | zu hohe Strahlleistung<br>Stoßkanten ggf. angefast | Strahlleistung verringern<br>Stoßkanten scharfkantig belassen |
| Kantenversatz | Positioniergenauigkeit unzureichend | sorgfältiges Spannen der zu fügenden Bauteile |
| Randkerben | verunreinigte Stoßkante<br>Art des Schutzgases falsch,<br>Schutzgasmenge falsch | Stoßkanten sorgfältig reinigen<br>Schutzgasart erproben<br>Schutzgasmenge anpassen |
| Schweißspritzer | Verunreinigte Stoßkanten, Fremdschichten | Beseitigen von z.B.: Fett, Lack, Oxidschicht,.... |
| Wurzel nicht durchgeschweißt | Strahlleistung zu gering,<br>Fokusierung nicht optimal,<br>Schweißgeschwindigkeit zu hoch | Strahlleistung erhöhen,<br>Fokusierung verbessern<br>Schweißgeschwindigkeit verring. |
| Riss | Schweißeignung nicht geg.<br>zu hoher C Gehalt | Werkstoffanalyse beachten |
| Bindefehler | Strahlfehlpositionierung<br>Strahlleistung zu gering | Strahl optimal positionieren<br>mögl. optimale Strahlleistung |
| Poren<br>Porosität<br>Lunker und Endkraterlunker | Verunreinigte Stoßkanten, Fremdschichten<br>höhere Mg und Zn Gehalte bei Al Legierungen | Reinigen der Oberfläche<br><br>Schweißgeeignete Al-Legierung verwenden |
| Porenzeile | hohe Wasserstoffaufnahme der Schmelze bei Al-Leg. | mögl. optimale Schutzgasmenge<br>Streckenenergie erhöhen |
| Porennest | ggf. zu geringe Schweißgeschwindigkeit | Schweigeschw. auf erforderliche Einschweißtiefe einstellen |

Tabelle 7.2: Unregelmäßigkeiten an Laserstrahlschweißnähten [11]

| **Planmatrix** | | | | | | **unabhängige Variablen** | | | | | | | | **Antwortmatrix** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **I**<br>**0** | **1**<br>**25** | **2**<br>**15** | **12**<br>**34** | **3**<br>**45** | **13**<br>**24** | **14**<br>**23** | **4**<br>**35**<br>**123** | **y1** | **y2** | **y3** | **y4** | **y5** | **y6** |
| **1** | - | - | - | - | | + | - | - | + | - | + | + | - | | | | | | |
| **2** | + | - | - | + | | + | + | - | - | - | - | + | + | | | | | | |
| **3** | - | + | - | + | | + | - | + | - | - | + | - | + | | | | | | |
| **4** | + | + | - | - | | + | + | + | + | - | - | - | - | | | | | | |
| **5** | - | - | + | + | | + | - | - | + | + | - | - | + | | | | | | |
| **6** | + | - | + | - | | + | + | - | - | + | + | - | - | | | | | | |
| **7** | - | + | + | - | | + | - | + | - | + | - | + | - | | | | | | |
| **8** | + | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | + | + | | | | | | |
| **Effektmatrix** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | . | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 7.3: Versuchsplan

Nach den Regeln der statistischen Versuchsplanung wird die Planmatrix erstellt (siehe Tabelle 7.3). Die Planmatrix in Verbindung mit dem Verzeichnis der Einflussgrößen ist eine Anweisung für die Durchführung der Versuche, die ebenso kurz wie übersichtlich und unmissverständlich ist [34].
Der Umfang der Versuche und die Art der Durchführung ist, mithilfe der Planmatrix, auf einen Blick präzise zu erkennen. Die Anweisung für die Versuchsdurchführung muss noch durch eine Anweisung für die erforderlichen Messungen, beziehungsweise zu bestimmenden Größen, ergänzt werden. Wie in Tabelle 7.1 erkennbar, werden diese Antwortgrößen gemeinsam mit den Einflussgrößen aufgelistet.
Nach der Durchführung der Versuche können die Ergebnisse zum Beispiel durch ein gewähltes Punktesystem bewertet, und somit die Antwortmatrix gefüllt werden. Die Berechnung der Effekte lässt sich mit Hilfe der Matrix der unabhängigen Variablen sehr einfach schematisieren. Man kombiniert die Vorzeichenkolonne in der Matrix der unabhängigen Variablen (zum Beispiel von Haupteinfluss 1) mit der Antwortkolonne (zum Beispiel y1) addiert auf und dividiert durch die Anzahl der Wertepaare (=N/2). Der errechnete Betrag für den Effekt ist eine Schätzung für die Größe des Einflusses einer Variablen auf eine Zielgröße, er ist kein Kennwert. Die Effekte sind vor allem quantifizierbare Hinweise für das schnelle Auffinden des Optimums [34].

### 7.1.1 Der $2^{k-p}$ Teilfaktorplan

Für die praktische Versuchsdurchführung reichen 3 Variablen oft nicht aus. Man möchte gleichzeitig 4, 5 oder noch mehr Variablen betrachten. Ein Faktorenplan mit 4 Faktoren umfasst aber N=16 Versuche, bei 5 Faktoren steigt N bereits auf 32, und bei der Untersuchung von 6 Faktoren benötigt man N=64 Versuche. Der Experimentalaufwand wird zu groß [34].
Wie schon in Kapitel 2.2 kurz erwähnt, entstehen zwischen den einzelnen Faktoren entsprechende Wechselwirkungen. Wenn nun die 3-Faktorenwechselwirkungen vernachlässigbar klein sind, muss man sie auch nicht zwangsläufig bestimmen. Ist der Effekt 123 in einem vollständigen $2^3$-Plan annähernd null, dann kann man die zugehörige Vorzeichenspalte in der Matrix der unabhängigen Variablen mit einem neuen Faktor, dem Faktor x4 belegen. Die entsprechende Vorzeichenspalte wird in die Planmatrix übernommen. So erhält man einen Plan für die Untersuchung von 4 anstelle von 3 Variablen in 8 Versuchen. Gegenüber einem vollen $2^4$ hat man also 8 Versuche gespart. Man spricht von einem $2^{4-1}$-Plan [34].
Der neue Faktor x4 erzeugt nicht nur einen Haupteffekt, sondern auch entsprechende Wechselwirkungseffekte. Multipliziert man die Vorzeichenkolonnen von 1 und 4 miteinander, um die Wechselwirkung 14 zu erhalten, erkennt man, dass die resultierende Vorzeichenkolonne mit der Wechselwirkung 23 identisch ist. Analog findet man auch weitere derartige Vermengungen. Im Idealfall können die Wechselwirkungen 123 und alle Wechselwirkungen der Variable x4 null sein. Dann erlauben die erhaltenen Effekte unverfälschte Aussagen über die Haupteinflüsse 1, 2, 3 und 4 [34].

## 7.2 Makroskopische Bewertung

Nach der Durchführung der Schweißungen wurden die Schweißnähte vorerst einer makroskopischen, optischen Sichtprüfung unterzogen. Unter Makroskopie versteht man die grobe Beobachtung. Daraus ergibt sich eine Beurteilung die sich auf die, mit bloßem Auge, erkennbare Struktur beschränkt, beziehungsweise die Bewertung unter zu Hilfenahme einfacher, optischer Hilfsmittel wie Lupe, Fadenzähler, etc.
Diese Prüfung der Versuche liefert mit geringem Material und Zeitaufwand die ersten Anhaltspunkte über den Erfolg der Schweißungen. Da das Gefüge dabei natürlich nicht erkennbar ist, beschränkt man sich auf klassische Schweißdefekte wie Nahtdurchhang, Schweißspritzer und dergleichen.
Für den Eintrag in die Antwortmatrix der Versuchsplanung wird ein Punktesystem eingeführt. Es werden 0, 2, 4, 6, 8 oder 10 Punkte vergeben, wobei eine höhere Punktezahl einem augenscheinlich besseren Ergebnis entspricht.
In Folge können aus der Menge der Versuche jene Schweißungen ausgewählt werden, bei denen weitere metallurgische Untersuchungen sinnvoll erscheinen. Da der Aufwand für die weiteren Untersuchungen nicht unerheblich ist, wurden nicht alle Schweißnähte nach der makroskopischen Sichtprüfung näher untersucht.

## 7.3 Mikroskopische Bewertung

Die Metallographie ist eine metallurgische Untersuchungsmethode. Sie umfasst die optische Untersuchung einer Metallprobe im mikroskopischen Bereich mit dem Ziel einer qualitativen und quantitativen Beschreibung des Gefüges. Wichtige unerlässliche Voraussetzung für die lichtoptische (mikroskopische) Untersuchung des Gefüges ist die fachgerechte Herstellung eines Schliffes [25].
Ziel ist es, Gefügeunregelmäßigkeiten beziehungsweise Schweißdefekte wie Lunker, Einschlüsse, Risse, etc. zu erkennen, die durch die vorangegangene, makroskopische, optische Sichtprüfung nicht erkennbar waren.

### 7.3.1 Vorgangsweise beim Anfertigen der Schliffbilder

In Folge werden die einzelnen Schritte die zum Anfertigen eines Schliffbildes und zur Untersuchung der Proben notwendig sind angeführt:

#### Einzeichnen der „Schnittebenen“

Ein Teil der Probe wird zum Anfertigen eines Schliffbildes genutzt, der andere Teil wird radiologisch untersucht. In der beispielsweise gewählten Abbildung 7.1 ist die Trennlinie zwischen den beiden Teilen durch grüne Pfeile gekennzeichnet.
Im oberen Teil der Probe, die mithilfe der Radiologie untersucht wird, sind weitere Trennlinien eingezeichnet falls auch dieser Teil der Probe zum Anfertigen weiterer Schliffbilder getrennt werden muss.

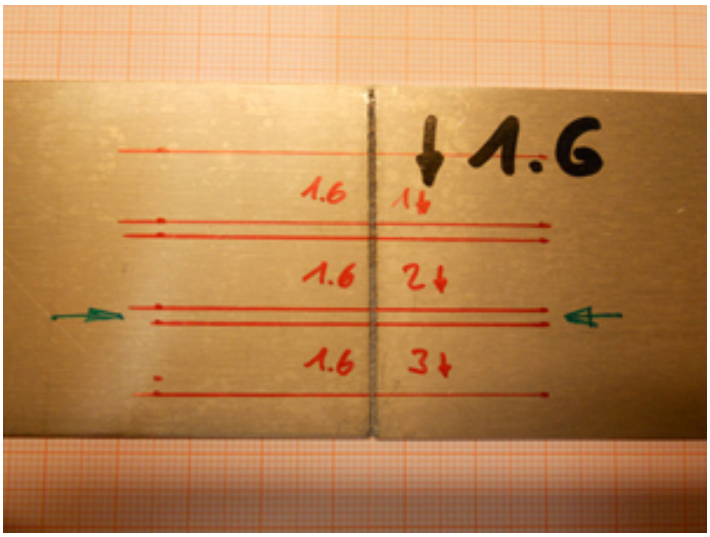
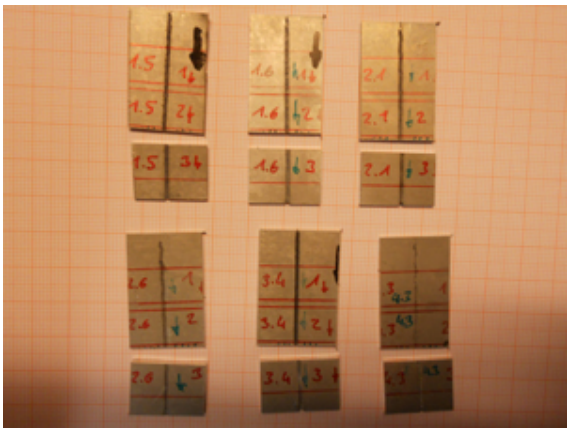



Abbildung 7.1: Angezeichnete Schnittebenen auf Probe 1.6

### Trennen der Proben

Die einzelnen Probestücke wurden mittels einer „Struers Discotom-2“ Trennmaschine mit einer „10S25 / 250x1,5x32mm“ Trennscheibe (Abbildung 7.2(a)), aus dem ursprünglichen Probeblech getrennt.

(a) Struers Discotom-2



(b) getrennte Proben

Abbildung 7.2: Trennen der Proben für Schliffbilder und Radiologie

### Gravieren der Nummerierung

Da die Proben in weiterer Folge gründlich gereinigt werden, wird die Nummerierung der Probe in diese eingraviert. Die Nummerierung erfolgt nach dem Muster: 1.53 = 1.Versuchsgruppe, 5.Schweißung, 3.Probeteil.

### Entgraten der Probe und Kennzeichnen der Oberkante

Mithilfe eines „Sreuers LaboPol-21“-Schleifpults wurden die Proben mit Nassschleifpapier Körnung 320 entgratet. Um später noch Informationen über die Schweißrichtung zu haben wird dabei an eine der oberen Ecken der Probe eine kleine Fase angebracht.

### Einbetten der Proben

Nach dem gründlichen Reinigen im Ultraschallreiniger und mit Ethanol, können die Proben eingebettet werden. Die Einbettung erlaubt ein einfaches Handling bei der weiteren Bearbeitung, Untersuchung und Aufbewahrung der Proben. Mithilfe spezieller Stützhilfen (Streuers Multi Clip) können mehrere Probebleche in eine Einbettung eingebracht werden.

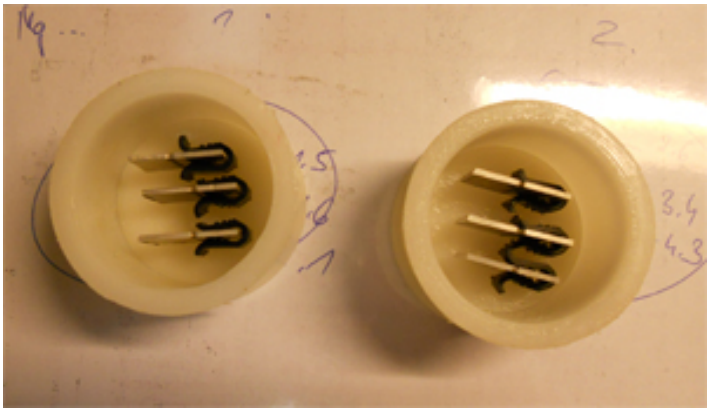


Abbildung 7.3: Eingebettete Proben 1.53, 1.63, 2.13, 2.63, 3.43 und 4.33

In Abbildung 7.3 sieht man, dass drei Proben in einer Einbettung Platz finden. Als Füllmaterial wurde Araldite Harz und REN-HY956 Härter verwendet, wobei 50g Harz und dazu passend 8,5g Härter für die beiden Einbettungen gerade ausreichen. Beim Mischen von Harz und Härter ist besonders auf langsames Rühren zu achten, da sich sonst Luftbläschen bilden, die später direkt an der Probe eingeschlossen werden können und das Untersuchungsergebnis im negativen Sinn beeinflussen. Auch beim Eingießen der Harzmasse in den Einbettungsträger sollte aus demselben Grund möglichst vorsichtig und langsam gearbeitet werden.

### Präparation der Proben

Nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden können die eingebetteten Proben aus dem Einbettungsträger gelöst, und für die weiteren Untersuchungen entsprechend präpariert werden.
Diese Präparation umfasst in erster Linie ein Einebnen beziehungsweise Planschleifen der Proben (Stufe 1) und weiters ein immer feiner werdendes Polieren der Oberfläche um etwaige Einschlüsse unter dem Lichtmikroskop erkennen zu können (Stufe 2 bis 5). Die Vorgangsweise ist in der folgenden Tabelle 7.4 ersichtlich:

| | Stufe 1 | Stufe 2 | Stufe 3 | Stufe 4 | Stufe 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Unterlage | SiC - Papier | MD-Largo für Mg | MD-Dur für Mg | MD-Mol für Mg | MD-Nap für Mg |
| Poliermittel | ohne | Diamant-suspension | Diamant-suspension | MgO | MgO |
| Korngröße | 320 (FEPA) | 9$\mu$m | 6$\mu$m | 3$\mu$m | 1$\mu$m |
| Schmiermittel | Wasser | Schmiermittel Blau | Schmiermittel Blau | MgO + Ethanol | Ethanol |
| Drehzahl | 300 $min^{-1}$ | 150 $min^{-1}$ | 150 $min^{-1}$ | 300 $min^{-1}$ | 300 $min^{-1}$ |
| Kraft | 10 N | 20 N | 20 N | Handgeführt | Handgeführt |
| Zeit | 1 min | 5 min | 6 min | ca. 7 min | ca. 7 min |

Tabelle 7.4: Präparationsdurchführung

Nach dem letzten Polierschritt ist eine intensive Reinigung mit Watte und Ethanol notwendig, um das restliche Magnesiumoxidpulver zu entfernen. Haben sich Magnesiumoxidteilchen in entsprechenden Hohlräumen festgesetzt, die durch diesen letzten Reinigungsschritt nicht entfernt werden konnten, erscheinen diese bei der Lichtmikroskopie als „grell“ leuchtende Einschlüsse.
Während der letzten beiden Polierstufen, (Stufe 4 und 5) welche dem Endpolieren entsprechen, ist der Kontakt der Proben mit Wasser zu vermeiden, da es sonst zu einer ungewollten, übermäßigen Oxidation der Proben kommt.
Die vorerst so präparierten Proben wurden bereits mit dem Lichtmikroskop untersucht. Wie die folgenden Abbildungen zeigen, sind gerade im ungeätzten Zustand Risse und Poren besonders gut erkennbar, da der Kontrast sehr hoch ist.
Das Gefüge, beispielsweise in der Wärmeeinflusszone, ist vorerst nicht erkennbar. Die Aufnahmen dienen in weiterer Folge als Vergleichsbasis zu den geätzten Proben.

### Ätzen der Proben

In weiterer Folge wurden die Oberflächen der Proben geätzt. Ätzmittel führen je nach Orientierung sowie chemischem und physikalischem Verhalten der Gefügebestandteile, zu unterschiedlich starkem chemischen Angriff. Diese feinen Veränderungen in der Oberflächenstruktur führen dann, zum Beispiel in Auflicht-Lichtmikroskopen, zur Bildentstehung [12].
Das Reflexionsverhalten wird also so verändert, dass eine Unterscheidung im Bezug auf das Gefüge ermöglicht wird. Das Ätzen ist somit ein Hilfsmittel beim Sichtbarmachen von Wärmebehandlungs-, beziehungsweise Wärmeeinflusszonen, dem Faserverlauf im verwendeten Grundmaterial und dem Rekristallisationsgefüge in der Naht selbst.
Man unterscheidet in der Metallographie unterschiedlichste Ätzverfahren, wobei in diesem Fall das so genannte „chemische Ätzen“ zur Anwendung kommt.
Die Gefügeentwicklung geschieht durch wässrige Elektrolytlösungen. Für einen bestimmten Werkstoff wird die günstigste Lösung empirisch ermittelt. Genaue Voraussagen sind praktisch nicht möglich. Je nach Art der Durchführung spricht man von Tauch- und Tropfenätzen, Ätzwaschen, Ätzen unter Reibwirkung usw. [33].
Als Ätzmittel wird 100ml $H_2O$ + 4ml 20 %ige Essigsäure $CH_3COOH$ verwendet.
Essigsäure ist eine farblose, hygroskopische Flüssigkeit mit stechendem Geruch. Sie ist mit den meisten organischen Verbindungen (Wasser, Ether, Ethanol, Glycerin etc.) mischbar. Weiters reagiert Essigsäure mit Metallen wie Eisen, Magnesium und Zink. Der Erfahrung nach ist diese Ätzlösung, in der angegebenen Konzentration, für den vorliegenden Fall gut geeignet.

Die Vorgangsweise beim Ätzen ist wie folgt:

1. Probe ca. 7 Sekunden in der Säurelösung schwenken
2. Probe mit destilliertem Wasser abspülen
3. mit Leitungswasser und Seifenlösung nachspülen
4. spülen der Probe mit Ethanol um das Wasser aus den Poren zu verdrängen
5. mit Heißluft möglichst schnell trocknen

Die verwendete Säure in der angewendeten Konzentration stellt, aufgrund der starken Verdünnung, kein besonderes Gefahrenpotential dar, dennoch sollte beim Hantieren mit Säuren immer eine gewisse Vorsicht gegeben sein. Das Tragen einer Schutzbrille und eines Labormantels ist empfehlenswert. Gegebenenfalls sind entsprechende, säurefeste Schutzhandschuhe zu tragen.
Da es sich bei einer Lösung aus Wasser und Säure handelt, ist die Regel: „Zuerst das Wasser dann die Säure“ unbedingt einzuhalten!

### 7.3.2 Verwendete Geräte bei der Präparation/Untersuchung

**Schleif-Polierautomat:**

TegraPol 31 mit TegraForce 5, halbautomatisches, metallographisches Präparationssystem für Mehrfach- und Einzelprobenpräparation.

Hersteller: Struers
Modell: Tegrapol 31
Scheibendurchmesser: 300 mm
Scheibendrehzahl: 150 bis 300 $min^{-1}$
Verwendungszweck: Präparation metallographischer Proben

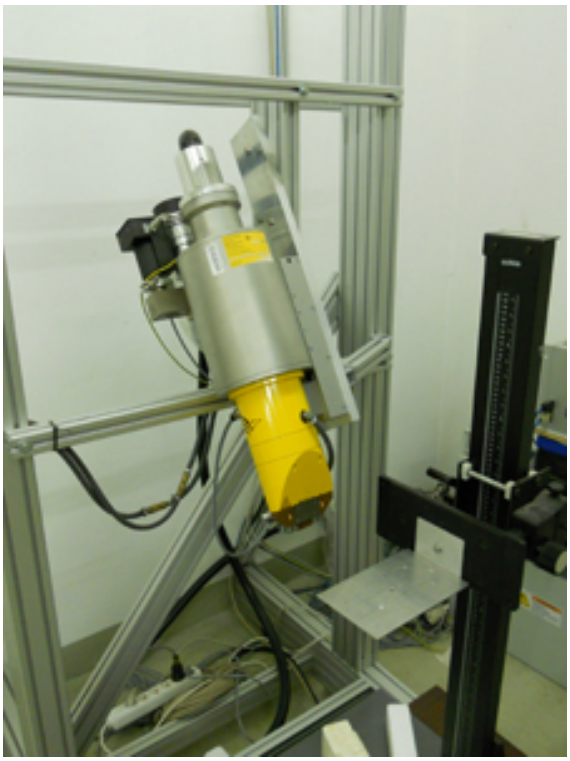
**Lichtmikroskop:**

Metallmikroskop mit Digitalkamera und angeschlossenem Bildanalysesystem - AxioVision 4.8.2.0 - Fa. Carl Zeiss MicroImaging GmbH

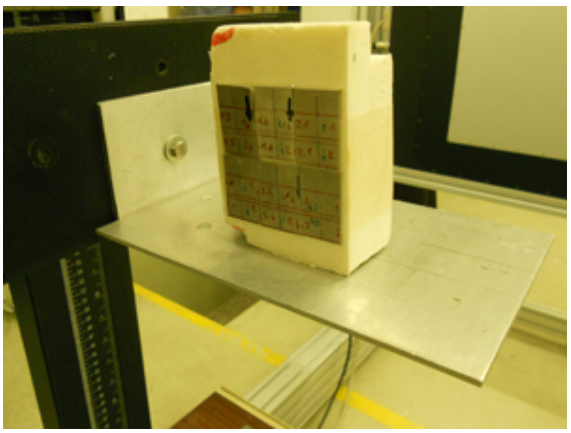
Hersteller: Zeiss
Modell: Axioplan
Digitalkamera: AxioCam MRc5 (ebenfalls der Fa. Carl Zeiss)

## 7.4 Digitale Radiografie

Bei der digitalen Radiografie handelt es sich um eine Durchstrahlungsprüfung mithilfe von Röntgenstrahlung. Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge im Bereich von 1 nm bis 1 pm. Sie sind daher in der Lage, Materie zu durchdringen. Ein Teil der Röntgenstrahlen wird beim Durchdringen eines Objektes absorbiert. Je dichter oder je dicker der durchquerte Objektbereich ist, desto mehr wird absorbiert. Wird die durchgehende Strahlung von einem geeigneten Detektor aufgenommen und je nach Intensität in verschiedenen Grautönen dargestellt, so entsteht ein Röntgenbild des Objektes [28].



(a) Röntgenröhre und Probenhalter



(b) Proben für die Durchleuchtung

Abbildung 7.4: Anordnung bei der digitalen Radiografie

Diese Durchstrahlungsprüfung eignet sich besonders zum Aufspüren von Volumenfehlern wie Poren oder Schlacken, da Inhomogenitäten auf der Abbildung gut erkennbar sind. Die digitale Radiografie erlaubt eine Durchstrahlungsprüfung in Echtzeit, weil der klassische Röntgenfilm durch einen Detektor ersetzt wird. Deshalb bezeichnet man dieses Verfahren oft auch als filmlose Durchstrahlungsprüfung.

Prinzipiell besteht das System aus einer Röntgenröhre die gegenüber dem Röntgenbilddetektor angeordnet ist. Bei diesem Detektor handelt es sich um eine Kette elektronischer Bauteile, welche im unsichtbaren Röntgenbild vorhandene Informationen in ein sichtbares Bild umwandeln. Ein guter Detektor muss möglichst kleine Unterschiede in der Intensität der Röntgenstrahlung in einen möglichst großen Kontrast umwandeln [13]. Mit einem von außen steuerbaren Manipulator wird die Probe im Strahlengang positioniert. Das Röntgenbild wird auf einem Monitor dargestellt und kann in allen gängigen Dateiformaten abgespeichert und weiter verarbeitet werden [13]

### 7.4.1 Anlagenteile der Radiografie

**Röntgenröhre:**

Hersteller: Phoenix X-Ray Systems
Modell: XS-225d
Spannung: 225 kV
Srahlleistung: 320 W
Detailerkennbarkeit: bis 1 $\mu$m
Nutzstrahlkegel: 25°

**Detektor:**

Hersteller: Perkin Elmer
Modell: Radiation Image Detector RID 1640 AL1
Detektorgröße: 400 x 400 mm
Detektorauflösung 1024 x 1024 Pixel
Abstand Röhre-Detektor 1100 mm

Die digitale Radiografie ist bei den durchgeführten, näheren Untersuchungen der ausgewählten Schweißnähte als Ergänzung zu sehen. Der Nachteil klassischer Schliffbilder bei Schweißnähten ist, dass üblicherweise ein Querschliff der Naht angefertigt wird. Dieser zeigt die Naht in ihrem Querschnitt und lässt Rückschlüsse auf Zustände wie Wärmeeinflusszone, Nahtgefüge und dergleichen zu.
Mitunter „erwischt“ man auch Defekte wie Lunker oder Gaseinschlüsse, was jedoch eher dem Zufall entspricht. Aufnahmen unter Zuhilfenahme der Radiografie geben Aufschluss über die Verteilung solcher Defekte über die gesamte Schweißnahtlänge und erlauben gegebenenfalls auch ein gezieltes Anfertigen von Schliffbildern. Die radiologischen Bilder stellen also einen Teil der Vorbereitung für die anschließende, zerstörende Untersuchung der Proben dar.

# Kapitel 8

# Erste Versuchsreihe

Die erste Versuchsreihe bestand aus 4 Versuchsgruppen zu je 8 Schweißungen. Der statistischen Versuchsplanung folgend, wurden in jeder Versuchsgruppe den Einflussgrößen 2 mögliche Werte zugewiesen (siehe beispielsweise Tabelle 8.1). Diese Werte wurden entsprechend der Planmatrix für die einzelnen Versuche kombiniert.

## 8.1 1.Versuchsgruppe

| | | Bezeichnung | Dimension | - | + |
|---|---|---|---|---|---|
| Variable | x1 | Leistung P | W | 350 | 400 |
| Einfluss- | x2 | Schweißgeschwindigkeit v | mm/sek | 25 | 35 |
| größe | x3 | Lage des Fokuspunktes | mm | -0.5 | 0 |
| | x4 | Schutzgasmenge | l/min | 20 | 40 |
| | x5 | Schutzgaszuführung | stechend | 45° | 45° |
| Antwort- | y1 | Porenfläche in Naht | $mm^2$ | | |
| größe | y2 | Gleichmäßigkeit der Naht | Punkte 0-10 | | |
| | y3 | durchgeschweißt | Punkte 0-10 | | |
| | y4 | Nahtdurchhang | Punkte 0-10 | | |
| | y5 | Schweißspritzer Nahtunterseite | Punkte 0-10 | | |
| | y6 | Randzone Nahtoberseite | Punkte 0-10 | | |

Tabelle 8.1: Einfluß- und Antwortgrößen der 1. Versuchsgruppe

### 8.1.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes

Gleich zu Beginn ist aufgefallen, dass bei allen Proben der ersten Versuchsgruppe, durchgeschweißt (y3) wurde, was einer durchgehenden Bewertung mit 10 Punkten entspricht. Im Gesamtergebnis wirkte Probe 1.6 am Besten und Probe 1.5 am Schlechtesten, beide Proben werden daher für weitere Untersuchungen herangezogen.
Der Unterschied bei den beiden Versuchen bestand in der Leistung und der unterschiedlichen Schutzgasmenge. Für die Gleichmäßigkeit der Naht (y2) scheint die Lage des Fokuspunktes eine wichtige Rolle zu spielen (Effekt -1.5). Da es sich um einen negativen Wert handelt, wäre einer Fokuslage innerhalb des Werkstückes der Vorzug zu geben. Der Nahtdurchhang (y4) dürfte neben der Leistung ebenfalls von der Fokuslage abhängig sein, wobei eine höhere Leistung nur in Kombination mit einem Fokus direkt auf der Werkstückoberfläche zu einem guten Ergebnis führt.
Da in Bezug auf die Schweißspritzer auf der Nahtunterseite (y5) die positiven Höchstwerte der Effekte bei Leistung und Schweißgeschwindigkeit liegen, muss vorerst davon ausgegangen werden, dass eine hohe Streckenenergie die Schweißspritzer reduziert. Gleichzeitig dürfte ein geringerer Schutzgasvolumenstrom von Vorteil sein (Effekt -2.5). Bei höherer Schweißgeschwindigkeit ist die Wirkdauer der Laserstrahlung punktuell geringer, was erwartungsgemäß zu einem geringeren Abbrand am Nahtrand (y6) führt.

| **Planmatrix** | | | | | | **unabhängige Variablen** | | | | | | | | **Antwortmatrix** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **I**<br>**0** | **1**<br>**25** | **2**<br>**15** | **12**<br>**34** | **3**<br>**45** | **13**<br>**24** | **14**<br>**23** | **4**<br>**35**<br>**123** | **y1** | **y2** | **y3** | **y4** | **y5** | **y6** |
| **1** | - | - | - | - | | + | - | - | + | - | + | + | - | / | **8** | **10** | **2** | **6** | **4** |
| **2** | + | - | - | + | | + | + | - | - | - | - | + | + | / | **8** | **10** | **8** | **8** | **6** |
| **3** | - | + | - | + | | + | - | + | - | - | + | - | + | / | **8** | **10** | **4** | **6** | **6** |
| **4** | + | + | - | - | | + | + | + | + | - | - | - | - | / | **6** | **10** | **6** | **10** | **10** |
| **5** | - | - | + | + | | + | - | - | + | + | - | - | + | **6** | **4** | **10** | **8** | **2** | **4** |
| **6** | + | - | + | - | | + | + | - | - | + | + | - | - | **2** | **8** | **10** | **8** | **10** | **8** |
| **7** | - | + | + | - | | + | - | + | - | + | - | + | - | / | **6** | **10** | **6** | **10** | **10** |
| **8** | + | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | + | + | / | **6** | **10** | **6** | **10** | **8** |
| | | | | | | **(1)** | **(- 1)** | **(- 2)** | **(1)** | **(2)** | **(- 1)** | **(- 2)** | **(1)** | | | | | | |
| | | | | | | **6.75** | **0.5** | **- 0.5** | **- 1.5** | **- 1.5** | **1.5** | **0.5** | **- 0.5** | | | | | | |
| **Effektmatrix** | | | | | | **10** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | | | | | | |
| | | | | | | **6** | **2** | **- 1** | **- 1** | **2** | **- 2** | **- 1** | **1** | | | | | | |
| | | | | | | **7.75** | **3.5** | **2.5** | **- 1.5** | **0.5** | **0.5** | **1.5** | **- 2.5** | | | | | | |
| | | | | | | **7** | **2** | **3** | **- 1** | **1** | **- 1** | **0** | **- 2** | | | | | | |

Tabelle 8.2: Versuchsplan für die 1. Versuchsgruppe

### 8.1.2 Ausgesuchte Abbildungen der 1.Versuchsgruppe

Bei den in Folge ausgesuchten Abbildungen handelt es sich um jene Schweißnähte die innerhalb der entsprechenden Versuchsgruppe in Bezug auf die makroskopische Untersuchung entweder besonders positiv oder negativ bewertet wurden (siehe auch Antwortmatrix im Versuchsplan der entsprechenden Versuchsgruppe).

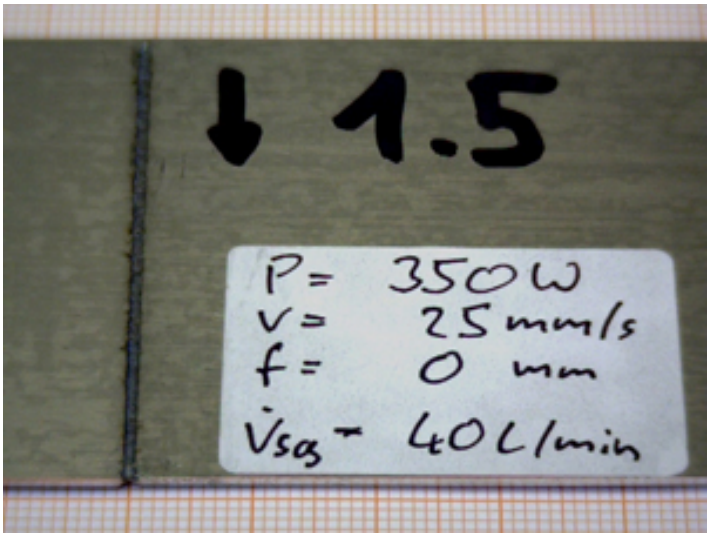
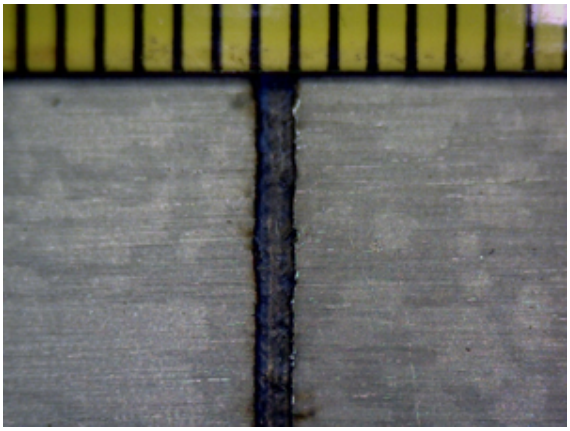
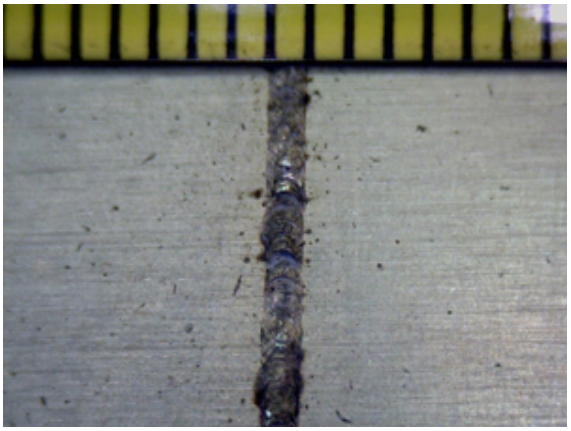



Abbildung 8.1: Probe 1.5 in voller Länge



(a) Probe 1.5 Nahtoberseite



(b) Probe 1.5 Nahtunterseite

Abbildung 8.2: Schweißnaht der Probe 1.5 im Detail

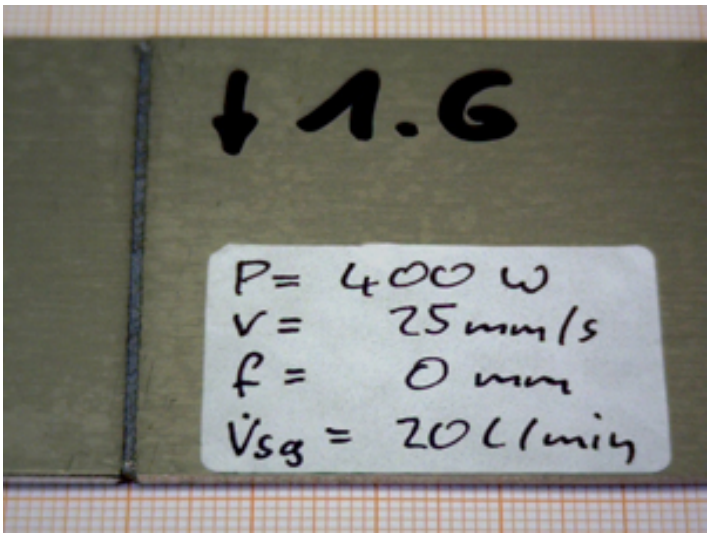
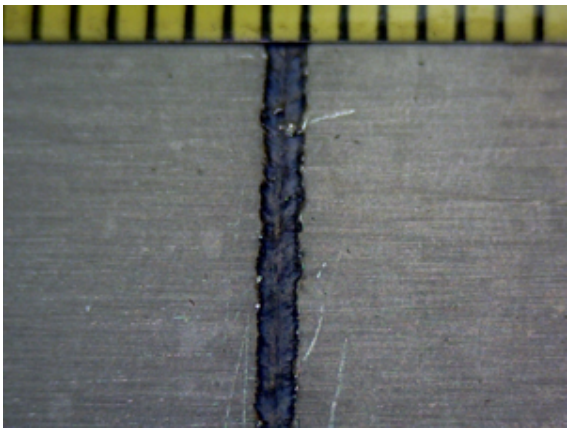
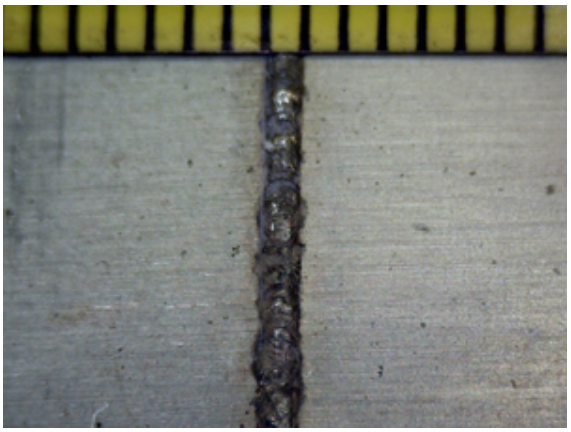



Abbildung 8.3: Probe 1.6 in voller Länge



(a) Probe 1.6 Nahtoberseite

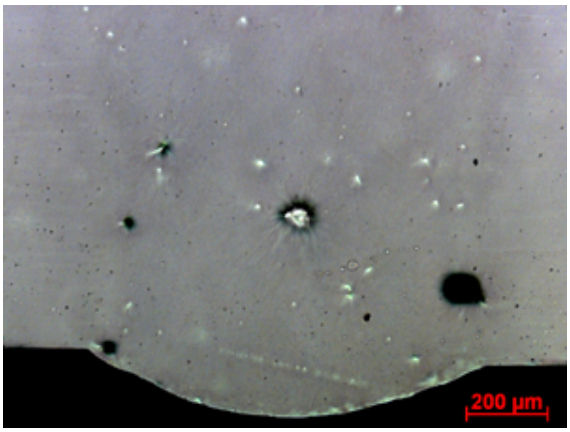


(b) Probe 1.6 Nahtunterseite

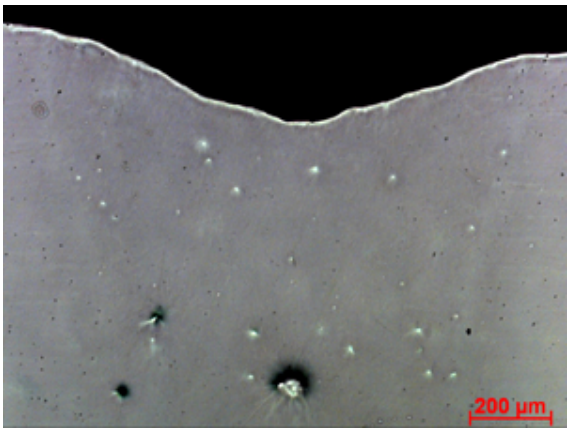
Abbildung 8.4: Schweißnaht der Probe 1.6 im Detail

### 8.1.3 Genauere Untersuchung

#### Untersuchung unter dem Lichtmikroskop



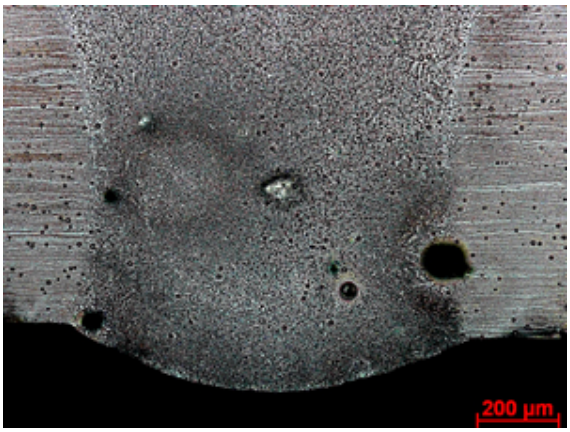

(a) Probe 1.5 100fache Vergrößerung



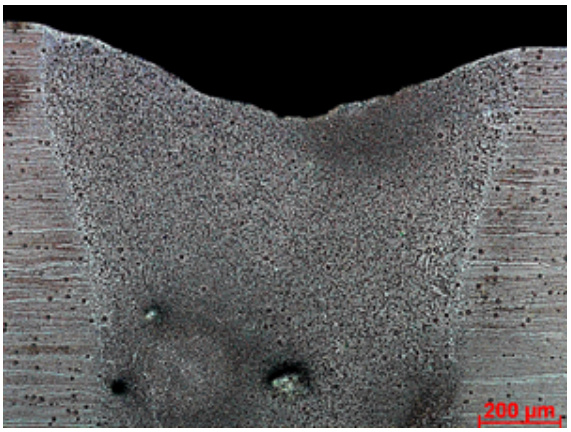

(b) Probe 1.5 100fache Vergrößerung

Abbildung 8.5: Schweißnaht 5 der Gruppe 1 im Detail

Die Abbildungen 8.5(a) und 8.5(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 1.5 im ungeätzten Zustand.



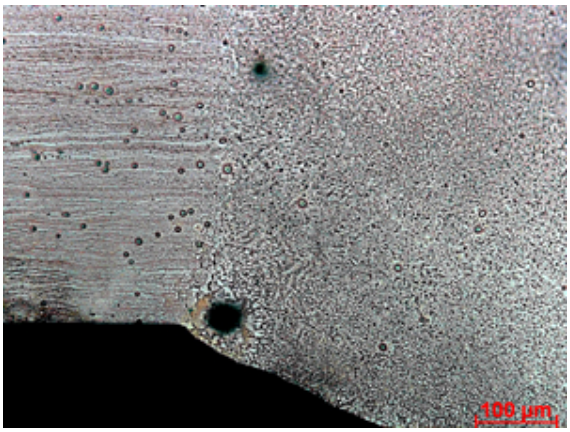

(a) Probe 1.5 100fache Vergrößerung, geätzt



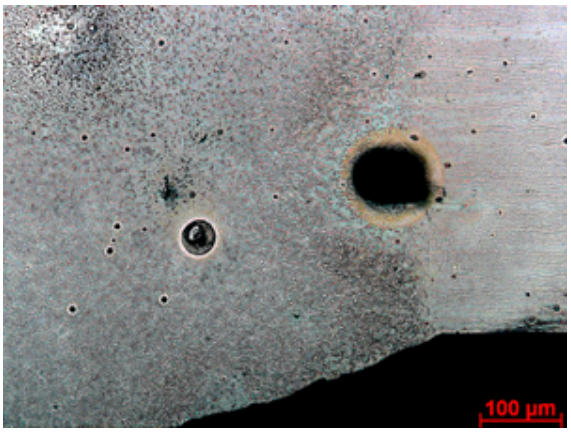

(b) Probe 1.5 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.6: Schweißnaht 5 der Gruppe 1 im Detail

Die Abbildungen 8.6(a) und 8.6(b) zeigen, dass im geätzten Zustand zum Beispiel die Wärmeeinflusszone besser, Poren oder etwaige Risse jedoch schlechter erkennbar sind.



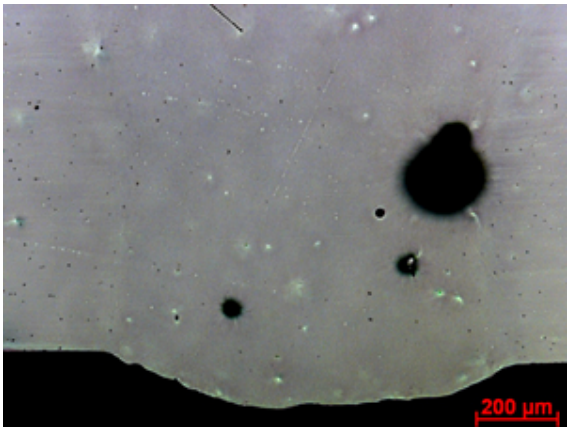

(a) Probe 1.5 200fache Vergrößerung, geätzt



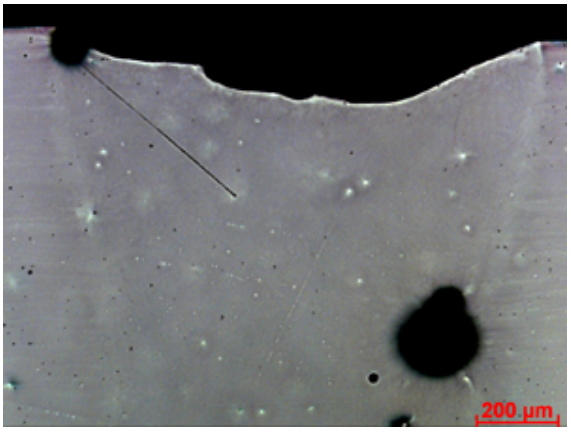

(b) Probe 1.5 200fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.7: Schweißnaht 5 der Gruppe 1 im Detail

Die Abbildungen 8.7(a) und 8.7(b) zeigen den unteren Bereich der Schweißnaht 1.5 in stärkerer Vergrößerung mit Augenmerk auf die Einschlüsse in diesem Bereich.



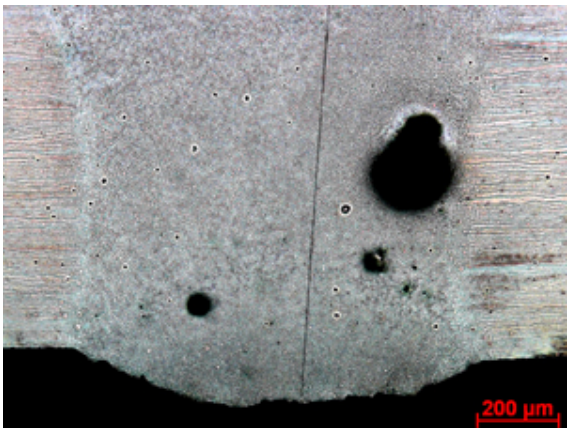

(a) Probe 1.6 100fache Vergrößerung



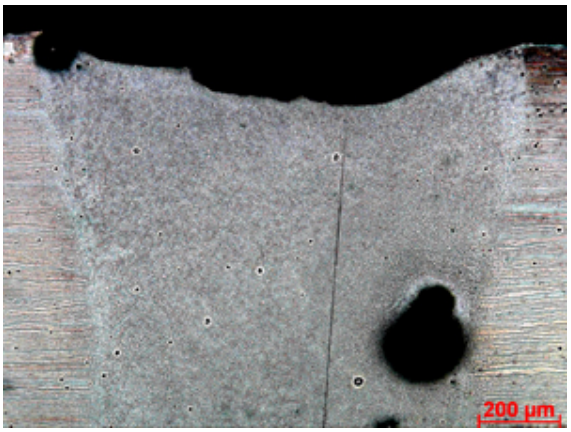

(b) Probe 1.6 100fache Vergrößerung

Abbildung 8.8: Schweißnaht 6 der Gruppe 1 im Detail

Die Abbildungen 8.8(a) und 8.8(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 1.6 im ungeätzten Zustand. Bei dem scheinbaren Riss im oberen, rechten Bereich der Naht, handelt es sich um eine oberflächliche Beschädigung der Probe in Folge von Handhabungsfehlern.



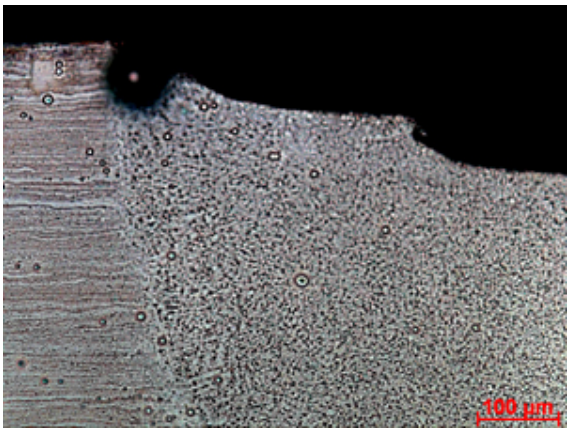

(a) Probe 1.6 100fache Vergrößerung, geätzt



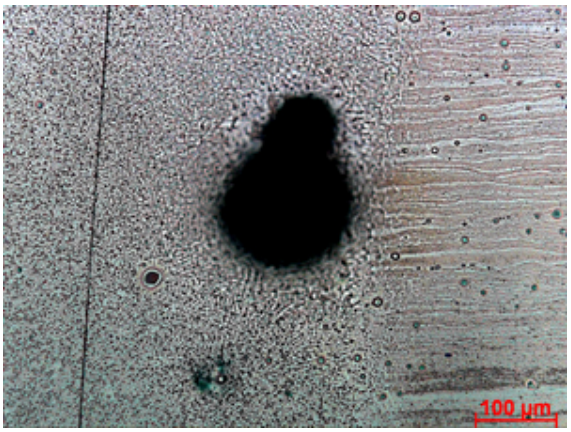

(b) Probe 1.6 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.9: Schweißnaht 6 der Gruppe 1 im Detail

Die Abbildungen 8.9(a) und 8.9(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 1.6 im geätzten Zustand. Wieder handelt es sich bei dem scheinbaren Riss im mittleren Bereich um eine oberflächliche Beschädigung der Probe.




(a) Probe 1.6 200fache Vergrößerung, geätzt

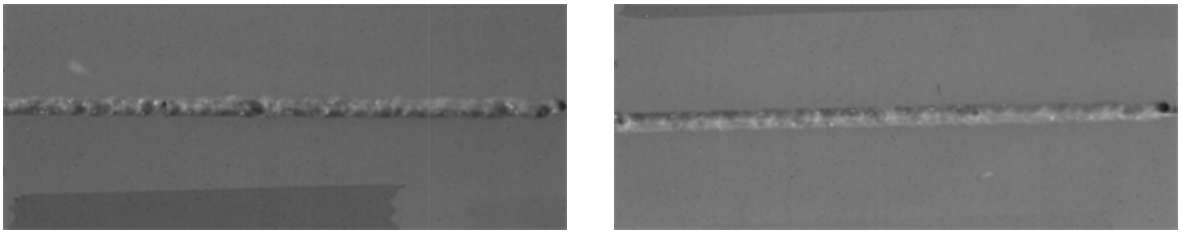



(b) Probe 1.6 200fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.10: Schweißnaht 6 der Gruppe 1 im Detail

Die Abbildung 8.10(a) zeigt den rechten, oberen Bereich der Schweißnaht 1.6, Abbildung 8.10(b) zeigt ihren linken, mittleren Bereich in 200facher Vergrößerung.

**Untersuchung durch digitale Radiografie**



(a) Probe 1.5 (b) Probe 1.6

Abbildung 8.11: radiografische Aufnahmen der Proben 1.5 und 1.6

### 8.1.4 Beurteilung der 1.Versuchsgruppe

Mithilfe der Schliffbilder wurde versucht, überschlägig einen prozentuellen Anteil der Porenfläche von der gesamten Querschnittfläche der Schweißnaht zu bestimmen. Dieser Prozentwert stellt jedoch nur eine grobe Schätzung dar, da dabei nur die größten und markantesten Poren berücksichtigt wurden. Weiters muss klar sein, dass das untersuchte Schliffbild ja nicht zwingender Weise repräsentativ für die gesamte Schweißnaht sein kann. Dennoch stellen die ermittelten Werte ein weiteres Hilfsmittel dar, die untersuchten Schweißnähte entsprechend zu bewerten.

**Probe 1.5**

Wie in Abbildung 8.6(a) erkennbar, ist es besonders im Randbereich der Schweißnaht zu Gaseinschlüssen gekommen.

| PROBE 1.5: | |
|---|---|
| Porendurchmesser in $\mu$m | Porenquerschnitt in mm$^2$ |
| 91.8 | 0.0066 |
| 44.8 | 0.0016 |
| 24.4 | 0.0004 |
| Porenquerschnittsfläche: | 0.0086 mm$^2$ |
| Nahtquerschnittsfläche: | 1.5 mm$^2$ |
| Porenanteil: | 0.577 % |

Tabelle 8.3: Poren in Schliffbild der Probe 1.5

Die Annahme, dass es sich um Gaseinschlüsse handelt, resultiert aus der eher rundlichen bis kreisrunden Erscheinung der Fehlstellen. Besonders der Einschluss im rechten

unteren Bereich ist mit einem Durchmesser von etwa 91 $\mu$m beachtlich.
In Abbildung 8.7(a) ist bei 200facher Vergrößerung die, für das Laserschweißen typische, sehr schmale (etwa 33 $\mu$m) Wärmeeinflusszone gut erkennbar.
Bei den über den gesamten Bereich der Schweißnaht und vor allem auch über das Grundmaterial verteilten kleineren dunklen Flecken, handelt es sich um Fehlstellen, die sich aus der Präparation der Proben ergeben haben. Wie zum Beispiel in Abbildung 8.5(a) erkennbar, erscheinen diese im ungeätzten Zustand leicht glänzend. Dies deutet auf einpolierte Magnesiumoxidteilchen hin, die nicht vollständig ausgespült werden konnten (MgO wurde im letzten Präparationsschritt als Poliermittel verwendet).
Selbiges gilt bei der scheinbar recht großen Fehlstelle, die in Abbildung 8.6(a) in der Mitte zu sehen ist. Wird die Vergrößerung entsprechend erhöht, wird, wie in Abbildung 8.7(b) erkennbar, klar, dass es sich um eine Reihe von Mikroporen handelt, in die ein wenig Magnesiumoxid einpoliert wurde.
Diese Mikroporen wurden bei der Berechnung des Porenanteils nicht berücksichtigt.

### Probe 1.6

Wieder haben sich im Randbereich (links oben und rechts im mittleren Bereich) markante Gaseinschlüsse gebildet.

| PROBE 1.6: | |
|---|---|
| Porendurchmesser in $\mu$m | Porenquerschnitt in mm$^2$ |
| 201.6 | 0.0319 |
| 72.8 | 0.0042 |
| 49.5 | 0.0019 |
| 79 | 0.0049 |
| Porenquerschnittsfläche: | 0.0428 mm$^2$ |
| Nahtquerschnittsfläche: | 1.5 mm$^2$ |
| Porenanteil: | 2.859 % |

Tabelle 8.4: Poren in Schliffbild der Probe 1.6

Wie Abbildung 8.10(b) zeigt, handelt es sich bei der kleineren Fehlstelle unterhalb des großen Gaseinschlusses auf der rechte Seite, wie auch in Probe 1.5, um mehrere Mikroporen, die bei geringer Vergrößerung wie ein größerer Gaseinschluss wirken.
Die radiografischen Aufnahmen 8.11(a) und 8.11(b) zeigen, dass die Häufigkeit der Gaseinschlüsse (als helle Punkte innerhalb der Schweißnaht erkennbar) bei Probe 1.5 und Probe 1.6 sehr ähnlich ist.

## 8.2 2.Versuchsgruppe

| | | Bezeichnung | Dimension | - | + |
|---|---|---|---|---|---|
| Variable | x1 | Leistung P | W | 450 | 500 |
| Einfluss- | x2 | Schweißgeschwindigkeit v | mm/sek | 40 | 45 |
| größe | x3 | Lage des Fokuspunktes | mm | -0.5 | 0 |
| | x4 | Schutzgasmenge | l/min | 30 | 50 |
| | x5 | Schutzgaszuführung | stechend | 45° | 45° |
| Antwort- | y1 | Porenfläche in Naht | $mm^2$ | | |
| größe | y2 | Gleichmäßigkeit der Naht | Punkte 0-10 | | |
| | y3 | durchgeschweißt | Punkte 0-10 | | |
| | y4 | Nahtdurchhang | Punkte 0-10 | | |
| | y5 | Schweißspritzer Nahtunterseite | Punkte 0-10 | | |
| | y6 | Randzone Nahtoberseite | Punkte 0-10 | | |

Tabelle 8.5: Einfluß- und Antwortgrößen der 2. Versuchsgruppe

### 8.2.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes

Wie bei Gruppe 1 konnten auch bei dieser Gruppe alle Proben durchgeschweißt werden (y3). Für weitere Untersuchungen wurden die Proben 2.1 und 2.6 ausgewählt, wobei Probe 2.6 dem Gesamtergebnis nach, die scheinbar beste Naht aufweist und Probe 2.1 jene Schweißnaht ist, die den geringsten Nahtdurchhang (y4) besitzt.
In Bezug auf die Gleichmäßigkeit der Naht (y2) ergibt sich im Vergleich zu Gruppe 1 leider Widersprüchliches, da der durch die Fokuslage (x3) erzeugte Effekt den Wert +1 annimmt, was bedeutet, dass die Fokuslage auf der Oberfläche des Bleches zu einem besseren Ergebnis führt. Zum Nahtdurchhang (y4) lässt sich leider keine eindeutige Aussage treffen, da es zu keinen markanten Effektunterschieden gekommen ist. Wie schon bei Gruppe 1 erkennbar, gilt für die Schweißspritzer auf der Nahtunterseite (y5) unter anderen, dass eine geringere Schutzgasmenge (x4) zu scheinbar besseren Ergebnissen führt, da der Effekt dort den negativen Maximalwert mit -3 annimmt.
Wie ebenfalls schon bei Gruppe 1 zu erkennen war, wird der Abbrand am Nahtrand (y6) bei höherer Schweißgeschwindigkeit geringer. Auffallend ist, dass nach Gruppe 2 auch die Fokuslage und der Schutzgasvolumenstrom hohen Einfluss auf den Abbrand auszuüben scheinen. Bei Fokuslage (x3) auf der Oberfläche und geringem Volumenstrom (x4) verbessert sich das Ergebnis.

| **Planmatrix** | | | | | | **unabhängige Variablen** | | | | | | | | **Antwortmatrix** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **I**<br>**0** | **1**<br>**25** | **2**<br>**15** | **12**<br>**34** | **3**<br>**45** | **13**<br>**24** | **14**<br>**23** | **4**<br>**35**<br>**123** | **y1** | **y2** | **y3** | **y4** | **y5** | **y6** |
| **1** | - | - | - | - | | + | - | - | + | - | + | + | - | **4** | **6** | **10** | **8** | **8** | **4** |
| **2** | + | - | - | + | | + | + | - | - | - | - | + | + | / | **8** | **10** | **6** | **4** | **2** |
| **3** | - | + | - | + | | + | - | + | - | - | + | - | + | / | **6** | **10** | **4** | **2** | **2** |
| **4** | + | + | - | - | | + | + | + | + | - | - | - | - | / | **8** | **10** | **6** | **4** | **6** |
| **5** | - | - | + | + | | + | - | - | + | + | - | - | + | / | **6** | **10** | **4** | **2** | **4** |
| **6** | + | - | + | - | | + | + | - | - | + | + | - | - | **4** | **10** | **10** | **6** | **8** | **8** |
| **7** | - | + | + | - | | + | - | + | - | + | - | + | - | / | **8** | **10** | **4** | **8** | **10** |
| **8** | + | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | + | + | / | **8** | **10** | **6** | **8** | **6** |
| **Effektmatrix** | | | | | | **(1)** | **(0)** | **(- 2)** | **(0)** | **(0)** | **(2)** | **(0)** | **(- 2)** | | | | | | |
| | | | | | | **7.5** | **2** | **0** | **- 1** | **1** | **0** | **0** | **- 1** | | | | | | |
| | | | | | | **10** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | | | | | | |
| | | | | | | **5.5** | **1** | **- 1** | **1** | **- 1** | **1** | **1** | **- 1** | | | | | | |
| | | | | | | **5.5** | **1** | **0** | **0** | **2** | **2** | **3** | **- 3** | | | | | | |
| | | | | | | **5.25** | **0.5** | **1.5** | **- 0.5** | **3.5** | **- 0.5** | **0.5** | **- 3.5** | | | | | | |

Tabelle 8.6: Versuchsplan für die 2. Versuchsgruppe

### 8.2.2 Ausgesuchte Abbildungen der 2.Versuchsgruppe

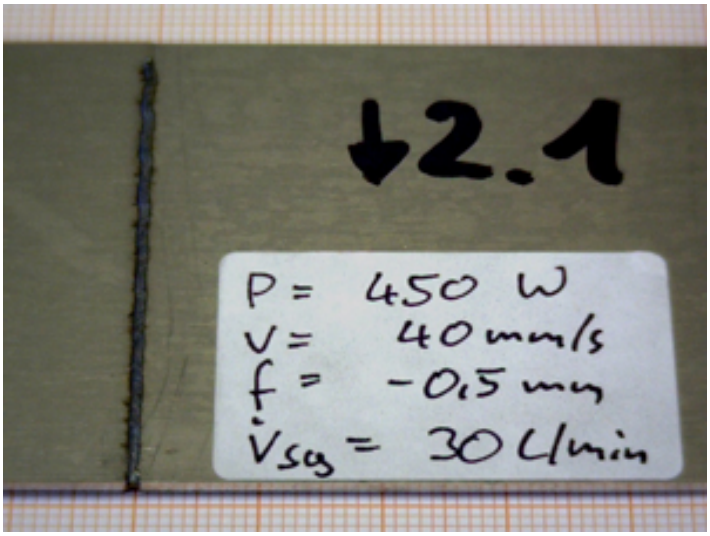
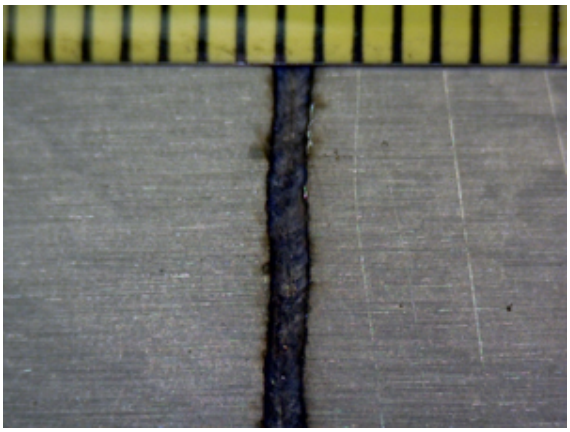
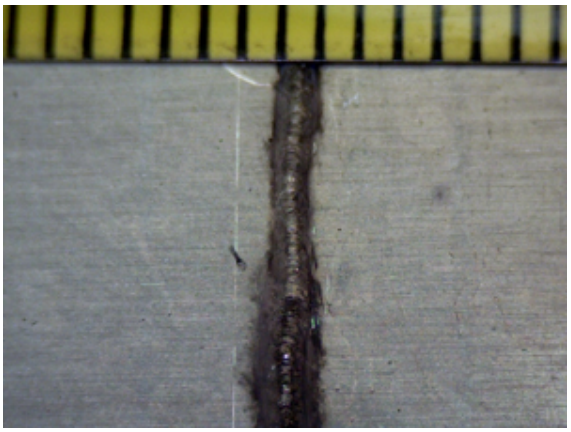



Abbildung 8.12: Probe 2.1 in voller Länge



(a) Probe 2.1 Nahtoberseite



(b) Probe 2.1 Nahtunterseite

Abbildung 8.13: Schweißnaht der Probe 2.1 im Detail

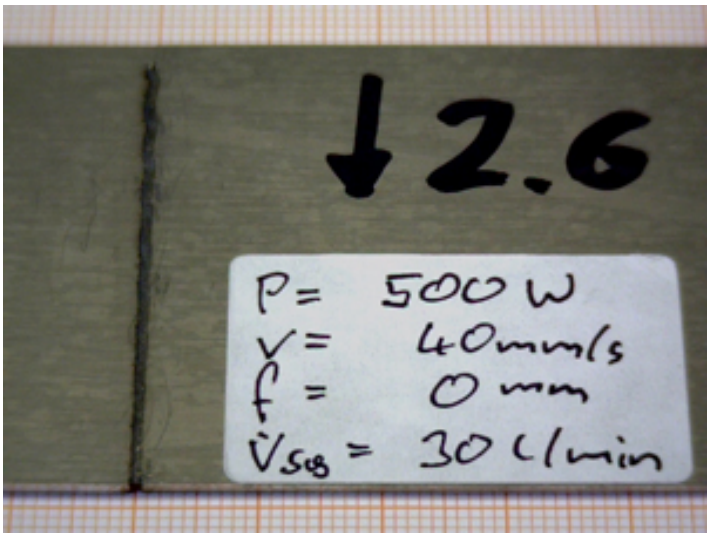
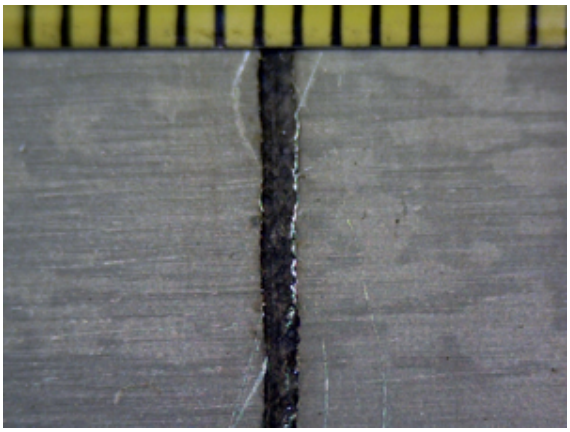
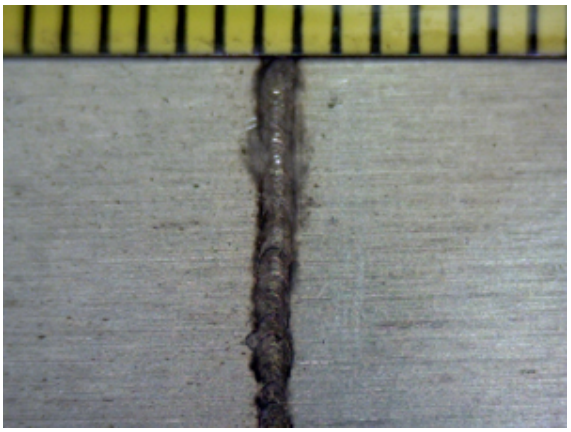



Abbildung 8.14: Probe 2.6 in voller Länge



(a) Probe 2.6 Nahtoberseite

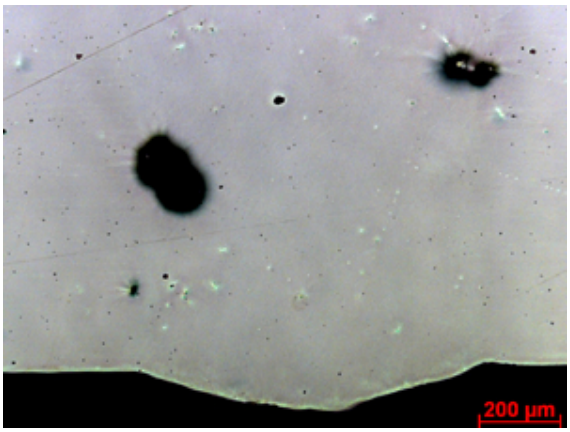


(b) Probe 2.6 Nahtunterseite

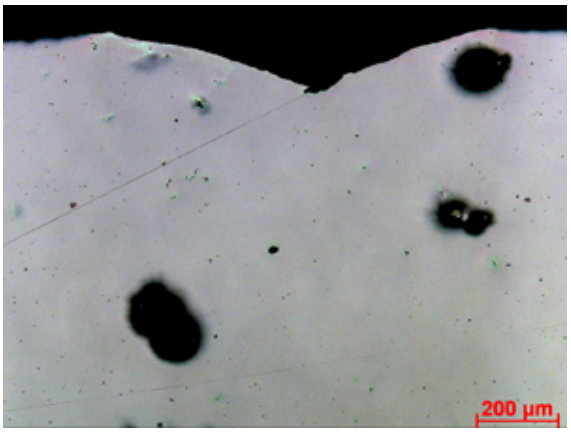
Abbildung 8.15: Schweißnaht der Probe 2.6 im Detail

### 8.2.3 Genauere Untersuchung

#### Untersuchung unter dem Lichtmikroskop



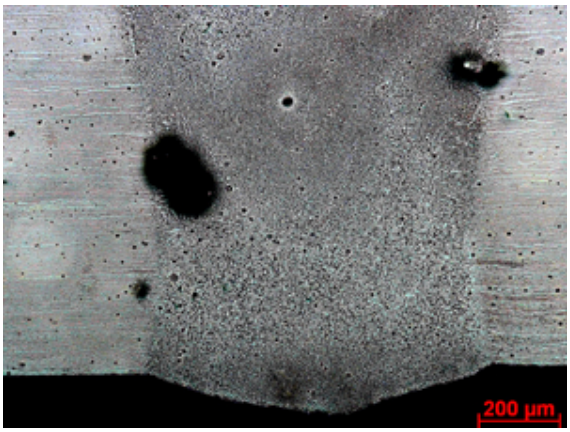

(a) Probe 2.1 100fache Vergrößerung



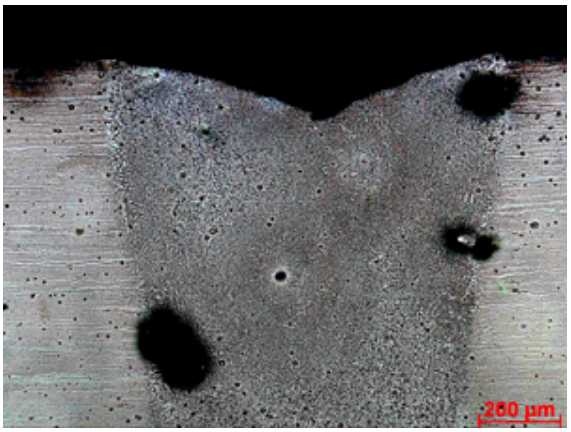

(b) Probe 2.1 100fache Vergrößerung

Abbildung 8.16: Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail

Die Abbildungen 8.16(a) und 8.16(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 2.1 im ungeätzten Zustand.



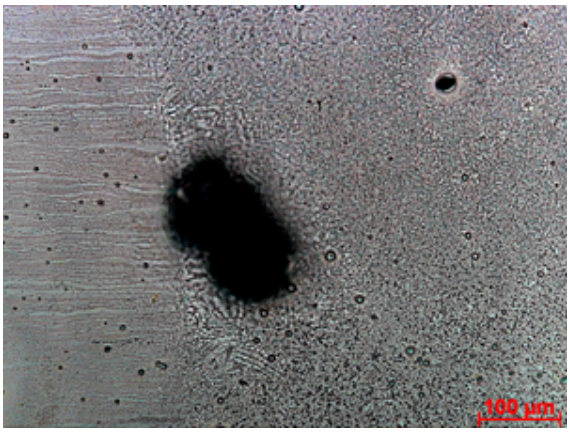

(a) Probe 2.1 100fache Vergrößerung, geätzt



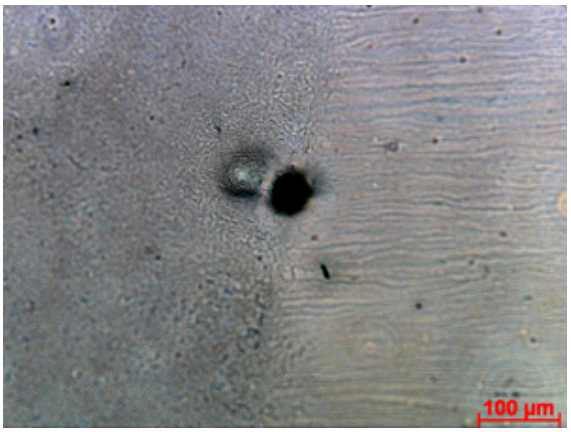

(b) Probe 2.1 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.17: Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail

Wie die Abbildungen 8.17(a) und 8.17(b) zeigen, wurde der vorher erkennbare, oberflächliche Kratzer durch das Ätzen entfernt und ist nicht mehr wahrnehmbar.



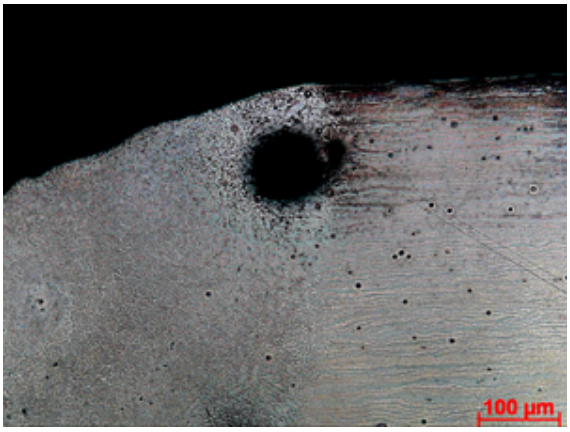

(a) Probe 2.1 200fache Vergrößerung, geätzt



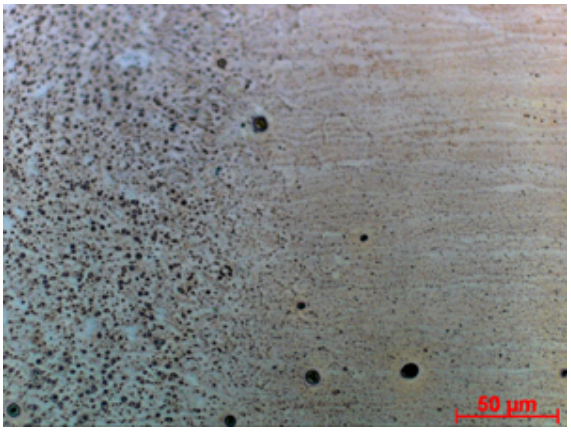

(b) Probe 2.1 200fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.18: Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail

Die Abbildung 8.18(a) zeigt den linken, mittleren Bereich der Schweißnaht 2.1, Abbildung 8.18(b) zeigt ihren rechten, mittleren Bereich in 200facher Vergrößerung.



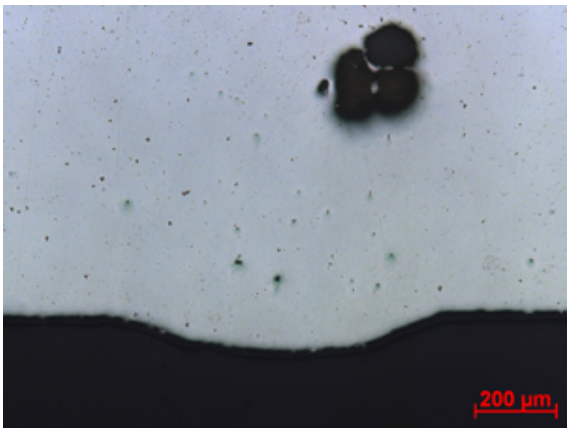

(a) Probe 2.1 200fache Vergrößerung, geätzt



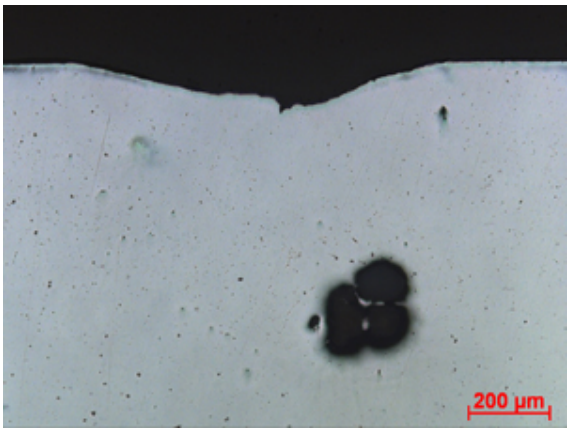

(b) Probe 2.1 500fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.19: Schweißnaht 1 der Gruppe 2 im Detail

Die Abbildung 8.19(a) zeigt den rechten, oberen Bereich der Schweißnaht 2.1, Abbildung 8.19(b) zeigt das Gefüge der Schweißnaht 2.1 im Bereich der Wärmeeinflusszone in 500facher Vergrößerung.



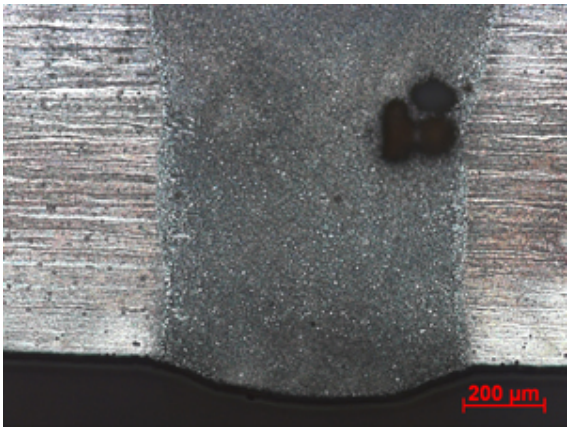

(a) Probe 2.6 100fache Vergrößerung



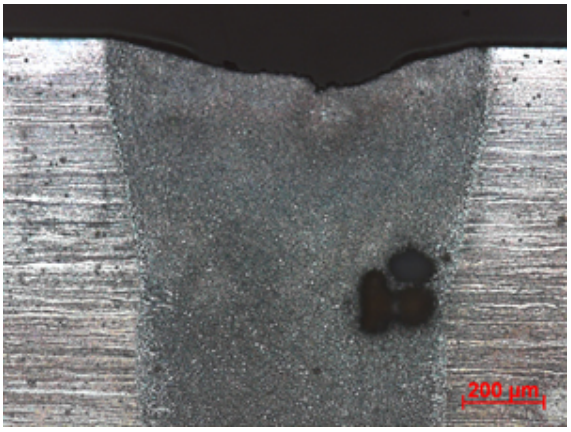

(b) Probe 2.6 100fache Vergrößerung

Abbildung 8.20: Schweißnaht 6 der Gruppe 2 im Detail

Die Abbildungen 8.20(a) und 8.20(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 2.6 im ungeätzten Zustand.



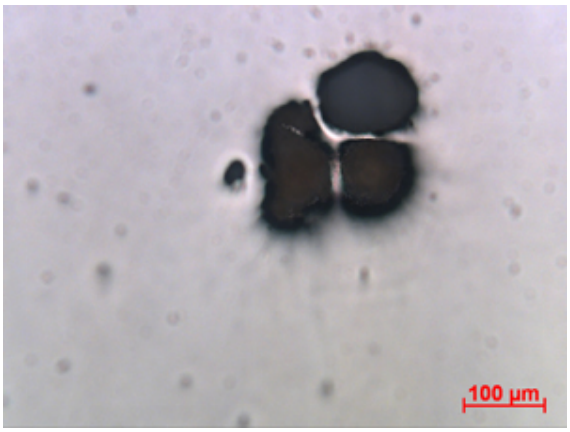

(a) Probe 2.6 100fache Vergrößerung, geätzt



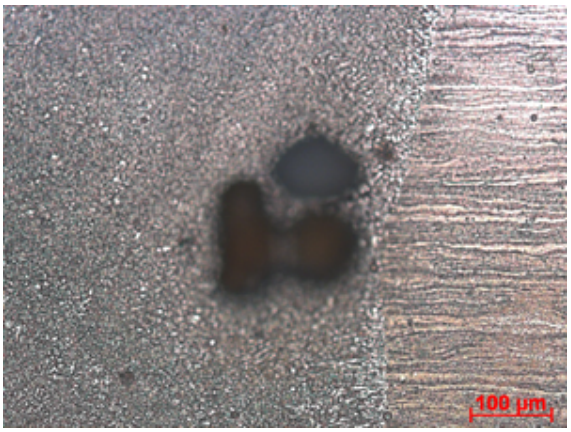

(b) Probe 2.6 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.21: Schweißnaht 6 der Gruppe 2 im Detail

Die Abbildungen 8.21(a) und 8.21(b) zeigen den geätzten Zustand der Schweißnaht 2.6.




(a) Probe 2.6 200fache Vergrößerung

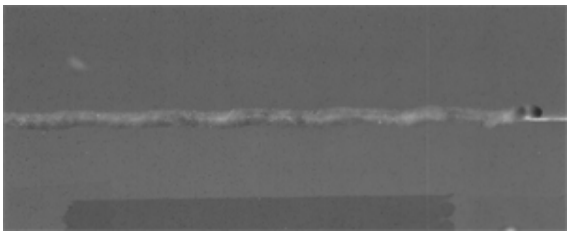



(b) Probe 2.6 200fache Vergrößerung, geätzt

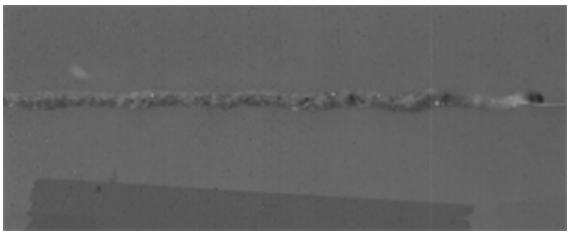
Abbildung 8.22: Schweißnaht 6 der Gruppe 2 im Detail

Die Abbildung 8.22(a) zeigt den rechten, mittleren Bereich der Schweißnaht 2.6 im ungeätzten Zustand. Abbildung 8.22(b) zeigt den gleichen Bereich im geätzten Zustand, wobei auf die Oberfläche fokusiert wurde, wodurch der Einschluss selbst etwas unscharf wirkt. Beide Aufnahmen zeigen den Bereich der Schweißnaht in 200facher Vergrößerung.

**Untersuchung durch digitale Radiografie**



(a) Probe 2.1



(b) Probe 2.6

Abbildung 8.23: radiografische Aufnahmen der Proben

### 8.2.4 Beurteilung der 2.Versuchsgruppe

#### Probe 2.1

Auch bei der zweiten Versuchsgruppe scheinen sich, wie in Abbildung 8.16(b) gut erkennbar, vor allem im Randbereich der Nähte Gaseinschlüsse gebildet zu haben.

| PROBE 2.1: | |
|---|---|
| Porendurchmesser in $\mu$m | Porenquerschnitt in mm$^2$ |
| 125 | 0.01227 |
| 50.68 | 0.00202 |
| 116.4 | 0.01065 |
| 86 | 0.00580 |
| Porenquerschnittsfläche: | 0.03074 mm$^2$ |
| Nahtquerschnittsfläche: | 1.5 mm$^2$ |
| Porenanteil: | 2.049 % |

Tabelle 8.7: Poren im Schliffbild der Probe 2.1

Wie Abbildung 8.18(b) zeigt, ist der Gaseinschluss im mittleren Bereich der rechten Seite jedoch nur etwa halb so groß wie bei anfänglicher 25facher Vergrößerung zu vermuten war.

#### Probe 2.6

Wie die Abbildungen 8.21(a) und 8.21(b) zeigen, bewegt sich der Nahtdurchhang bei der Probe 2.6 in einem durchaus Erfolg versprechenden Bereich. Wieder kommt es zu Gaseinschlüssen in der Randzone der Schweißnaht.

| PROBE 2.6: | |
|---|---|
| Porendurchmesser in $\mu$m | Porenquerschnitt in mm$^2$ |
| 201.56 | 0.0348 |
| Porenquerschnittsfläche: | 0.0348 mm$^2$ |
| Nahtquerschnittsfläche: | 1.5 mm$^2$ |
| Porenanteil: | 2.3214 % |

Tabelle 8.8: Poren im Schliffbild der Probe 2.6

Dieser geringe Nahtdurchhang bei hoher Anzahl an Poren kann mit der relativ hohen Vorschubgeschwindigkeit von 40 mm/sek zusammenhängen.
Diese hohe Schweißgeschwindigkeit führt zu sehr hohen Abkühlgeschwindigkeiten (dünne Blechproben auf massivem Werkstückträger). Dies erschwert das Ausgasen des Schweißguts und kann zu erheblicher Porenbildung führen.

## 8.3 3.Versuchsgruppe

| | | Bezeichnung | Dimension | - | + |
|---|---|---|---|---|---|
| Variable | x1 | Leistung P | W | 250 | 300 |
| Einfluss- | x2 | Schweißgeschwindigkeit v | mm/sek | 15 | 20 |
| größe | x3 | Lage des Fokuspunktes | mm | -0.5 | 0 |
| | x4 | Schutzgasmenge | l/min | 20 | 40 |
| | x5 | Schutzgaszuführung | stechend | 45° | 45° |
| Antwort- | y1 | Porenfläche in Naht | $mm^2$ | | |
| größe | y2 | Gleichmäßigkeit der Naht | Punkte 0-10 | | |
| | y3 | durchgeschweißt | Punkte 0-10 | | |
| | y4 | Nahtdurchhang | Punkte 0-10 | | |
| | y5 | Schweißspritzer Nahtunterseite | Punkte 0-10 | | |
| | y6 | Randzone Nahtoberseite | Punkte 0-10 | | |

Tabelle 8.9: Einfluß- und Antwortgrößen der 3. Versuchsgruppe

### 8.3.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes

Im Gegensatz zu der Versuchsgruppen 1 und 2 sind bei Versuchsgruppe 3 nicht alle Schweißungen durchgeschweißt (y3). Offensichtlich ist der Parameter y3 stark von der angewendeten Laserleistung abhängig (Effekt +9).
Versuche mit 300W Wirkleistung sind durchgeschweißt, Versuche mit 250W Wirkleistung nur stellenweise oder gar nicht. In der nächsten Versuchsgruppe wird daher versucht diesen Grenzbereich weiter einzugrenzen. Wieder ergibt sich ein anderer verantwortlicher Faktor für die Gleichmäßigkeit der Naht (y2), da der Effekt mit +1.5 bei der Leistung am Größten erscheint. Der Nahtdurchhang (y4) scheint sich bei geringerer Leistung zu verringern. Interessant ist, dass sich die Schweißspritzer an der Unterseite der Naht (y5) bei einer Leistung von 300W und einer Fokuslage von -0.5 mm im Werkstück dramatisch verringern.
Über den Abbrand an der Oberseite der Naht (y6) lässt sich keine genaue Aussage treffen, da die Effektwerte zwischen -1 und 0 variieren. Die scheinbar beste Schweißung ergab sich bei Versuch 4, deshalb wird die Probe 3.4 für weitere Untersuchungen herangezogen.

| **Planmatrix** | | | | | | **unabhängige Variablen** | | | | | | | | **Antwortmatrix** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **I**<br>**0** | **1**<br>**25** | **2**<br>**15** | **12**<br>**34** | **3**<br>**45** | **13**<br>**24** | **14**<br>**23** | **4**<br>**35**<br>**123** | **y1** | **y2** | **y3** | **y4** | **y5** | **y6** |
| **1** | - | - | - | - | | + | - | - | + | - | + | + | - | / | **8** | **2** | **6** | **0** | **10** |
| **2** | + | - | - | + | | + | + | - | - | - | - | + | + | / | **8** | **10** | **4** | **10** | **8** |
| **3** | - | + | - | + | | + | - | + | - | - | + | - | + | / | **8** | **0** | **8** | **0** | **8** |
| **4** | + | + | - | - | | + | + | + | + | - | - | - | - | **8** | **10** | **10** | **4** | **10** | **8** |
| **5** | - | - | + | + | | + | - | - | + | + | - | - | + | / | **8** | **2** | **8** | **0** | **8** |
| **6** | + | - | + | - | | + | + | - | - | + | + | - | - | / | **10** | **10** | **4** | **4** | **8** |
| **7** | - | + | + | - | | + | - | + | - | + | - | + | - | / | **8** | **0** | **8** | **0** | **8** |
| **8** | + | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | + | + | / | **10** | **10** | **4** | **4** | **6** |
| | | | | | | **(1)** | **(2)** | **(2)** | **(2)** | **(- 2)** | **(- 2)** | **(- 2)** | **(- 2)** | | | | | | |
| | | | | | | **8.75** | **1.5** | **0.5** | **0.5** | **0.5** | **0.5** | **- 0.5** | **- 0.5** | | | | | | |
| **Effektmatrix** | | | | | | **5.5** | **9** | **- 1** | **1** | **0** | **0** | **0** | **0** | | | | | | |
| | | | | | | **5.75** | **- 3.5** | **0.5** | **- 0.5** | **0.5** | **- 0.5** | **- 0.5** | **0.5** | | | | | | |
| | | | | | | **3.5** | **7** | **0** | **0** | **- 3** | **- 3** | **0** | **0** | | | | | | |
| | | | | | | **8** | **- 1** | **- 1** | **0** | **- 1** | **0** | **0** | **- 1** | | | | | | |

Tabelle 8.10: Versuchsplan für die 3. Versuchsgruppe

### 8.3.2 Ausgesuchte Abbildungen der 3.Versuchsgruppe

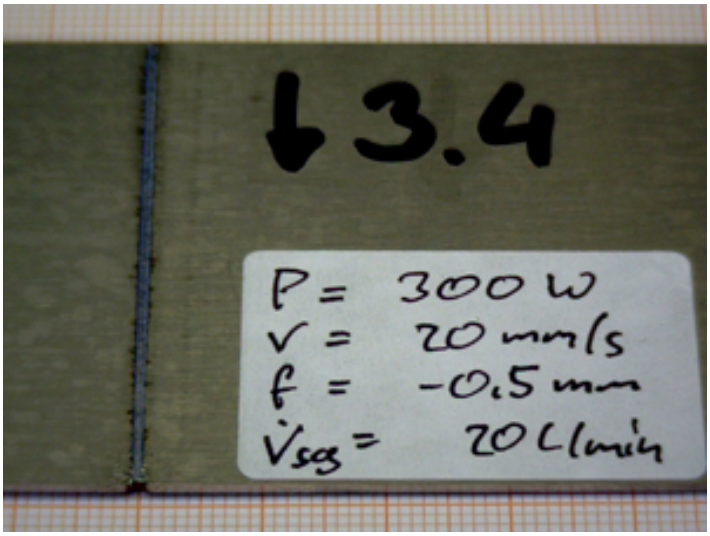
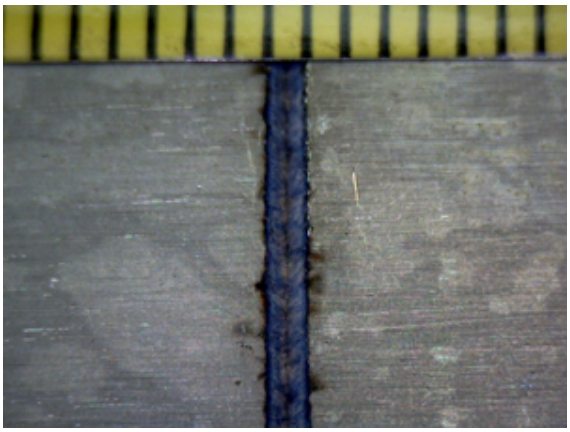
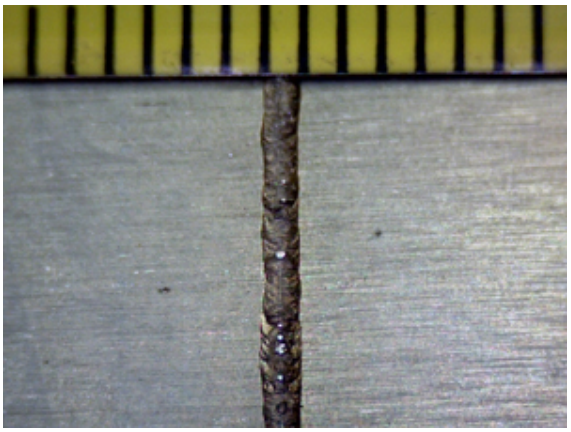



Abbildung 8.24: Probe 3.4 in voller Länge



(a) Probe 3.4 Nahtoberseite

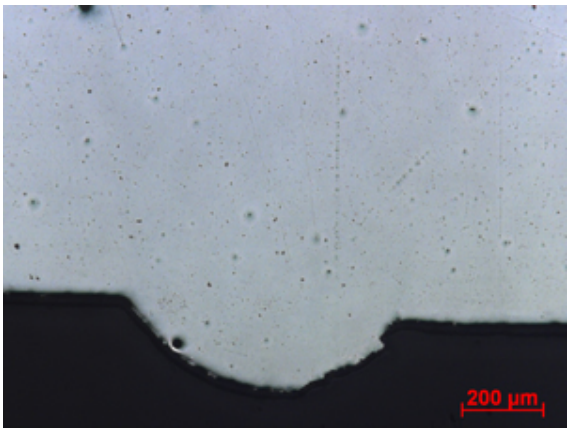


(b) Probe 3.4 Nahtunterseite

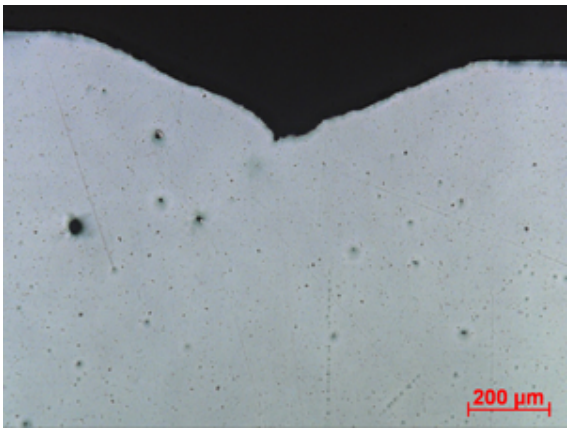
Abbildung 8.25: Schweißnaht der Probe 3.4 im Detail

### 8.3.3 Genauere Untersuchung

#### Untersuchung unter dem Lichtmikroskop



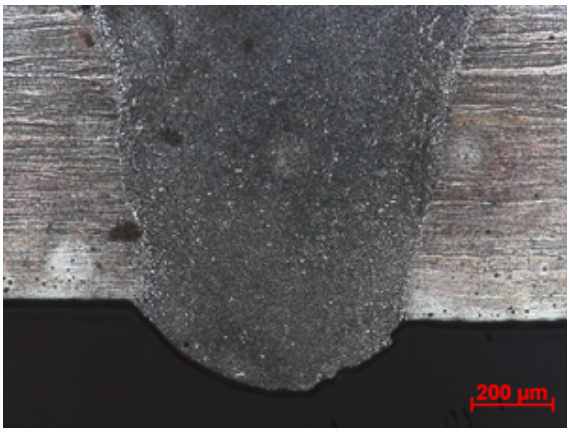

(a) Probe 3.4 100fache Vergrößerung




(b) Probe 3.4 100fache Vergrößerung

Abbildung 8.26: Schweißnaht 4 der Gruppe 3 im Detail

Die Abbildungen 8.26(a) und 8.26(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 3.4 im ungeätzten Zustand.

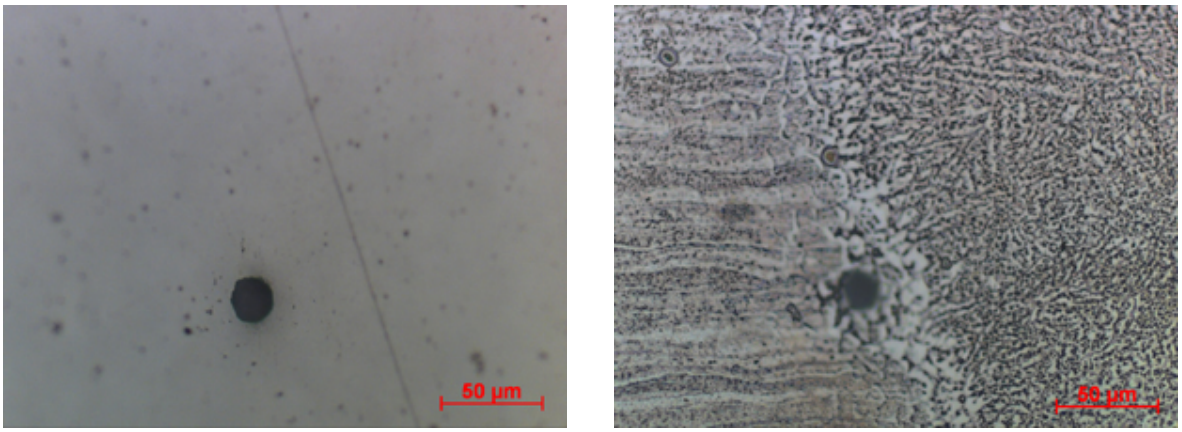



(a) Probe 3.4 100fache Vergrößerung, geätzt

(b) Probe 3.4 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.27: Schweißnaht 4 der Gruppe 3 im Detail

Die Abbildungen 8.27(a) und 8.27(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 3.4 im geätzten Zustand.




(a) Probe 3.4 500fache Vergrößerung (b) Probe 3.4 500fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.28: Schweißnaht 4 der Gruppe 3 im Detail

Die Abbildungen 8.28(a) und 8.28(b) zeigen den Einschluss im linken oberen Bereich der Schweißnaht in 500facher Vergrößerung. Im ungeätzten Zustand ist der Umriss naturgemäß etwas besser zu erkennen.

**Untersuchung durch digitale Radiografie**

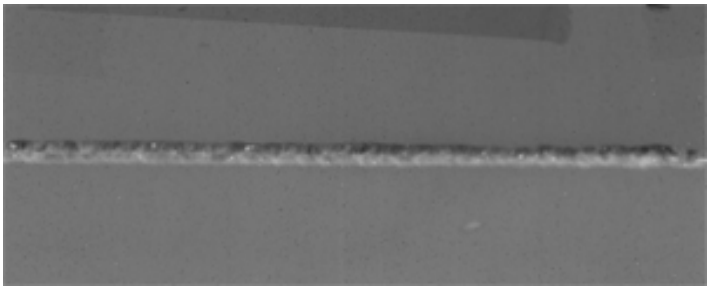


Abbildung 8.29: radiografische Aufnahme der Probe 3.4

### 8.3.4 Beurteilung der 3.Versuchsgruppe

**Probe 3.4**

Wie in den Abbildungen 8.26(a) und 8.26(b) gut erkennbar, ist es bei diesem Versuch zu einer wesentlich geringeren Porenentwicklung gekommen. Bis auf die geringe Fehlstelle im oberen linken Bereich des Querschliffes (siehe Abbildung 8.28(a)) ist es zu keinen nennenswerten Einschlüssen gekommen. Auch die radiografische Aufnahme (siehe Abbildung 8.29) zeigt eine geringere Anzahl an Poren als beispielsweise bei Probe 1.5 (siehe Abbildung 8.11(a)).

| PROBE 3.4: | |
|---|---|
| Porendurchmesser in $\mu$m | Porenquerschnitt in mm$^2$ |
| 26.88 | 0.000567 |
| Porenquerschnittsfläche: | 0.000567 mm$^2$ |
| Nahtquerschnittsfläche: | 1.5 mm$^2$ |
| Porenanteil: | 0.037 % |

Tabelle 8.11: Poren im Schliffbild der Probe 3.4

Die Fehlstellen die im linken oberen Bereich der Naht erkennbar sind, weisen im Gegensatz zu den Gaseinschlüssen einen eher kantigen Umriss auf. Dies weist darauf hin, dass es sich möglicherweise um einen typischen Präparationsfehler handeln könnte.
Dabei werden zum Beispiel beim Schleifen Partikel in die Oberfläche gedrückt, die bei der weiteren Präparation wieder herausgerissen werden, dadurch bleibt in der Oberfläche ein entsprechender Abdruck zurück. Natürlich kann es sich auch um einen Fremdkörper gehandelt haben der bereits beim Schweißen in der Schmelze eingeschlossen, und im Zuge der Präparation wieder aus dem Gefüge gelöst wurde.
Auffallend bei Schweißnaht 3.4 ist der vergleichsweise starke Nahtdurchhang, der bei den vorangegangenen Versuchen geringer ausgeprägt ist. Dieses Problem ist durchaus bekannt und es gibt diverse Anstrengungen den Ausfluss der Schmelze möglichst gering zu halten [5].
Eine mögliche Lösung stellt beispielsweise die Verwendung eines elektromagnetischen Systems dar, mithilfe dessen direkt im Schmelzbad Lorentz-Kräfte erzeugt werden, die durch ihre Wirkung die Schmelze anheben oder absenken, sowie durch ihre lokal unterschiedliche Stärke und Richtung das Strömungsverhalten in der Schmelze verändern [5]. Auch die austreibende Wirkung des Schutzgases darf nicht unterschätzt werden.
Gerade Magnesiumlegierungen weisen im flüssigen Zustand eine extrem geringe Viskosität auf, wodurch ein zu hoher Volumenstrom an Schutzgas durchaus zu einem erhöhten Nahtdurchhang führen kann.

## 8.4 4.Versuchsgruppe

| | | Bezeichnung | Dimension | - | + |
|---|---|---|---|---|---|
| Variable | x1 | Leistung P | W | 270 | 290 |
| Einfluss- | x2 | Schweißgeschwindigkeit v | mm/sek | 30 | 40 |
| größe | x3 | Lage des Fokuspunktes | mm | -0.5 | 0 |
| | x4 | Schutzgasmenge | l/min | 20 | 40 |
| | x5 | Schutzgaszuführung | stechend | 45° | 45° |
| Antwort- | y1 | Porenfläche in Naht | $mm^2$ | | |
| größe | y2 | Gleichmäßigkeit der Naht | Punkte 0-10 | | |
| | y3 | durchgeschweißt | Punkte 0-10 | | |
| | y4 | Nahtdurchhang | Punkte 0-10 | | |
| | y5 | Schweißspritzer Nahtunterseite | Punkte 0-10 | | |
| | y6 | Randzone Nahtoberseite | Punkte 0-10 | | |

Tabelle 8.12: Einfluß- und Antwortgrößen der 4. Versuchsgruppe

### 8.4.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes

Wie bereits bei Gruppe 3 (Kapitel: 8.3.1)erwähnt, wird bei Gruppe 4 versucht, den erfolgversprechenden Bereich der Leistung zwischen 250W und 300W weiter einzugrenzen.
Leider konnte bei den gewählten Leistungen (270W und 290W) keine der Proben wirklich vollständig durchgeschweißt werden. Aus diesem Grund wird auf die Beurteilung der Gruppe 4 größtenteils verzichtet, da die Aussagekraft dieser unvollständigen Schweißungen denkbar gering ist.
Dem ungeachtet, wird eine Probe der Gruppe 4 für weitere Untersuchungen verwendet. Die Probe 4.3 stellt in der 1.Versuchsserie das schlechteste Ergebnis dar. Sie wird herangezogen, um zu beurteilen wie tief die Einschweißtiefe bei so geringer Leistung (270W) bei einer Fokuslage von -0.5 mm im Werkstück ist.
Für weitere Schweißversuche ist daher ein enger Bereich um eine Wirkleistung von 300W als Grenzbereich für AZ31 Bleche mit 1.5 mm Stärke zu untersuchen.

| **Planmatrix** | | | | | | **unabhängige Variablen** | | | | | | | | **Antwortmatrix** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **I**<br>**0** | **1**<br>**25** | **2**<br>**15** | **12**<br>**34** | **3**<br>**45** | **13**<br>**24** | **14**<br>**23** | **4**<br>**35**<br>**123** | **y1** | **y2** | **y3** | **y4** | **y5** | **y6** |
| **1** | - | - | - | - | | + | - | - | + | - | + | + | - | / | **8** | **0** | **6** | **2** | **8** |
| **2** | + | - | - | + | | + | + | - | - | - | - | + | + | / | **6** | **0** | **8** | **2** | **6** |
| **3** | - | + | - | + | | + | - | + | - | - | + | - | + | **k.A** | **4** | **0** | **6** | **2** | **4** |
| **4** | + | + | - | - | | + | + | + | + | - | - | - | - | / | **6** | **4** | **6** | **6** | **2** |
| **5** | - | - | + | + | | + | - | - | + | + | - | - | + | / | **8** | **0** | **6** | **2** | **6** |
| **6** | + | - | + | - | | + | + | - | - | + | + | - | - | / | **8** | **8** | **6** | **8** | **8** |
| **7** | - | + | + | - | | + | - | + | - | + | - | + | - | / | **8** | **0** | **8** | **2** | **8** |
| **8** | + | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | + | + | / | **6** | **0** | **10** | **2** | **6** |
| | | | | | | / | / | / | / | / | / | / | / | | | | | | |
| | | | | | | **6.75** | **- 0.5** | **- 1.5** | **0.5** | **1.5** | **- 0.5** | **0.5** | **-1.5** | | | | | | |
| **Effektmatrix** | | | | | | **1.5** | **3** | **- 1** | **- 1** | **1** | **1** | **- 3** | **- 3** | | | | | | |
| | | | | | | **7** | **1** | **1** | **0** | **1** | **0** | **2** | **1** | | | | | | |
| | | | | | | **3.25** | **2.5** | **- 0.5** | **- 0.5** | **0.5** | **0.5** | **- 2.5** | **- 2.5** | | | | | | |
| | | | | | | **6** | **- 1** | **- 2** | **- 1** | **2** | **1** | **2** | **- 1** | | | | | | |

Tabelle 8.13: Versuchsplan für die 4. Versuchsgruppe

### 8.4.2 Ausgesuchte Abbildungen der 4.Versuchsgruppe

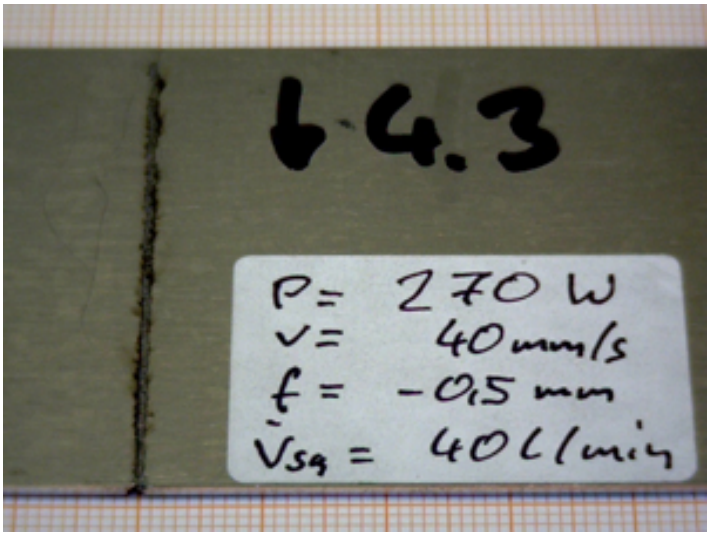
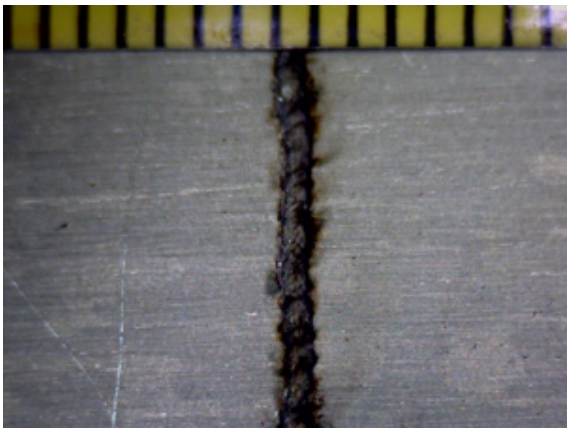
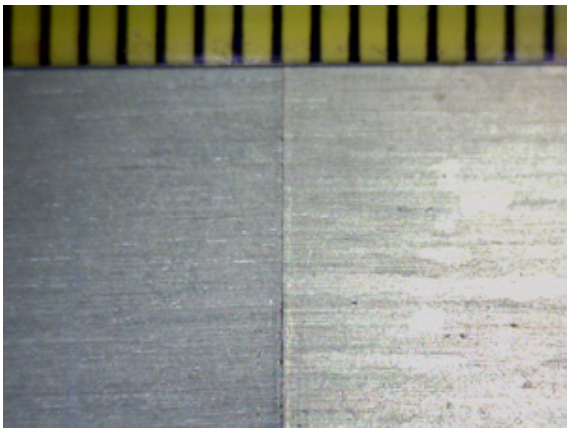



Abbildung 8.30: Probe 4.3 in voller Länge



(a) Probe 4.3 Nahtoberseite

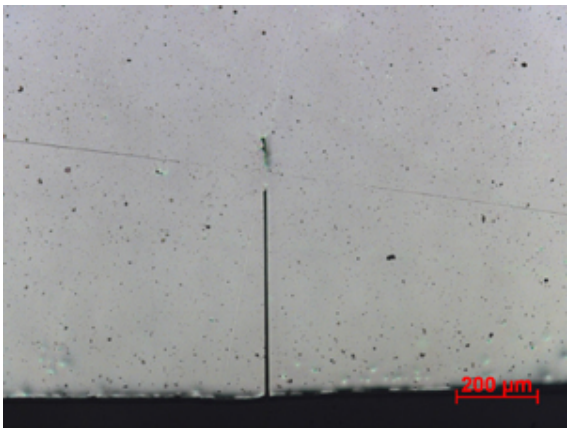


(b) Probe 4.3 Nahtunterseite

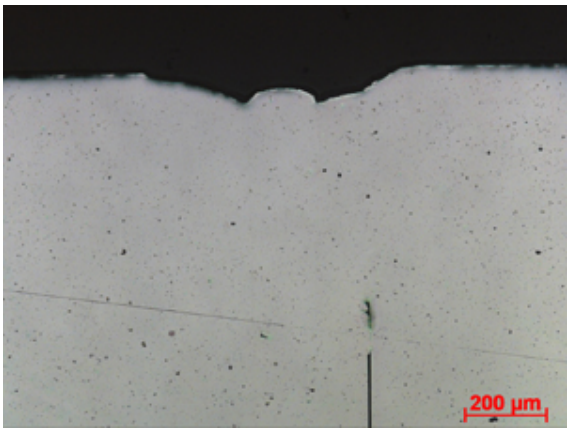
Abbildung 8.31: Schweißnaht der Probe 4.3 im Detail

### 8.4.3 Genauere Untersuchung

#### Untersuchung unter dem Lichtmikroskop




(a) Probe 4.3 100fache Vergrößerung

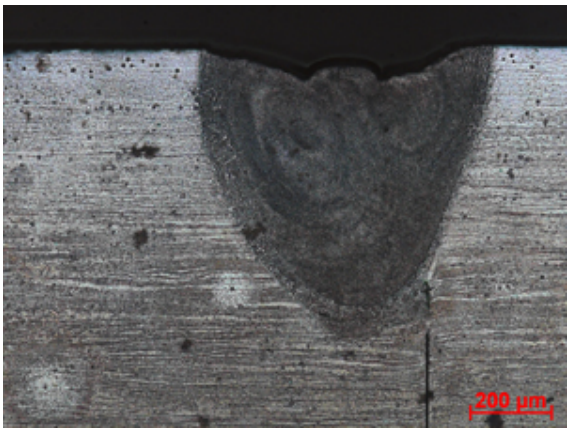



(b) Probe 4.3 100fache Vergrößerung

Abbildung 8.32: Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail

Die Abbildungen 8.32(a) und 8.32(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 4.3 im ungeätzten Zustand.

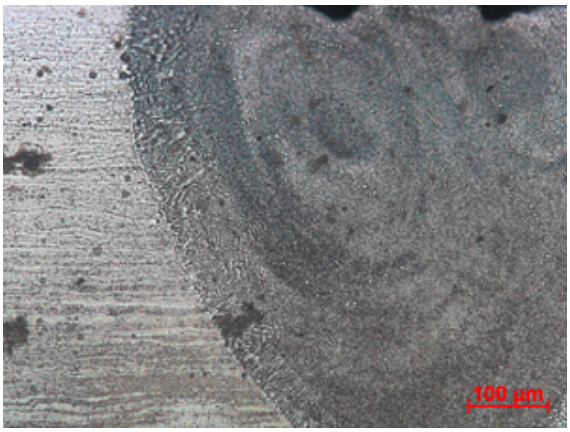
(a) Probe 4.3 100fache Vergrößerung, geätzt



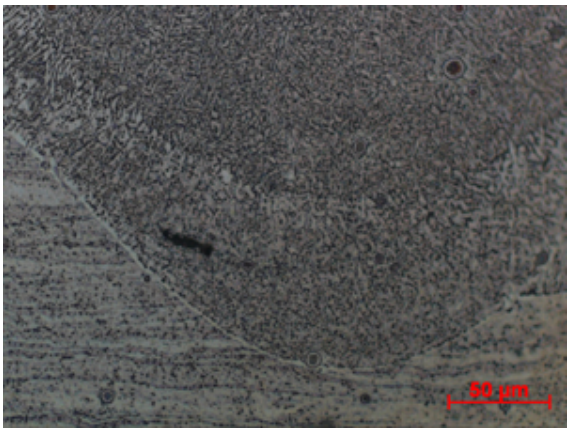

(b) Probe 4.3 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.33: Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail

Die Abbildungen 8.33(a) und 8.33(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 4.3 im geätzten Zustand.



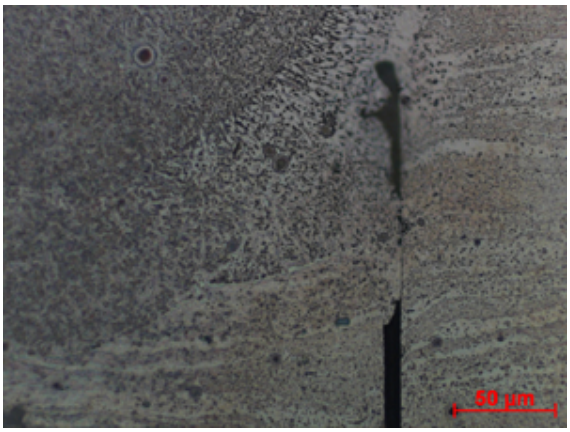

(a) Probe 4.3 200fache Vergrößerung, geätzt



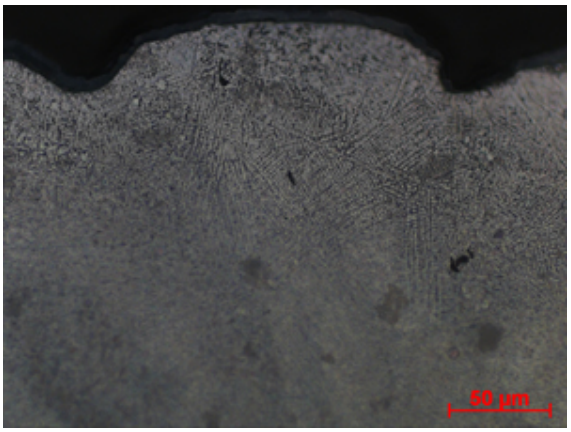

(b) Probe 4.3 500fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.34: Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail

Die Abbildung 8.34(a) zeigt den rechten Bereich der Schweißnaht 4.3. Abbildung 8.34(b) zeigt den unteren Bereich der nicht vollständig durchgeschweißten Naht in 500facher Vergrößerung.




(a) Probe 4.3 500fache Vergrößerung, geätzt




(b) Probe 4.3 500fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 8.35: Schweißnaht 3 der Gruppe 4 im Detail

Die Abbildung 8.35(a) zeigt den Bereich in dem der Fügespalt nicht verschweißt ist in 500facher Vergrößerung. Abbildung 8.35(b)zeigt den mittleren Bereich der Nahtoberseite mit seiner „höckerförmigen“ Ausformung.

**Untersuchung durch digitale Radiografie**

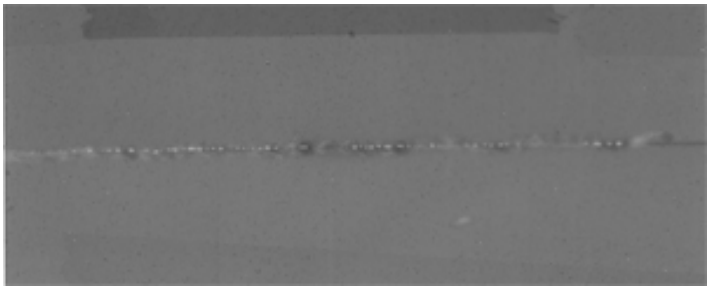


Abbildung 8.36: radiografische Aufnahme der Probe 4.3

### 8.4.4 Beurteilung der 4.Versuchsgruppe

**Probe 4.3**

Wie schon in Abbildung 8.31(b) und weiters in den Abbildungen 8.32(a) und 8.32(b) erkennbar, konnten bei diesem Versuch die Probebleche nicht vollständig verschweißt werden. Die Nahttiefe beträgt etwa 0.7 mm.
Grund dafür ist die geringe Wirkleistung von 270 W bei einer hohen Schweißgeschwindigkeit von 40 mm/s. Dies führt zu einer vergleichsweise geringen Streckenenergie von 6.75 J/mm, was für eine Durchschweißung bei der vorhandenen Probendicke nicht ausreichend ist.
Auffallend ist, dass es, wie in den Abbildungen 8.32(a) und 8.32(b) erkennbar, kaum zu Einschlüssen gekommen ist.
Die, in Abbildung 8.35(b) gut erkennbare, „höckerförmige“ Ausformung im mittleren Bereich der Nahtoberseite, kann ein Effekt des Schutzgasstromes sein der, bei schlechter Parameterwahl, das Schmelzbad der Schweißnaht durchaus formgebend beeinflussen kann.

## 8.5 Abschließende Beurteilung der ersten Versuchsreihe

Wie bei den einzelnen Versuchsgruppen bereits erwähnt, stellen die entstandenen Poren den augenfälligsten Schweißdefekt dar. Weitere Schweißfehler wie Unregelmäßigkeit der Nahtoberfläche, Nahtdurchhang und Schweißspritzer rücken, wegen ihrer vergleichsweise geringen Ausprägung, eher in den Hintergrund.
Nach dem Bildungsmechanismus werden mechanische und metallurgische Poren unterschieden. Letztere entstehen durch die unterschiedliche Löslichkeit von Gasen in Metallen in der festen und der flüssigen Phase. Sie werden als werkstoffverursacht eingestuft.
Bei der mechanischen Porenbildung werden infolge der Schweißwärme expandierende Gase von der schnell erstarrenden Schmelze eingeschlossen. Diese hieraus entstehenden Poren treten als einzelne Kugel- oder Schlauchporen, als Porennester, -zeilen und -ketten in Erscheinung. Ursache für die mechanische Porenbildung kann zum Beispiel das Überschweißen von Kondenswasser, Fetten, Ölen und anderen Verunreinigungen auf der Fügefläche sein [8].
Bei Schutzgasschweißungen können auch durch Gasturbulenzen oder Injektorwirkung Luftporen in das Schweißgut eingebracht werden. Diese Poren lassen sich nur durch eine korrekte Schutzgasströmung und Schutzgasmenge vermeiden [8].
Weiters ist zu beachten, dass im Schmelzbad, bedingt durch die niedrige Siedetemperatur des Magnesiums, Gasblasen entstehen können. Porenbildung und -wachstum sind dann die Folge, wenn die Erstarrung schneller abläuft als die Ausgasung [42].
Die Schweißgeschwindigkeit stellt daher einen möglichen Parameter dar, der das Verhalten eingeschlossener Gase positiv wie auch negativ beeinflussen kann.
Bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten haben die Poren genügend Zeit sich zu großen Poren zu vereinigen und das Schweißgut infolge des großen Auftriebs zu verlassen. Mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit können die Poren nicht mehr aus dem nur kurze Zeit existierenden Schmelzbad austreten [24].
Zu den Versuchen bei denen es nicht möglich war die beiden Bleche vollständig zu verschweißen (Gruppe 4) ist anzumerken, dass wohl in erster Linie die eingebrachte Streckenenergie zu gering war um das Material über die gesamte Stärke aufzuschmelzen. Schweißgeschwindigkeit und Strahlleistung bestimmen die Streckenenergie und ergeben charakteristische Nahtformen, beziehungsweise Schmelzzonentiefen und Bearbeitungsergebnisse.
Hohe Streckenenergien führen zu einer Überhitzung der Schmelze mit erhöhtem Porenanteil in der Schweißnaht und einer Vergrößerung des Schmelzvolumens [31].
Aus diesen Gründen ist es durchaus wünschenswert, die eingebrachte Streckenenergie auf ein möglichst geringes Maß zu verringern ohne dabei die Schweißgeschwindigkeit zu weit zu reduzieren.

# Kapitel 9

# Zweite Versuchsreihe

Die zweite Versuchsreihe bestand aus einer Gruppe zu 8 Schweißungen. Bei den vorangegangenen Versuchsgruppen ist aufgefallen, dass sich die entstandenen Poren zum größten Teil in der Randzone der Schweißnaht befinden.
Ein möglicher Grund dafür könnte die unsachgemäße Handhabung der Proben, beziehungsweise die unzureichende Reinigung der Fügekanten gewesen sein. Zwar wurden diese durch Fräsen von gegebenenfalls vorhandenen Randzonenverunreinigungen befreit, auf eine penible Entfettung wurde jedoch vorerst verzichtet.
In dieser zweiten Versuchsserie wurde daher besonders auf eine saubere, möglichst fettfreie Oberfläche im Fügebereich geachtet. Dazu wurden die Probebleche nach dem Fräsen, im Bereich der Fügekante mit Aceton entfettet und gereinigt. Des Weiteren wurde der Bereich der Leistung, der offenbar zu einem guten Ergebnis führt, näher untersucht. Als Anhaltswert wurden dazu die eingebrachten Streckenenergien bei den Proben 3.4 und 4.6 der ersten Versuchsserie herangezogen.

$$E = \frac{P}{v} \tag{9.1}$$

E - Streckenenergie in [J/mm]

P - Wirkleistung in [W]

v - Schweißgeschwindigkeit in [mm/s]

Bei Probe 3.4 lag die Streckenenergie bei 15 [J/mm], bei Probe 4.6 bei 9.66 [J/mm] wobei diese Probe nicht vollständig durchgeschweißt wurde.
Mit den für die zweite Versuchsserie gewählten Einflussgrößen liegt die Streckenenergie zwischen 11.6 und 15 [J/mm]. Ziel ist es, mit kleinstmöglicher Streckenenergie eine möglichst porenfreie Schweißnaht zu erzeugen.
Zuletzt wird auch der Schutzgasvolumenstrom etwas reduziert, da in Hinsicht auf Oxidation in der ersten Versuchsserie keine erwähnenswerten Probleme auftraten.

## 9.1 5.Versuchsgruppe

| | | Bezeichnung | Dimension | - | + |
|---|---|---|---|---|---|
| Variable | x1 | Leistung P | W | 290 | 300 |
| Einfluss- | x2 | Schweißgeschwindigkeit v | mm/sek | 20 | 25 |
| größe | x3 | Lage des Fokuspunktes | mm | -0.5 | 0 |
| | x4 | Schutzgasmenge | l/min | 10 | 15 |
| | x5 | Schutzgaszuführung | stechend | 45° | 45° |
| Antwort- | y1 | Porenfläche in Naht | $mm^2$ | | |
| größe | y2 | Gleichmäßigkeit der Naht | Punkte 0-10 | | |
| | y3 | durchgeschweißt | Punkte 0-10 | | |
| | y4 | Nahtdurchhang | Punkte 0-10 | | |
| | y5 | Schweißspritzer Nahtunterseite | Punkte 0-10 | | |
| | y6 | Randzone Nahtoberseite | Punkte 0-10 | | |

Tabelle 9.1: Einfluß- und Antwortgrößen der 5. Versuchsgruppe

### 9.1.1 Bewertung von y2 bis y6 aufgrund des makroskopischen Erscheinungsbildes

Wie schon bei Gruppe 4 (Kapitel: 8.4.1) erwähnt, wird bei den neuerlichen Schweißungen der Bereich um 300W Wirkleistung nochmals genauer untersucht.
Im Gegensatz zu Gruppe 4, konnten jetzt aber auch alle Proben mit 290W Wirkleistung, wie erwartet, vollständig durchgeschweißt werden (y3). Dies hängt mit der Verringerung der Schweißgeschwindigkeit und der damit verbundenen Erhöhung der Streckenenergie zusammen.
Da die gewählten Parameter sehr eng beieinander liegen, ist eine klare Unterscheidung der Schweißnähte auf makroskopischer Ebene äußerst schwierig. Auffallend ist, dass die Gleichmäßigkeit der Nähte (y2) im Mittel etwas schlechter ist als bei den vorangegangenen Versuchen.
Die Lage des Fokuspunktes scheint dabei eine wichtige Rolle zu spielen (Effekt 1.5), wobei einer Fokuslage auf der Oberfläche des Werkstückes der Vorzug zu geben wäre, da es sich um einen Effekt mit positiven Vorzeichen handelt. Dies steht jedoch leider im Widerspruch zu den Erkenntnissen die aus der Versuchsgruppe 1 (Kapitel: 8.1.1) gewonnen wurden.
Alle anderen Antwortgrößen wie Nahtdurchhang (y4), Schweißspritzer an der Nahtunterseite (y5) und Abbrand an der Randzone der Nahtoberseite (y6) liegen durchwegs im oberen Bewertungsbereich.

| **Planmatrix** | | | | | | **unabhängige Variablen** | | | | | | | | **Antwortmatrix** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **I**<br>**0** | **1**<br>**25** | **2**<br>**15** | **12**<br>**34** | **3**<br>**45** | **13**<br>**24** | **14**<br>**23** | **4**<br>**35**<br>**123** | **y1** | **y2** | **y3** | **y4** | **y5** | **y6** |
| **1** | - | - | - | - | | + | - | - | + | - | + | + | - | / | **6** | **10** | **8** | **10** | **8** |
| **2** | + | - | - | + | | + | + | - | - | - | - | + | + | **10** | **6** | **10** | **6** | **10** | **8** |
| **3** | - | + | - | + | | + | - | + | - | - | + | - | + | **4** | **4** | **10** | **8** | **10** | **10** |
| **4** | + | + | - | - | | + | + | + | + | - | - | - | - | / | **4** | **10** | **6** | **10** | **8** |
| **5** | - | - | + | + | | + | - | - | + | + | - | - | + | / | **6** | **10** | **6** | **8** | **8** |
| **6** | + | - | + | - | | + | + | - | - | + | + | - | - | / | **6** | **10** | **8** | **10** | **8** |
| **7** | - | + | + | - | | + | - | + | - | + | - | + | - | / | **8** | **10** | **6** | **8** | **8** |
| **8** | + | + | + | + | | + | + | + | + | + | + | + | + | **6** | **6** | **10** | **8** | **10** | **8** |
| | | | | | | **(2.5)** | **(3)** | **(0)** | **(-2)** | **(-2)** | **(0)** | **(3)** | **(5)** | | | | | | |
| | | | | | | **5.75** | **- 0.5** | **- 0.5** | **- 0.5** | **1.5** | **- 0.5** | **1.5** | **- 0.5** | | | | | | |
| **Effektmatrix** | | | | | | **10** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | **0** | | | | | | |
| | | | | | | **7** | **0** | **0** | **0** | **0** | **2** | **0** | **0** | | | | | | |
| | | | | | | **9.5** | **1** | **0** | **0** | **- 1** | **1** | **0** | **0** | | | | | | |
| | | | | | | **8.25** | **- 0.5** | **0.5** | **- 0.5** | **- 0.5** | **0.5** | **- 0.5** | **0.5** | | | | | | |

Tabelle 9.2: Versuchsplan für die 5. Versuchsgruppe

### 9.1.2 Ausgesuchte Abbildungen der 5.Versuchsgruppe

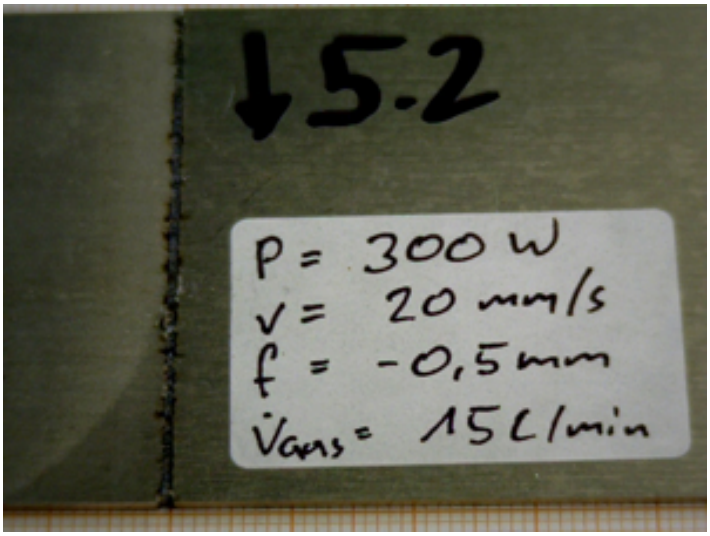
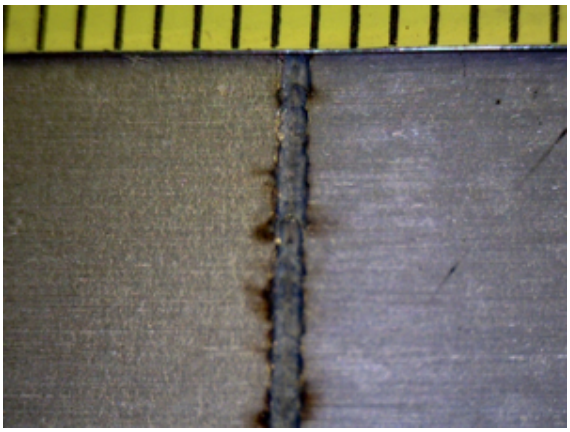
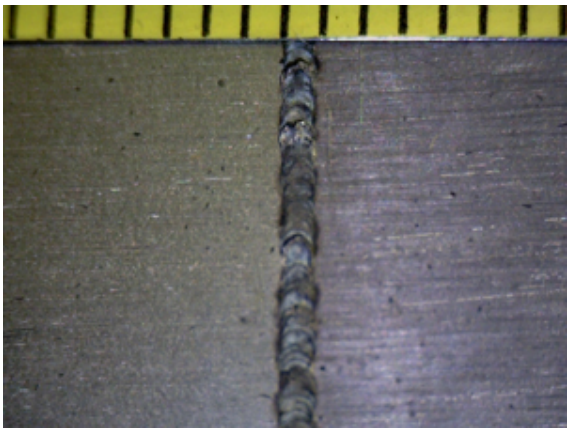



Abbildung 9.1: Probe 5.2 in voller Länge



(a) Probe 5.2 Nahtoberseite



(b) Probe 5.2 Nahtunterseite

Abbildung 9.2: Schweißnaht der Probe 5.2 im Detail

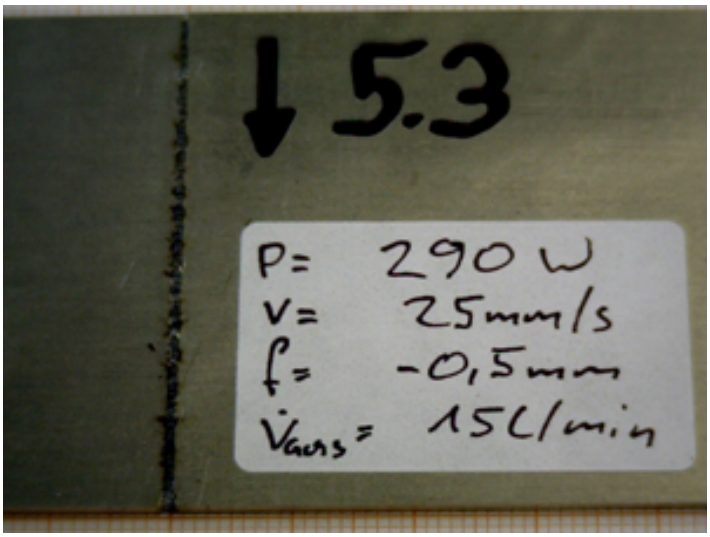
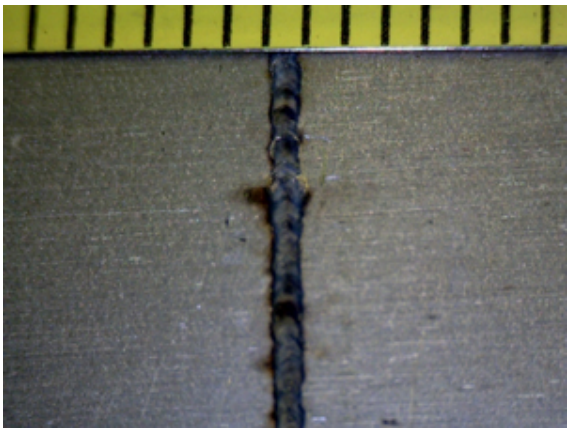
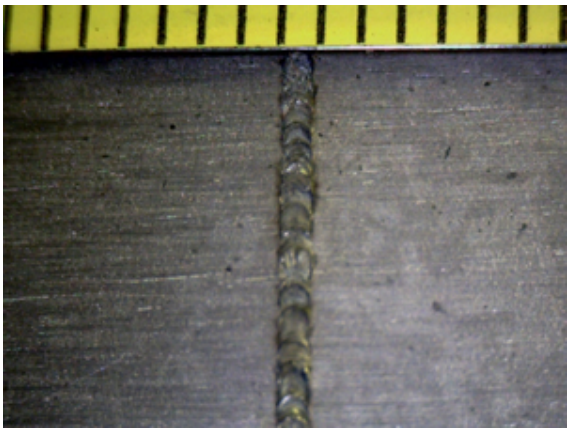



Abbildung 9.3: Probe 5.3 in voller Länge



(a) Probe 5.3 Nahtoberseite



(b) Probe 5.3 Nahtunterseite

Abbildung 9.4: Schweißnaht der Probe 5.3 im Detail

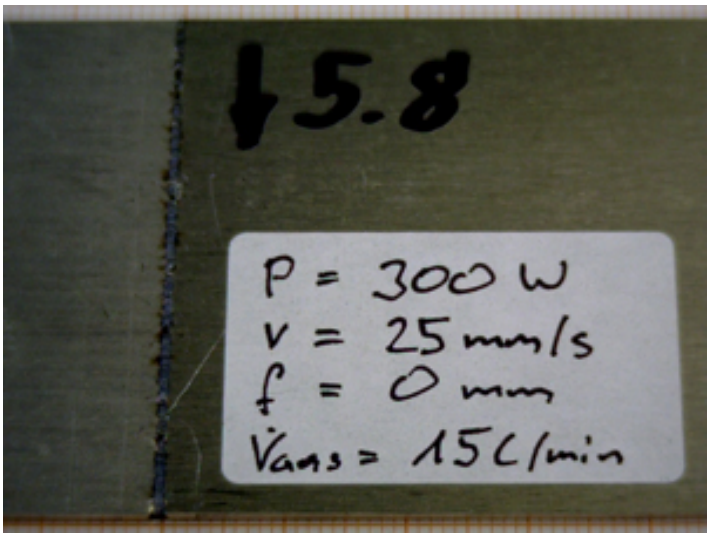
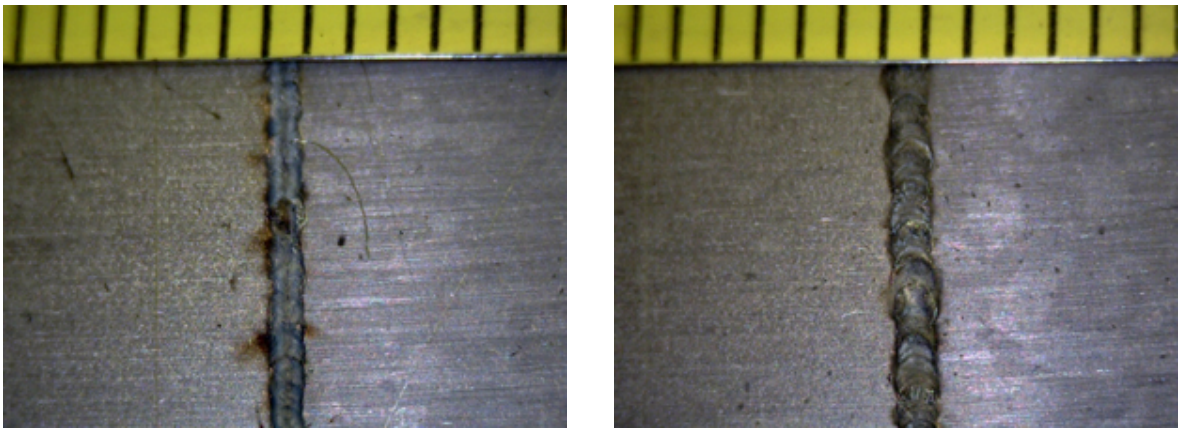



Abbildung 9.5: Probe 5.8 in voller Länge



(a) Probe 5.8 Nahtoberseite

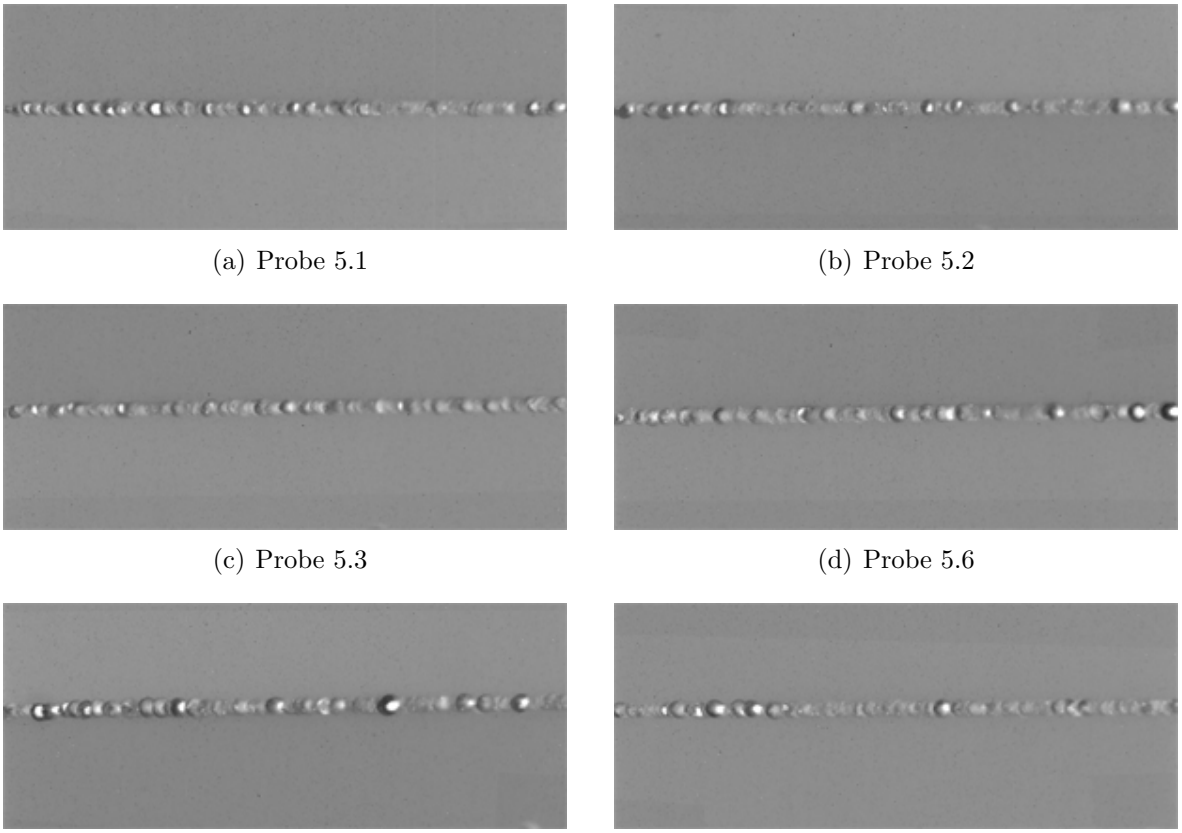
(b) Probe 5.8 Nahtunterseite

Abbildung 9.6: Schweißnaht der Probe 5.8 im Detail

### 9.1.3 Genauere Untersuchung

#### Untersuchung durch digitale Radiografie

Wie schon erwähnt, ist eine klare Unterscheidung der Schweißnähte auf makroskopischer Ebene äußerst schwierig, da die gewählten Parameter sehr eng beieinander liegen. Die radiografische Untersuchung wurde daher zur Unterstützung herangezogen, um zu entscheiden, welche Proben für weitere mikroskopische Untersuchungen verwendet werden.
Dazu wurden die Proben 5.1, 5.2, 5.3, 5.6, 5.7 und 5.8 ausgewählt und diese eingehend untersucht.



(a) Probe 5.1 (b) Probe 5.2

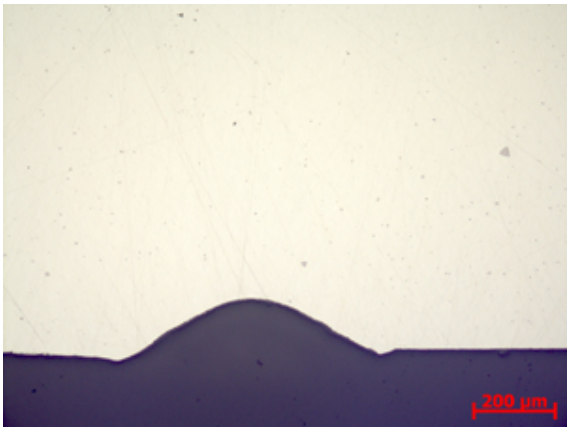
(c) Probe 5.3 (d) Probe 5.6

(e) Probe 5.7 (f) Probe 5.8

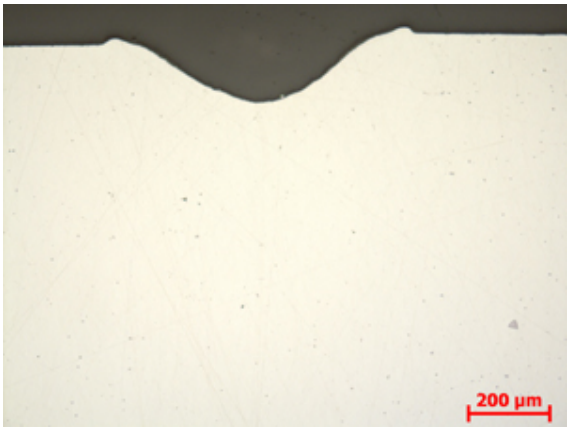
Abbildung 9.7: radiografische Aufnahmen der ausgewählten Proben

Wie die Aufnahmen zeigen, weisen auch die Schweißnähte der Gruppe 5 Schweißdefekte in Form von Hohlräumen auf. Für die weiteren Untersuchungen unter dem Lichtmikroskop, wurden die Proben 5.2, 5.3 und 5.8 ausgewählt, da diese schon bei der makroskopischen Untersuchung positiv in Erscheinung getreten sind.

### Untersuchung unter dem Lichtmikroskop



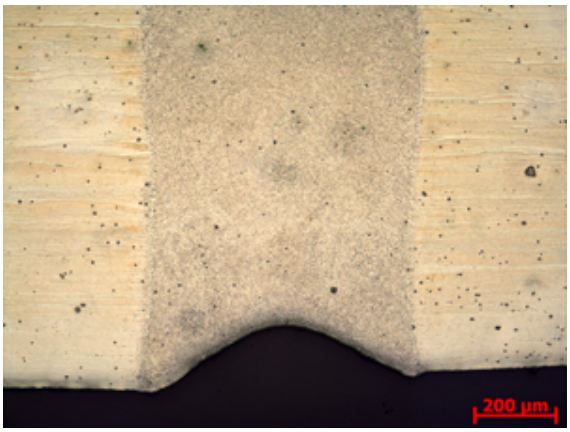

(a) Probe 5.2 100fache Vergrößerung



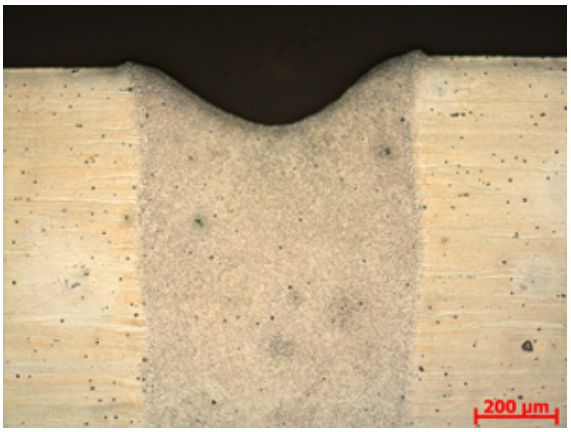

(b) Probe 5.2 100fache Vergrößerung

Abbildung 9.8: Schweißnaht 2 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildungen 9.8(a) und 9.8(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 5.2 im ungeätzten Zustand.



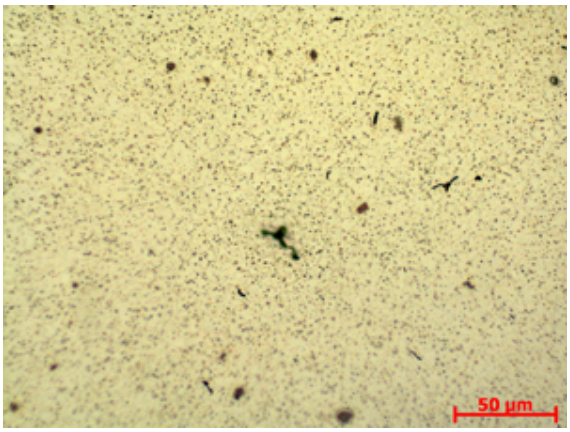

(a) Probe 5.2 100fache Vergrößerung, geätzt



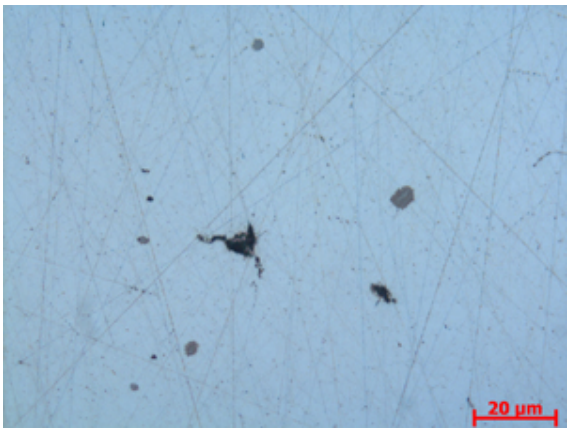

(b) Probe 5.2 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 9.9: Schweißnaht 2 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildungen 9.9(a) und 9.9(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 5.2 im geätzten Zustand.



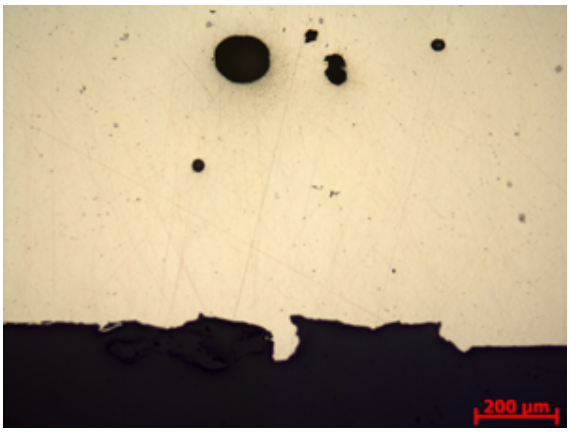

(a) Probe 5.2 500fache Vergrößerung, geätzt



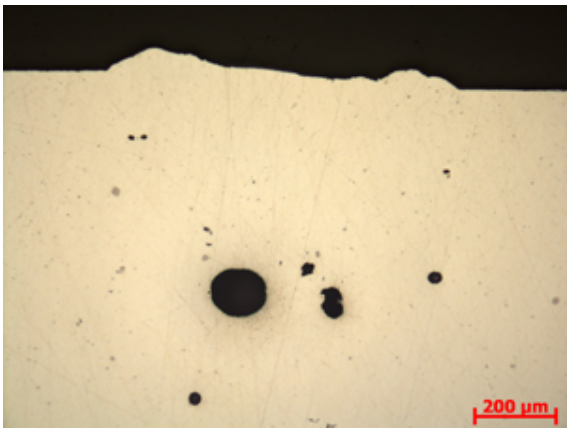

(b) Probe 5.2 1000fache Vergrößerung

Abbildung 9.10: Schweißnaht 2 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildungen 9.10(a) und 9.10(b) zeigen eine Fehlstelle im linken, oberen Bereich der Schweißnaht 5.2, sowohl im ungeätzten als auch im geätzten Zustand bei verschiedenen Vergrößerungen.



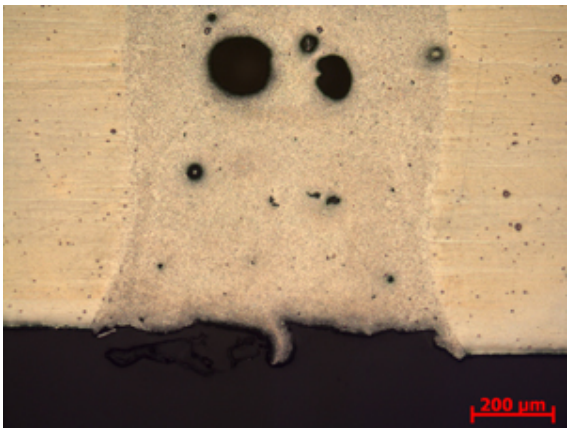

(a) Probe 5.3 100fache Vergrößerung



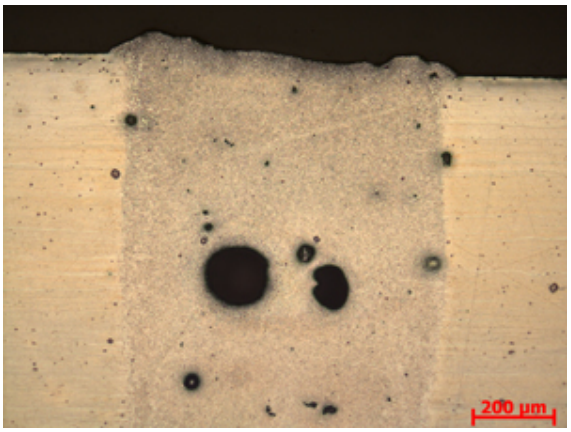

(b) Probe 5.3 100fache Vergrößerung

Abbildung 9.11: Schweißnaht 3 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildungen 9.11(a) und 9.11(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 5.3 im ungeätzten Zustand.



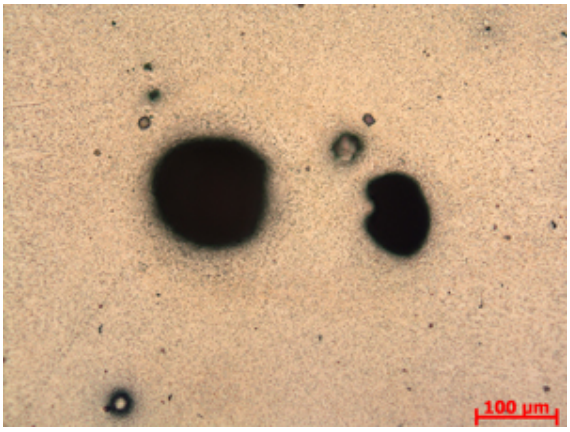

(a) Probe 5.3 100fache Vergrößerung, geätzt



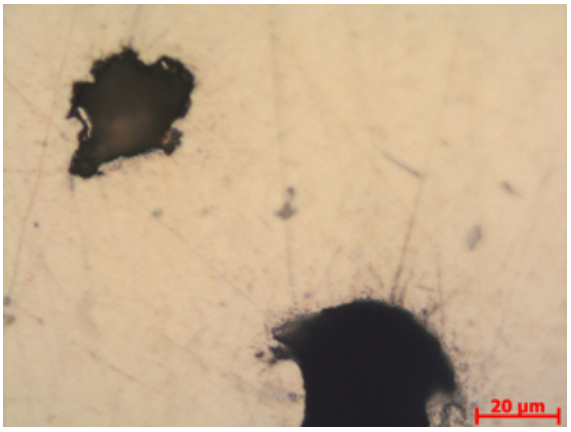

(b) Probe 5.3 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 9.12: Schweißnaht 3 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildungen 9.12(a) und 9.12(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 5.3 im geätzten Zustand.



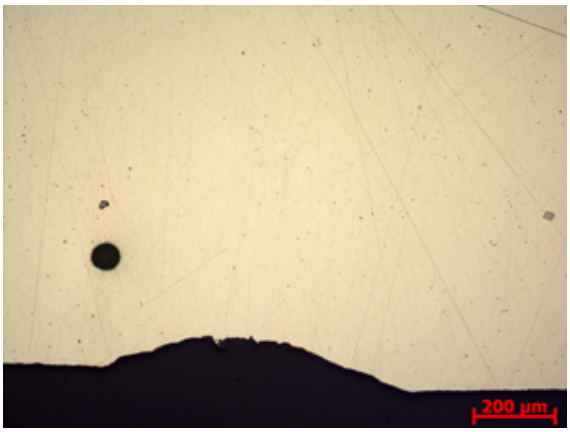

(a) Probe 5.3 200fache Vergrößerung, geätzt



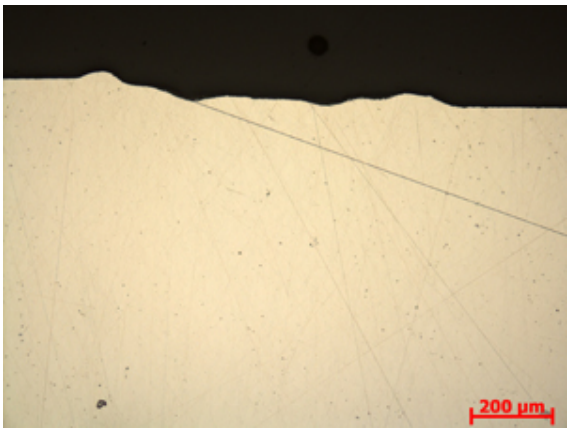

(b) Probe 5.3 1000fache Vergrößerung

Abbildung 9.13: Schweißnaht 3 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildung 9.13(a) zeigt die Poren im mittleren Bereich der Schweißnaht. Abbildung 9.13(b) zeigt den Bereich rechtsseitig der größten Pore im ungeätzten Zustand bei 1000facher Vergrößerung.



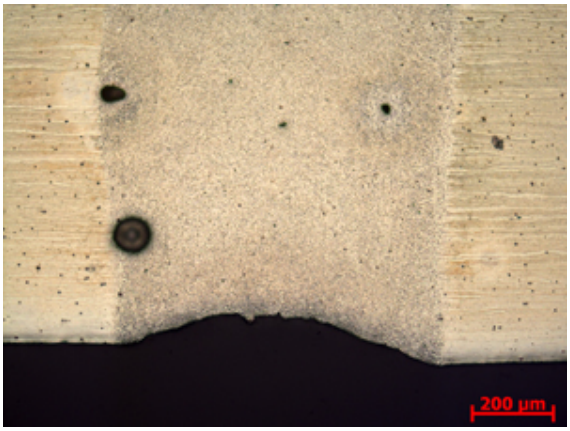

(a) Probe 5.8 100fache Vergrößerung



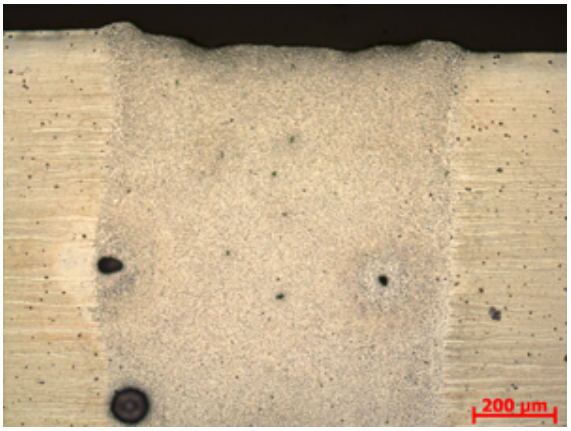

(b) Probe 5.8 100fache Vergrößerung

Abbildung 9.14: Schweißnaht 8 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildungen 9.14(a) und 9.14(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 5.8 im ungeätzten Zustand.



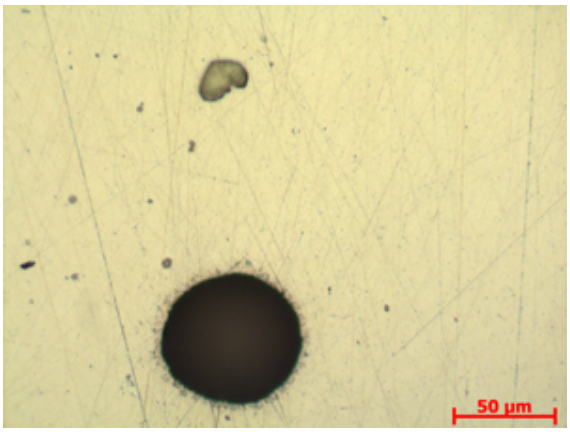

(a) Probe 5.8 100fache Vergrößerung, geätzt



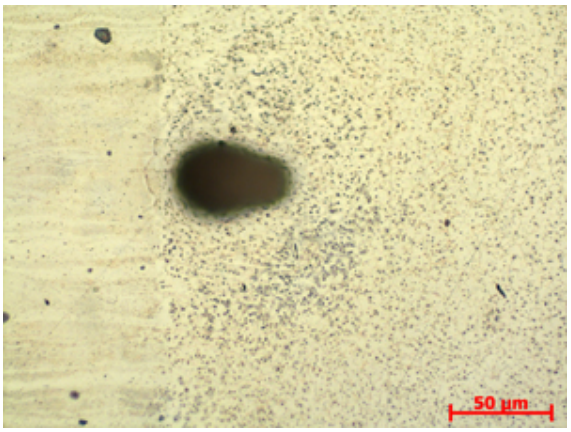

(b) Probe 5.8 100fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 9.15: Schweißnaht 8 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildungen 9.15(a) und 9.15(b) zeigen den Querschliff des unteren und oberen Bereichs der Schweißnaht 5.8 im geätzten Zustand.




(a) Probe 5.8 500fache Vergrößerung




(b) Probe 5.8 500fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 9.16: Schweißnaht 8 der Gruppe 5 im Detail

Die Abbildung 9.16(a) zeigt die Pore im linken, unteren Bereich der Schweißnaht. Abbildung 9.16(b) zeigt die kleinere Pore im linken, mittleren Bereich, wobei die Wärmeeinflusszone gut erkennbar ist.

### 9.1.4 Beurteilung der 5.Versuchsgruppe

#### Probe 5.2

Wie in den Abbildungen 9.8(a) und 9.8(b) zu sehen, ist es zumindest in der entsprechenden Schliffebene zu keiner nennenswerten Entwicklung von Poren gekommen. Auf eine entsprechende, tabellarische Erfassung der Porenfläche, wie bei den vorangegangenen Versuchen konnte daher verzichtet werden.
Wie in der entsprechenden, radiografischen Aufnahme (Abbildung 9.7(b)) anhand der hellen Stellen zu erkennen ist, dürften sich jedoch durchaus größere Hohlräume in der Schweißnaht befinden.
Schon bei der genaueren, makroskopischen Betrachtung fällt auf, dass sich an der Oberfläche der Schweißnaht stellenweise kleine Löcher befinden. Möglicherweise handelt es sich um größere Poren die gerade beim Verlassen der Schmelze durch das Erstarren dieser, am Austreten gehindert wurden. Auffallend ist die Form der Nahtwurzel.
Im Gegensatz zu den Schweißnähten der ersten Versuchsreihe, welche einen deutlichen Nahtdurchhang aufweisen, hat sich sowohl eine Nahtunterwölbung als auch ein Wurzelrückfall ergeben. Auch diese Defekte wirken sich durch die Umlenkung der Kraftlinie bei dynamischer Belastung ungünstig aus. Unregelmäßigkeiten wie diese sind jedoch im kleinen Ausmaß, abhängig von der Bewertungsgruppe (Beanspruchung der Schweißverbindung) noch zu tolerieren [31]. Wie aus der Tabelle 7.2 hervorgeht, stellen eine zu große Spaltweite zwischen den zu fügenden Blechen, oder auch eine zu geringe Strahlleistung mögliche Fehlerquellen dar.

### Probe 5.3

Wie die Abbildungen 9.11(a) und 9.11(b) zeigen, ist es in der Schweißnaht 5.3 wieder zu einer markanten Porenbildung gekommen.

| PROBE 5.3: | |
|---|---|
| Porendurchmesser in $\mu$m | Porenquerschnitt in mm$^2$ |
| 130 | 0.01327 |
| 30 | 0.00071 |
| 50 | 0.00196 |
| 30 | 0.00071 |
| Porenquerschnittsfläche: | 0.02299 mm$^2$ |
| Nahtquerschnittsfläche: | 1.2 mm$^2$ |
| Porenanteil: | 1.916 % |

Tabelle 9.3: Poren im Schliffbild der Probe 5.3

Abbildung 9.13(b) zeigt den mittleren Bereich der Schweißnaht in 1000facher Vergrößerung. Es ist zu erkennen, dass die kleinere Fehlstelle die sich zwischen den beiden Poren befindet, einen sehr scharfkantigen Umriss aufweist. Dies spricht gegen einen Gaseinschluss und eher für einen eingeschlossenen Fremdkörper der im Zuge der Präparation herausgerissen wurde.
Da sich gerade im Zentrum des Nahtquerschnittes die beiden größten Poren befinden ist anzunehmen, dass sich in diesem Fall bereits mehrere kleinere Gaseinschlüsse zu diesen größeren Poren zusammengeschlossen haben. Auch der Umstand, dass im Vergleich zu den Schweißnähten der ersten Versuchsreihe praktisch keine so genannten Porennester, also Anhäufungen vieler kleinerer Gaseinschlüsse, zu finden sind, spricht für diese Vermutung. Gerade im mittleren Bereich des Querschnittes der Naht ist der Effekt der „Selbstabschreckung“, also die stark abkühlende Wirkung des umgebenden Grundmaterials, am geringsten, wodurch sich die notwendige Zeit ergibt um große Poren bilden zu können. Dennoch hat die Zeit scheinbar nicht ausgereicht, sodass die gebildeten Gase infolge des Auftriebs die Schmelze verlassen konnten.
Bei genauerer Betrachtung der radiografischen Aufnahme von Schweißnaht 5.3 (Abbildung 9.7(c)) ist erkennbar, dass es gerade am Nahtanfang (linker Bereich der Aufnahme) zu einer erheblich stärkeren Entwicklung von Poren, beziehungsweise Hohlräumen gekommen ist, als beispielsweise im mittleren Bereich der Schweißnaht (drei der vier scheinbar größeren Poren befinden sich im vorderen Viertel der Naht).
In Bezug auf die Querschnittsform der Schweißnaht ist in Abbildungen 9.11(a) und 9.11(b) gut erkennbar, dass es weder zu einem Nahtdurchhang, noch zu einer Nahtunterwölbung, beziehungsweise einem Wurzelrückfall gekommen ist. Die Schliffbilder lassen jedoch eine eher raue Nahtoberfläche erkennen, was in erster Linie auf ein sehr unruhiges Schmelzbad hinweist.

**Probe 5.8**

Abbildungen 9.15(a) und 9.15(b) zeigen, dass es bei Schweißnaht 5.8 zwar auch, gerade im Randbereich, zur Porenbildung gekommen ist, jedoch in einem weitaus geringeren Ausmaß als beispielsweise bei Schweißnaht 5.3. Dies bezieht sich jedoch ausschließlich auf die im Schliffbild erkennbare Ebene. Werden als weitere Vergleichsmöglichkeit die radiografischen Aufnahmen der Schweißnähte 5.3 und 5.8 (Abbildungen 9.7(c) und 9.7(f)) herangezogen, erscheint die Porenhäufigkeit über die gesamte Länge der Schweißnaht bei Naht 5.3 geringer.

| PROBE 5.8: | |
|---|---|
| Porendurchmesser in $\mu$m | Porenquerschnitt in mm$^2$ |
| 90 | 0.00636 |
| 40 | 0.00125 |
| 20 | 0.00031 |
| Porenquerschnittsfläche: | 0.00793 mm$^2$ |
| Nahtquerschnittsfläche: | 1.29 mm$^2$ |
| Porenanteil: | 0.6147 % |

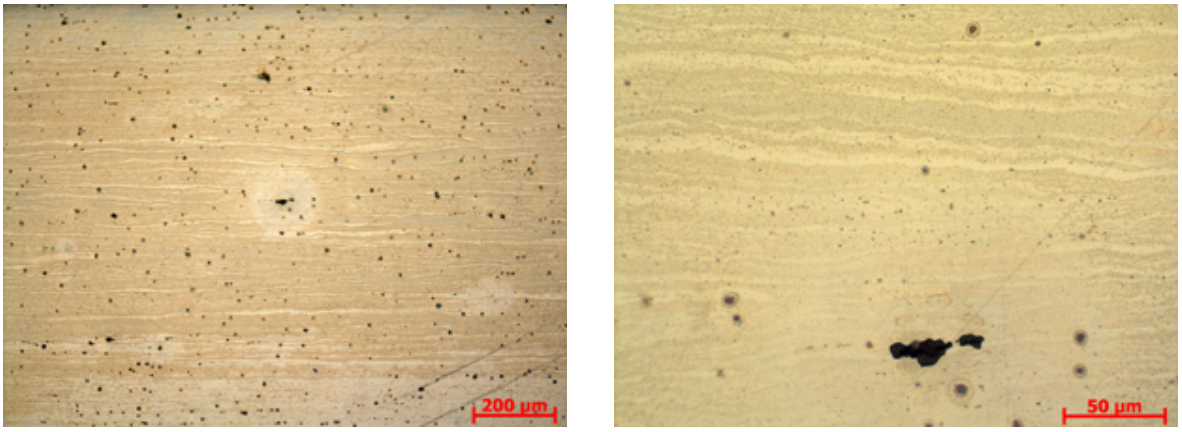
Tabelle 9.4: Poren im Schliffbild der Probe 5.8

Positiv anzumerken ist, dass weder zu einer markanten Nahtunterwölbung noch zu einem ausgeprägten Wurzelrückfall gekommen ist. Dies weist auf ein gutes Zusammenspiel von bestehenden Fügespalt, Strahlleistung und Schutzgasvolumenstrom hin.
Wie in Tabelle 9.2 bereits erkennbar, wurde die Gleichmäßigkeit der Schweißnaht 5.8 (y2) als etwas besser beurteilt als die Gleichmäßigkeit der Naht 5.3. Dieses Urteil wird durch das Schliffbild bestätigt, da auch hier eine weniger raue Oberfläche zu erkennen ist.

## 9.2 Abschließende Beurteilung der zweiten Versuchsreihe

Auch bei der zweiten Versuchsreihe bildeten sich Poren, beziehungsweise Gaseinschlüsse innerhalb der Schweißnähte.
Gerade bei dieser Versuchsreihe wurde besonders auf eine entsprechende Schweißnahtvorbereitung geachtet.
Die Bleche wurden nach dem Zuschneiden auf die gewünschte Blechgröße an den zu fügenden Kanten plan gefräst und anschließend säuberlich entgratet. Kurz vor der eigentlichen Schweißung wurden die jeweiligen Fügebereiche penibel mit Aceton gereinigt und entfettet.

Auf diesem Weg wurde versucht, eine mögliche Fehlerquelle für entstandene Einschlüsse die sich durch oberflächliche Verunreinigungen ergeben haben, auszuschließen.
Eine weitere mögliche Quelle für entsprechende Einschlüsse können selbstverständlich auch Verunreinigungen im Grundmaterial sein. In den Abbildungen 9.17(a) und 9.17(b) ist das Grundmaterial in den angegebenen Vergrößerungen dargestellt.




(a) Grundmat. 100fache Vergrößerung, geätzt (b) Grundmat. 500fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 9.17: Grundmaterial AZ31 im Detail

Wie eindeutig erkennbar, finden sich bereits im Grundmaterial zahlreiche Einschlüsse, die das Schweißergebnis zwangsweise auf die eine oder andere Art beeinflussen.
Beim Verschweißen der Bleche werden diese aufgeschmolzen und so wiederum in der Schweißnaht eingeschlossen oder tragen gegebenenfalls auch aufgrund von Verdampfung zu einer entsprechenden Porenbildung bei.

Bei Strahlschweißverfahren wie dem Laserstrahlschweißen ist weiters eine gewisse Dynamik innerhalb des Keyholes nicht zu unterschätzen. Durch die lokale Verdampfung bilden sich entsprechende „mechanische“ Poren, welche sich dann vereinzelt im Schweißgut finden und die in der Regel größer als metallurgische Poren sind [36].
Gerade bei Aluminium-Magnesium-Zink Legierungen stellt die stark unterschiedliche Verdampfungstemperatur der Legierungselemente ein Problem und einen möglichen Grund für die Entstehung von Poren im Schmelzbad dar.
Während Aluminium erst bei etwa 2450 °C zu sieden beginnt, verdampft Magnesium bereits ab etwa 1090 °C und Zink bei etwa 911 °C. Ist also die eingebrachte Energie zu hoch, kann es zu einem Verdampfen einzelner Legierungselemente, und zu einer entsprechenden Porenbildung kommen [29].
Diesbezügliche Versuche haben ergeben, dass nur gerade soviel Energie eingebracht

werden sollte, dass ein Durchschweißen ermöglicht wird. Sobald die Streckenenergie weiter erhöht wird, kann es zu einer vermehrten Porenbildung kommen [45].
Ein weiterer Grund für die Porenentwicklung kann der bis jetzt nicht erwähnte Umstand sein, dass innerhalb des Grundgefüges Wasserstoff in fester Form als Magnesiumhydrid vorliegt. Erst durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen zersetzt es sich und bildet Poren [7].
Eine Möglichkeit diesen Unsicherheitsfaktor auszuschalten besteht darin, die zu verschweißenden Bauteile systematisch einer Wärmebehandlung zu unterziehen. Infolge einer solchen Wärmebehandlung wird der Wasserstoff aus dem Bauteil ausgetrieben und ermöglicht ein möglicherweise porenfreies Verschweißen der Bauteile.
Für die Ausbildung einer gleichmäßigen fehlerfreien Fügezone ist die Schweißnahtvorbereitung aufgrund des, beim Laserstrahlschweißen, zu erwartenden geringen Schmelzbadvolumens und der geringen Spaltüberbrückbarkeit beim Schweißen ohne Zusatzstoffe von erheblicher Bedeutung. Ausgehend von der geringen Brennfleckgröße muss gewährleistet sein, dass die mit einer I-Naht am Stumpfstoß zu fügenden Bleche möglichst spaltfrei in der Einspannvorrichtung fixiert werden können.
Ein Durchsacken des Schweißbades aufgrund geometrischer Gegebenheiten soll so verhindert werden [10].
An der Vorgangsweise beim Einspannen der Proben wurde jedoch, im Vergleich zur ersten Versuchsreihe keine Veränderung vorgenommen. Das markante Abnehmen des Nahtdurchhanges lässt vermuten, dass der Schutzgasvolumenstrom einen deutlichen Einfluss auf diesen hat. Bei der bestehenden Versuchsanordnung mit stechender Schutzgaszufuhr unter einem Winkel von 45° dürfte es bei höheren Volumenströmen zu einem ansatzweisen Ausblasen der Schmelze kommen, wodurch sich ein stärkerer Nahtdurchhang ergibt.
Im Bezug auf die Schutzgaszuführung ist weiters zu bemerken, dass die stechende Zuführung möglicherweise einen negativen Effekt auf die Schweißraupenoberfläche hat. Möglicherweise ergibt sich bei einer schleppenden Zuführung des Schutzgases und einem kleineren Zuführwinkel als 45° eine gleichmäßigere Erscheinung der Schweißnahtoberseite.
Erfreulich ist, dass es scheinbar in keiner der Schweißnähte zu einer Rissbildung gekommen ist. Es bildeten sich scheinbar weder Heißrisse, die meist infolge der Schrumpfspannungen beim Abkühlen in der Nahtmitte entstehen, noch so genannte Wiederaufschmelzrisse, die sich infolge des Aufschmelzens von niedrigschmelzenden Verbindungen in der Wärmeeinflusszone bilden.

# Kapitel 10

# Abschlussbetrachtung

Ein Verschweißen der 1.5 mm Probebleche aus AZ31-O unter Verwendung des YLR--1500CT Ytterbium Faserlasers ist bei allen bereits erwähnten Vorteilen durchaus möglich.
Als Untergrenze für die Streckenenergie muss für die gegebene Werkstückdicke ein Wert von etwa 12 [J/mm] angegeben werden. Unterhalb dieses Wertes ist ein vollständiges Verschweißen der Fügepartner nicht möglich (siehe Probe 4.3).
Wie bereits Versuche an anderen Instituten ergeben haben, stellt die Lösung des Problems der Porenbildung die größte Herausforderung beim Laserstrahlschweißen von Magnesiumlegierungen dar.
Vergleichbare Untersuchungen mit der Magnesiumlegierung AZ91 haben ergeben, dass die Porosität stark von der in der Legierung gelösten Menge an Wasserstoff abhängig ist.
Gerade in den letzten Stufen der Erstarrung des Schmelzbades wird die Bildung von Poren durch den eingeschlossenen Wasserstoff begünstigt. Auch im Grundmaterial bereits vorhandene Mikroporen spielen bei der Bildung größerer Poren beim Schweißvorgang eine wichtige Rolle. Diese kleineren Poren vereinigen sich beim Aufschmelzen des Grundmaterials und bilden somit gerade in der Schweißnaht entsprechend größere Poren [44].
Aus dieser Tatsache ergeben sich zwei mögliche Lösungen des gegebenen Problems. Einerseits könnte man eher hohe Schweißgeschwindigkeiten anwenden um den vorhandenen Mikroporen nicht die Zeit zu geben sich zu größeren Poren zusammenzuschließen, andererseits kann die Schweißgeschwindigkeit soweit reduziert werden, dass die eingeschlossenen Gase die Möglichkeit haben die Schmelze infolge des Auftriebs zu verlassen.

Auch Versuche unter zu Hilfename eines 3 kW Nd:YAG Lasers haben ergeben, dass sich gerade diese Mikroporen im Grundmaterial, im Zuge des Schweißprozesses, zu größeren Poren formieren, welche dann beim Erstarren der Schmelze eingeschlossen werden. Bei der Wahl geeigneter Prozessparameter besteht jedoch durchaus die Möglichkeit die Porenhäufigkeit und deren Größe in der Fügezone, auf das Maß des Grundmaterials zu reduzieren [43].

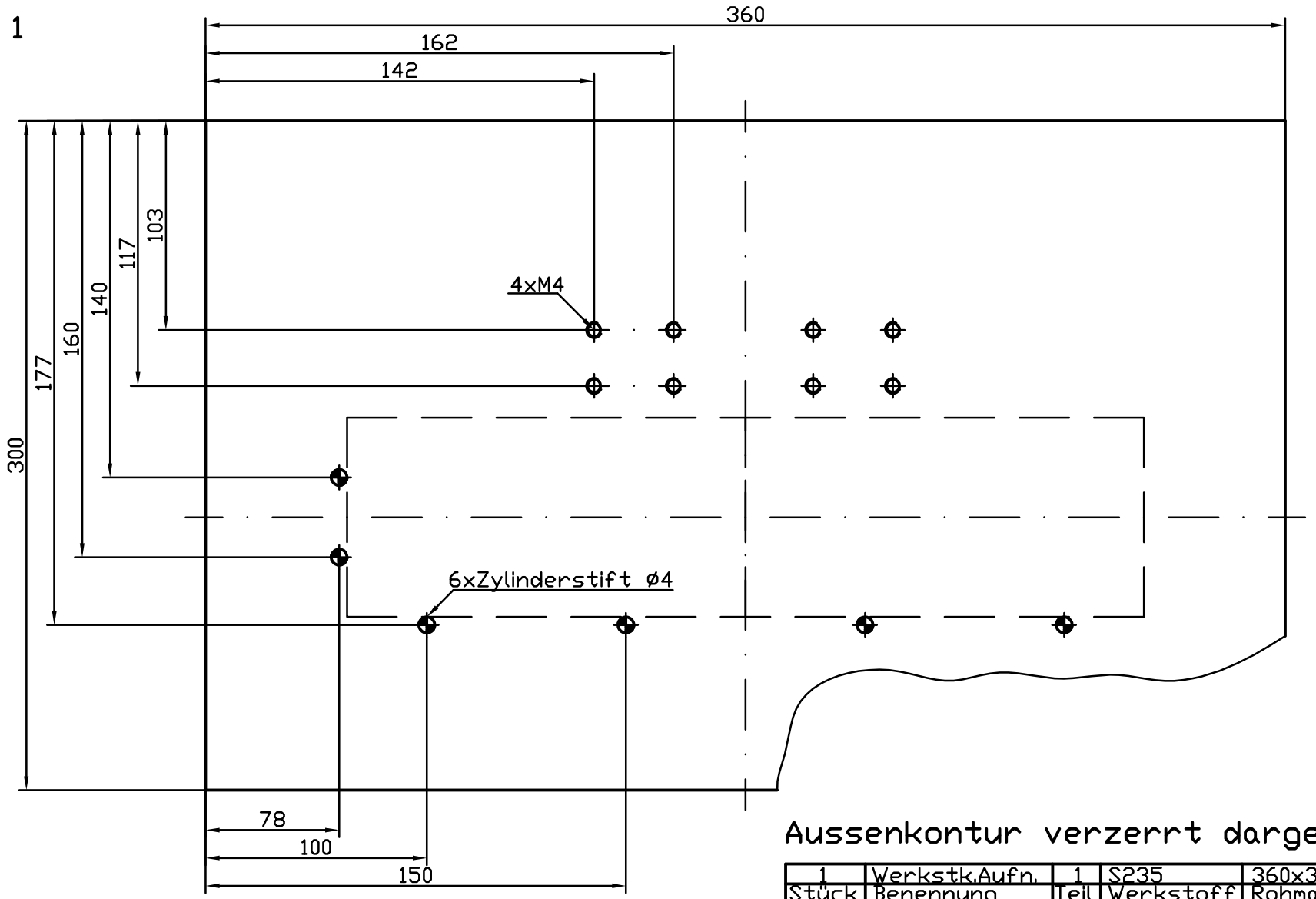
Die angesprochenen Versuche haben ergeben, dass eine höhere „Entgasung“ der Schmelze durch die Anwendung geringerer Laserleistungen und geringerer Schweißgeschwindigkeiten erreicht wird [43].
Während die Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen bereits relativ genau untersucht ist, gibt es im Bereich der Magnesiumlegierungen noch kaum Untersuchungen die den Entstehungsmechanismus der Poren in Bezug auf entsprechende Prozessgrößen hinreichend beschreiben [43].
Die Versuche der vorliegenden Arbeit untermauern diese Aussage. Es gilt gerade im unteren Laserleistungsbereich die entsprechende Verfahr-, beziehungsweise Schweißgeschwindigkeit zu finden die den eingeschlossenen Gasen noch die Zeit gibt die Schmelze zu verlassen.
Natürlich ist dabei eine Reihe von anderen Effekten, wie beispielsweise der Nahtdurchhang, der durch die geringe Viskosität der Magnesiumschmelze begünstigt wird, zu beachten.
Wie bereits erwähnt, wäre im Zuge weiterer Versuche eine Untersuchung der Schutzgaszuführung im Bezug auf Zuführwinkel und Richtung und die entsprechenden Auswirkungen auf das Schmelzbad empfehlenswert.
Da die primäre Aufgabe bei dieser Arbeit darin bestand eine nutzbare Anlage aufzubauen, die es erlaubt entsprechende Versuche mithilfe eines Faserlasers durchzuführen, wurde auf genauere Untersuchungen der geschweißten Teststücke vorerst verzichtet.
Sind die entsprechenden Prozessparameter gefunden, die es ermöglichen eine möglichst porenfreie Verbindung herzustellen, gilt es die Proben beispielsweise einem Zugversuch zu unterziehen. Auch eine Härteuntersuchung über den Querschnitt des Fügebereichs ist durchaus vorstellbar.

Um das Laserschweißen von Magnesiumlegierungen in Zukunft auch für großindustrielle Anwendungen wie Automobilbau und Luftfahrt attraktiv zu gestalten, gilt es die genauen Prozessfenster in Bezug auf Laserquelle, Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, usw. für die jeweiligen Legierungen und Materialstärken zu ermitteln.
Durch den Aufbau einer Versuchsanlage unter Einbindung des Faserlasers als Energiequelle und der Verwendung einfach zu handhabender Wechselsysteme, die es erlauben die Anlage problemlos innerhalb weniger Minuten auch für andere Versuchsaufbauten zu nutzen, ist die Voraussetzung für weitere Untersuchungen am Institut für Umformtechnik und Hochleistungslasertechnik in räumlicher und technischer Hinsicht erfüllt.

# Kapitel 11

# Anhang

Im folgenden Anhang finden sich zur Ergänzung CAD-Zeichnungen angefertigter Anlagenbauteile, sowie sämtliche Aufnahmen aller Schweißnähte.
Sowohl makroskopische als auch mikroskopische Aufnahmen sind enthalten.
Auf das Einfügen jener Aufnahmen, die zur Erläuterung der durchgeführten Versuche und der daraus folgenden Ergebnisse bereits verwendet wurden, wurde verzichtet.




Aussenkontur verzerrt dargestellt!

| Stück | Benennung | Teil | Werkstoff | Rohmaße | Bemerk. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Werkstk.Aufn. | 1 | S235 | 360x300x20 | |

| Ausgabe | Änderung | Tag | Name |
|---|---|---|---|
| | | | |

Freimaßtoleranzen: ISO 2768 f

Maßstab: (1:1)

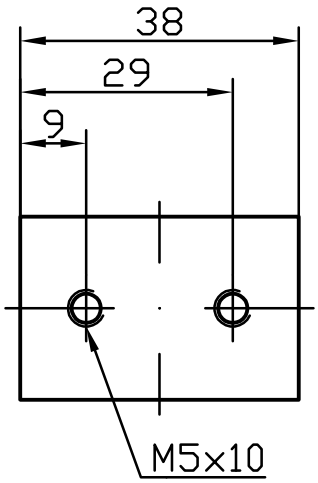
| | JAHR | Tag | Name |
|---|---|---|---|
| Bearb. | | | GRILL |
| M.Nr. | | | 0025065 |
| Normg. | | | |

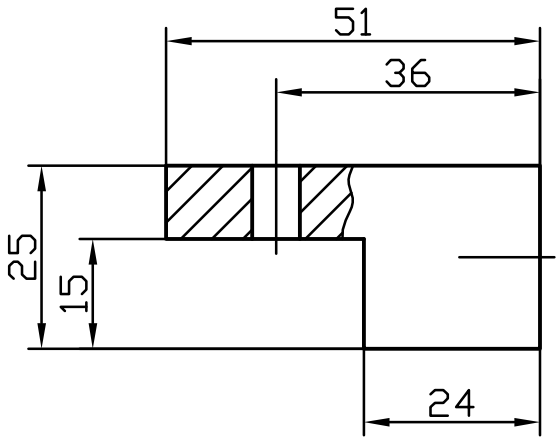
Benennung: Abänderungen an Werstückaufnahme

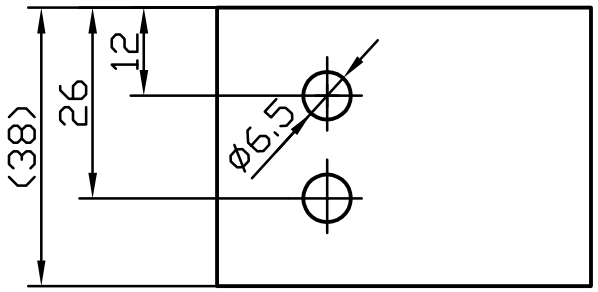
Zeichn. Nr.: 1

Ersatz für | Ersetzt durch

2




| 1 | Halter | 2 | EN AW2011 | 51x38x25 | |
|---|---|---|---|---|---|
| Stück | Benennung | Teil | Werkstoff | Rohmaße | Bemerkung |

| Aus gabe | Žnderung | Tag | Name |
|---|---|---|---|
| | | | |

Freimaãtoleranzen: ISO 2768 f

Maãstab: 1:1

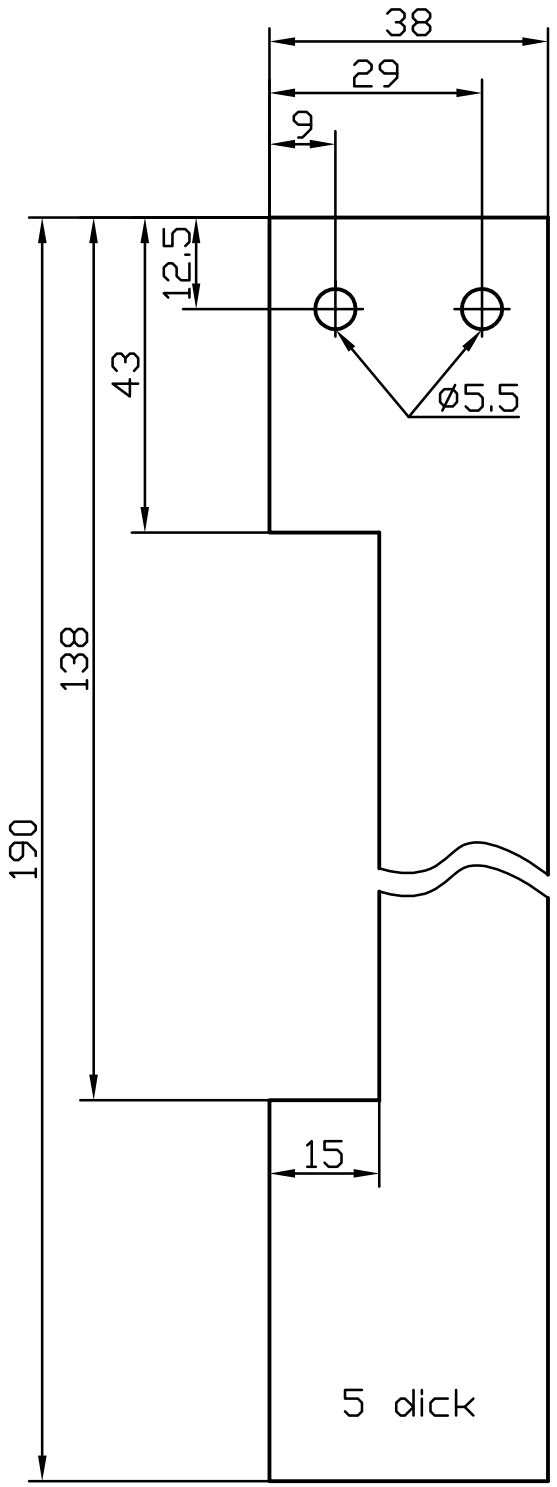
| | Tag | Name |
|---|---|---|
| Bearb. | | GRILL |
| M.Nr. | | 0025065 |
| Normg. | | |

Benennung: Halter für Referenz-Auflage

Zeichn. Nr.: 2

Ersatz f?r | Ersetzt durch

3




| Stück | Benennung | Teil | Werkstoff | Rohmaße | Bemerkung |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Ref.-Auflage | 3 | EN AW2011 | 190x38x5 | |

| Aus gabe | Änderung | Tag | Name |
|---|---|---|---|
| | | | |

Freimaßtoleranzen ISO 2768 f

Maßstab 1:1

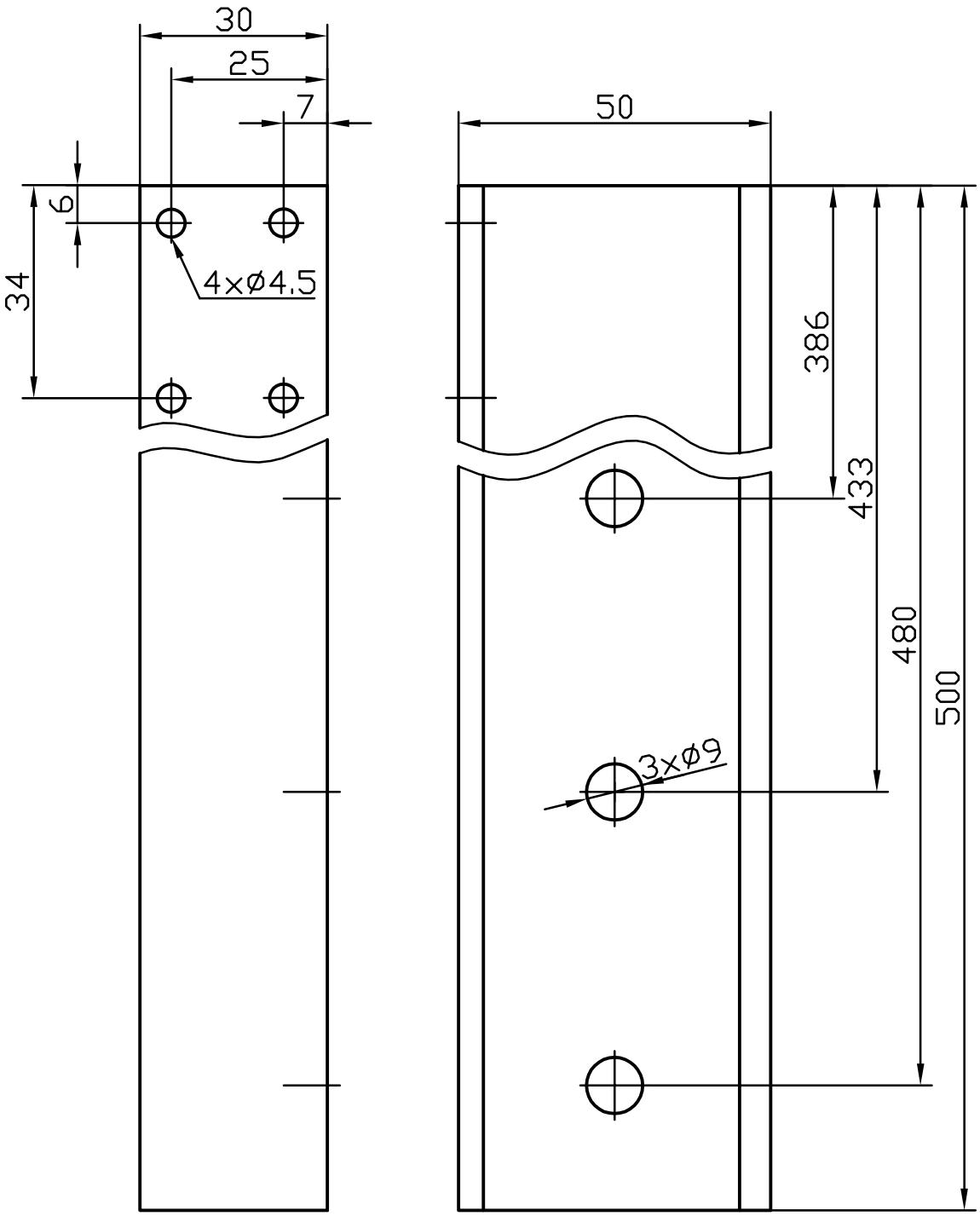
| | Tag | Name |
|---|---|---|
| JAHR | | |
| Bearb. | | GRILL |
| M.Nr. | | 0025065 |
| Normg. | | |

Benennung: Referenz-Auflage

Zeichn. Nr. 3

Ersatz für | Ersetzt durch

4




| 1 | Stützvorricht. | 4 | EN AW2011 | U50x30x500 | |
|---|---|---|---|---|---|
| Stück | Benennung | Teil | Werkstoff | Rohmaße | Bemerkung |

| Aus gabe | Žnderung | Tag | Name |
|---|---|---|---|
| | | | |

Freimaãtoleranzen ISO 2768 f

Maãstab 1:1

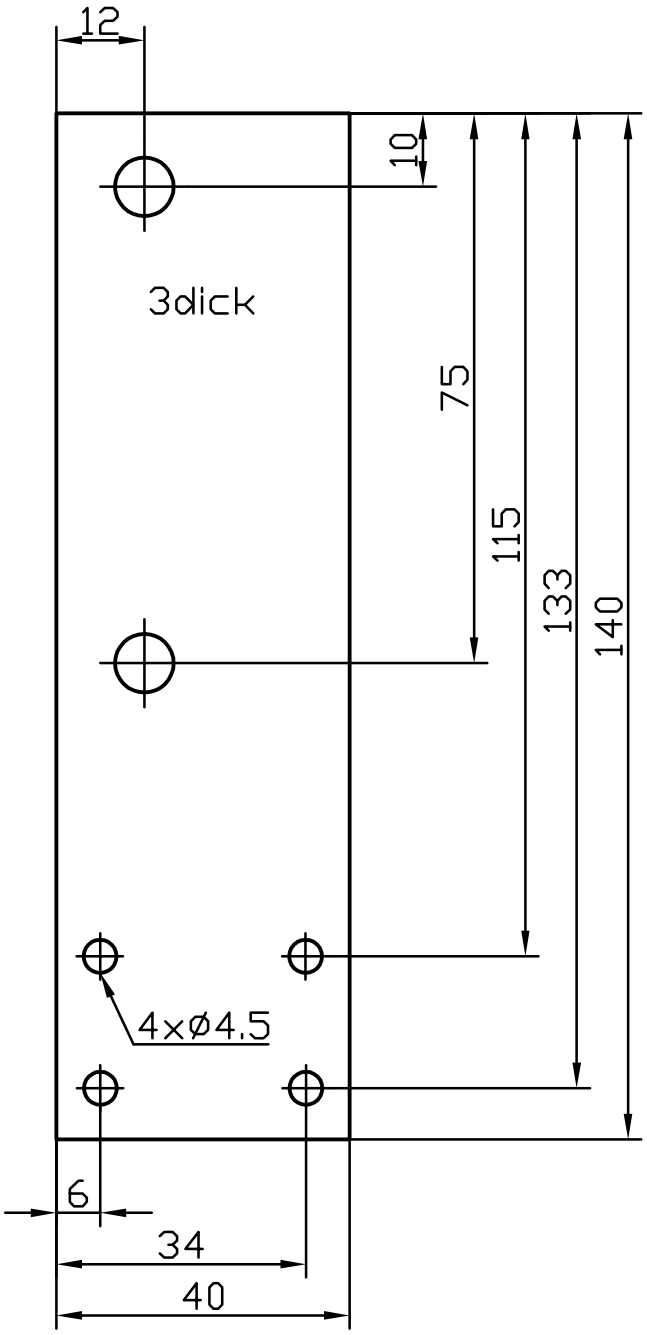
| | Tag | Name |
|---|---|---|
| JAHR | | |
| Bearb. | | GRILL |
| M.Nr. | | 0025065 |
| Normg. | | |

Benennung
Stützvorrichtung Teil1

Zeichn. Nr.
4

Ersatz f?r | Ersetzt durch

5




| 2 | Stützvorricht. | 5 | EN AW2011 | 140x40x3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| Stück | Benennung | Teil | Werkstoff | Rohmaße | Bemerkung |

| Aus gabe | Žnderung | Tag | Name |
|---|---|---|---|
| | | | |

Freimaãtoleranzen ISO 2768 f

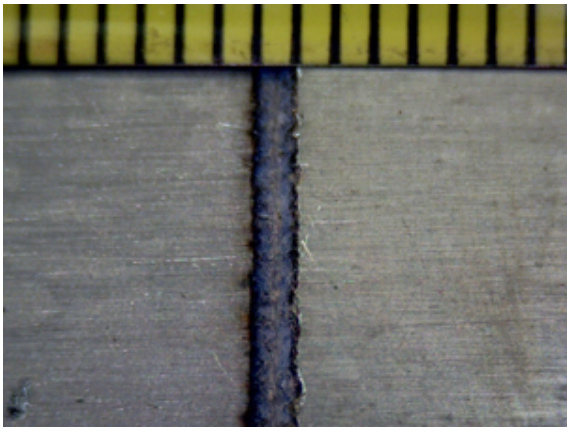
Maãstab 1:1

| | Tag | Name |
|---|---|---|
| JAHR | | |
| Bearb. | | GRILL |
| M.Nr. | | 0025065 |
| Normg. | | |

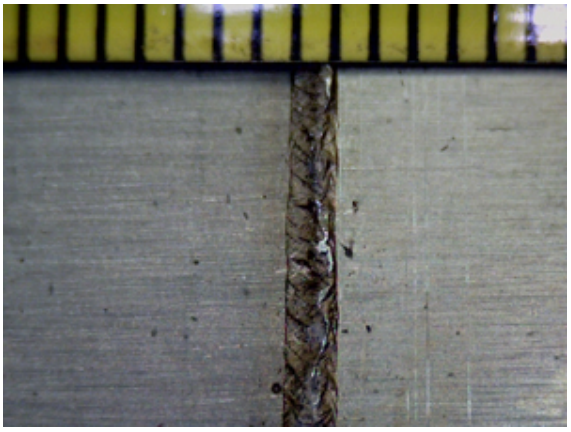
Benennung
Stützvorrichtung Teil2

Zeichn. Nr.
5

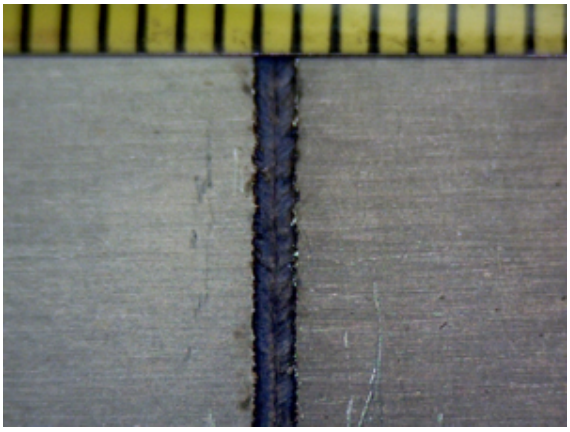
Ersatz f?r | Ersetzt durch



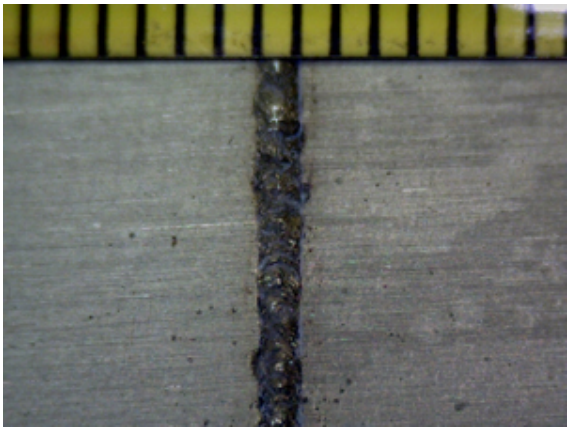
(a) Probe 1.1 Nahtoberseite



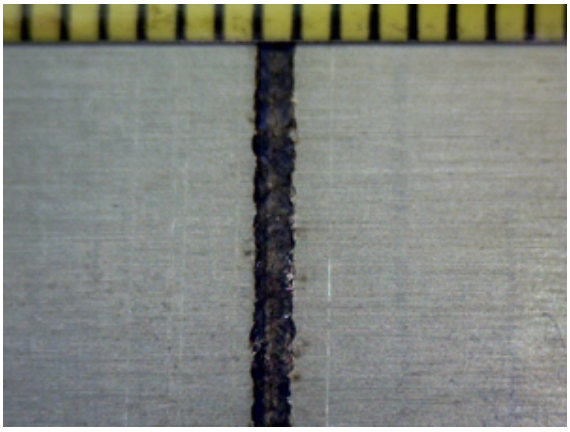
(b) Probe 1.1 Nahtunterseite



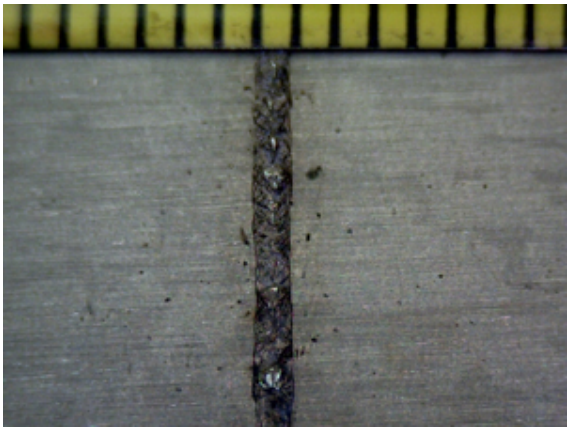
(c) Probe 1.2 Nahtoberseite



(d) Probe 1.2 Nahtunterseite

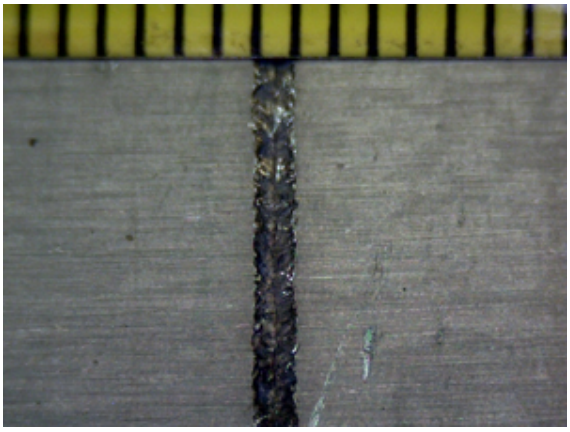


(e) Probe 1.3 Nahtoberseite

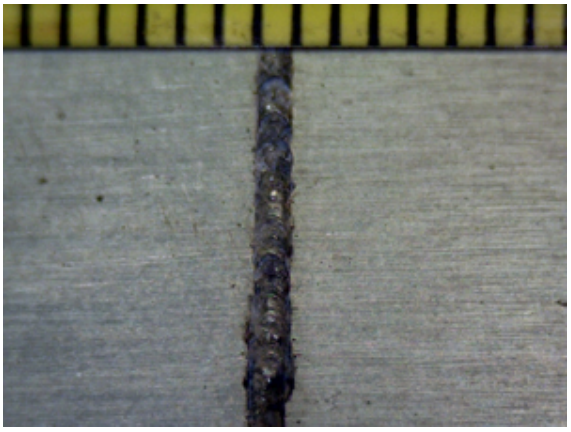


(f) Probe 1.3 Nahtunterseite

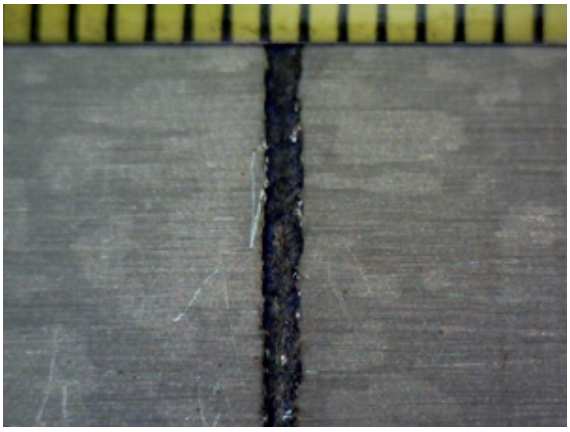
Abbildung 11.1: Schweißnaht 1 bis 3 der Gruppe 1 im Detail



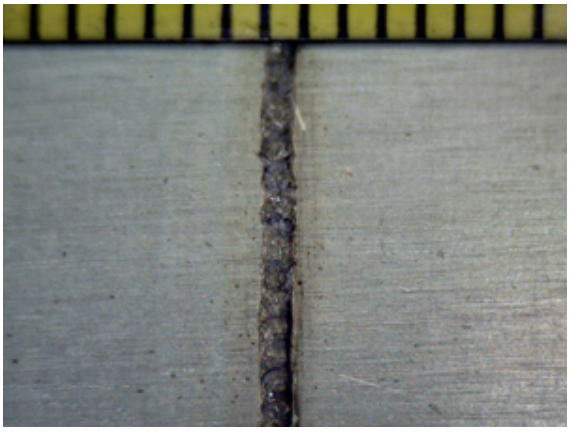
(a) Probe 1.4 Nahtoberseite



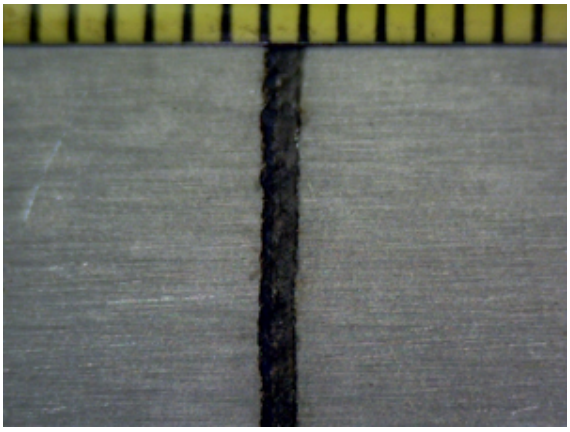
(b) Probe 1.4 Nahtunterseite



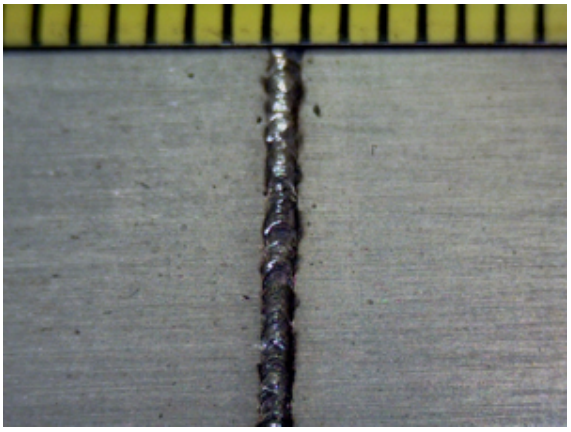
(c) Probe 1.7 Nahtoberseite



(d) Probe 1.7 Nahtunterseite

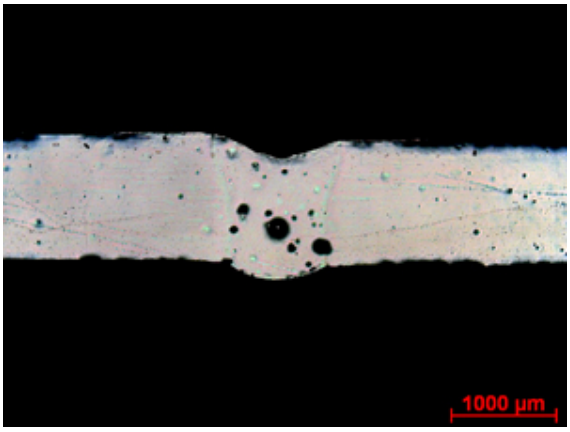


(e) Probe 1.8 Nahtoberseite



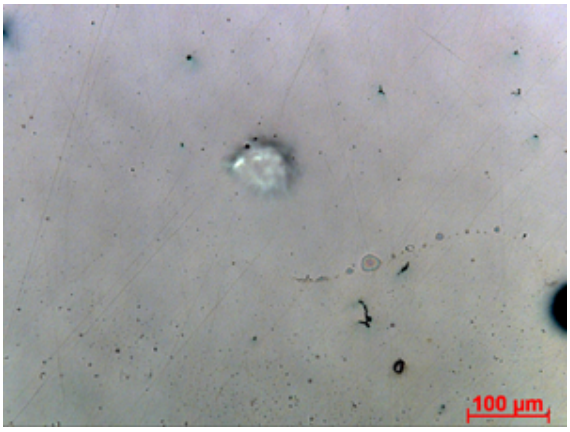
(f) Probe 1.8 Nahtunterseite

Abbildung 11.2: Schweißnähte 4, 7 und 8 der Gruppe 1 im Detail

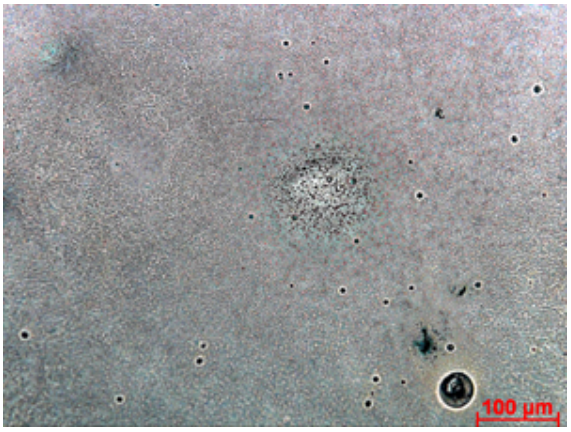



(a) Probe 1.5 25fache Vergrößerung, ungeätzt

(b) Probe 1.5 25fache Vergrößerung, geätzt

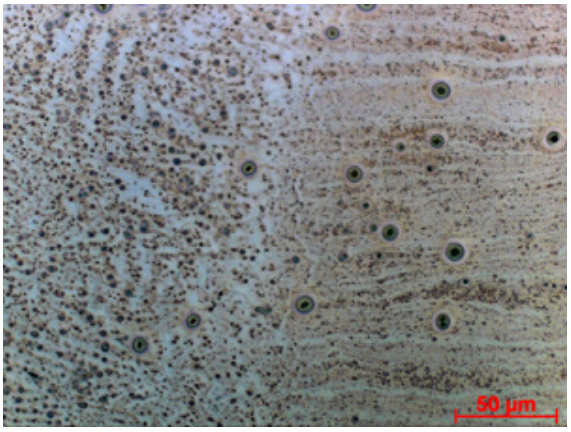



(c) Probe 1.5 200fache Vergrößerung, ungeätzt



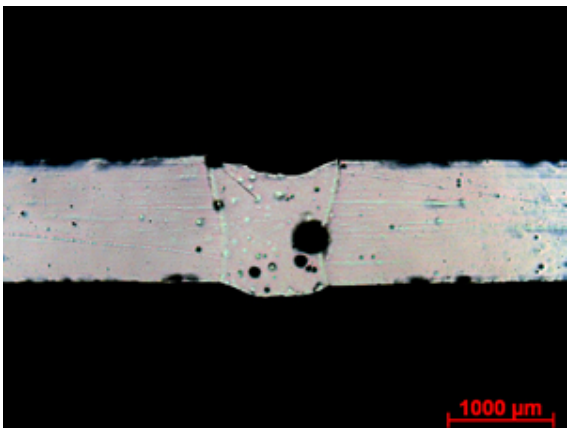

(d) Probe 1.5 200fache Vergrößerung, geätzt

(e) Probe 1.5 500fache Vergrößerung, geätzt



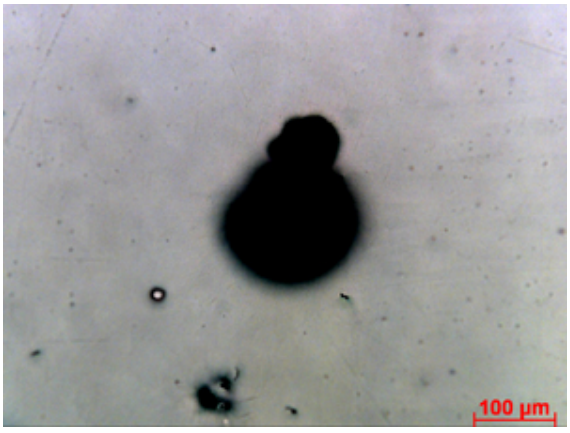

(f) Probe 1.5 500fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 11.3: weitere Schliffbilder der Schweißnaht 5 der Gruppe 1

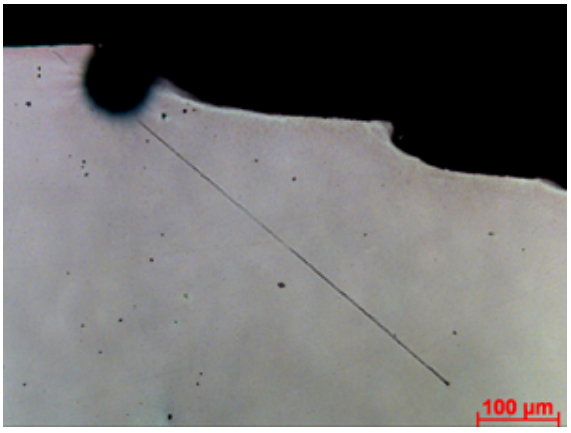



(a) Probe 1.6 25fache Vergrößerung, ungeätzt

(b) Probe 1.6 25fache Vergrößerung, geätzt

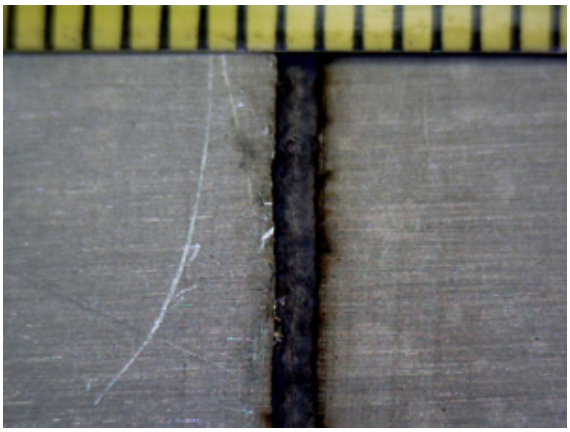



(c) Probe 1.6 200fache Vergrößerung, ungeätzt

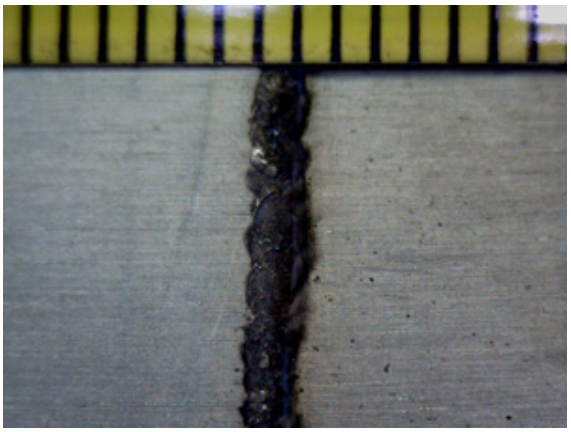



(d) Probe 1.6 200fache Vergrößerung, ungeätzt

Abbildung 11.4: weitere Schliffbilder der Schweißnaht 6 der Gruppe 1

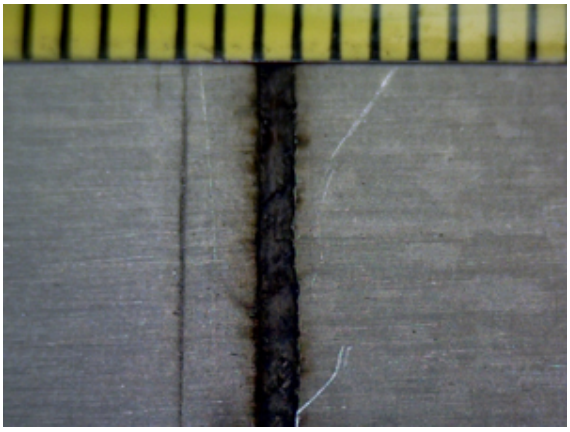


(a) Probe 2.2 Nahtoberseite

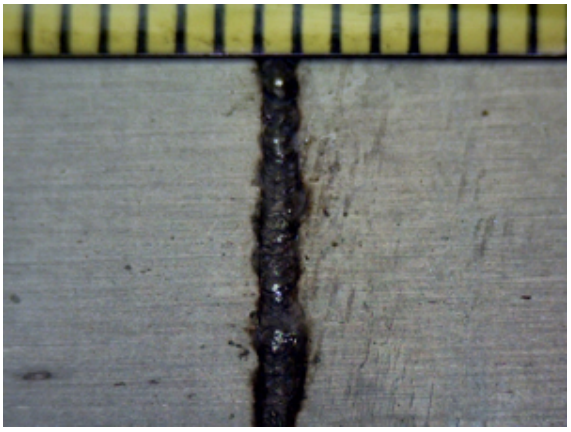


(b) Probe 2.2 Nahtunterseite

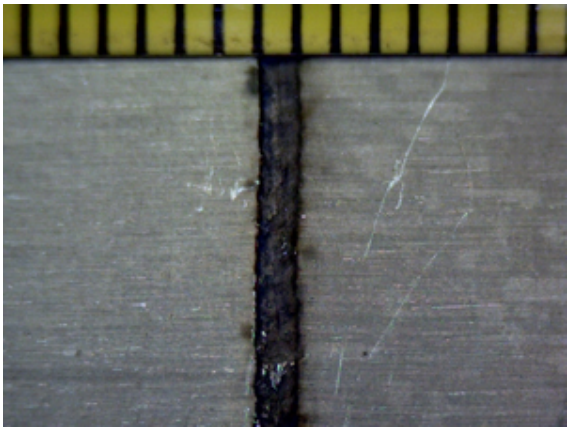
Abbildung 11.5: Schweißnaht 2 der Gruppe 2 im Detail



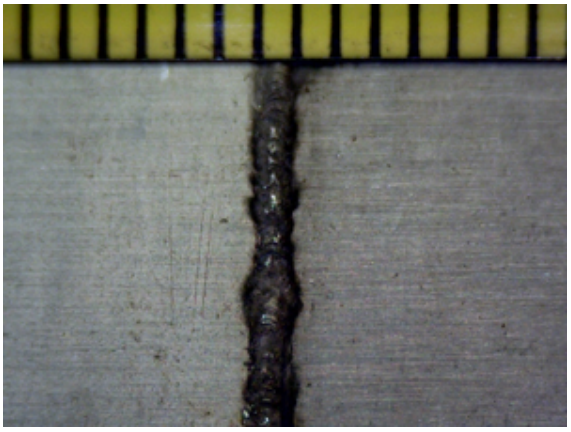
(a) Probe 2.3 Nahtoberseite



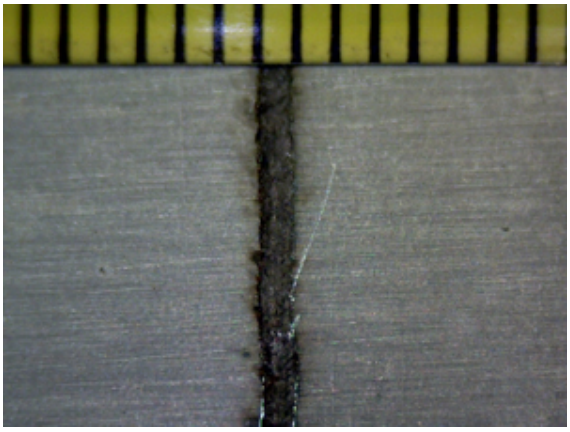
(b) Probe 2.3 Nahtunterseite



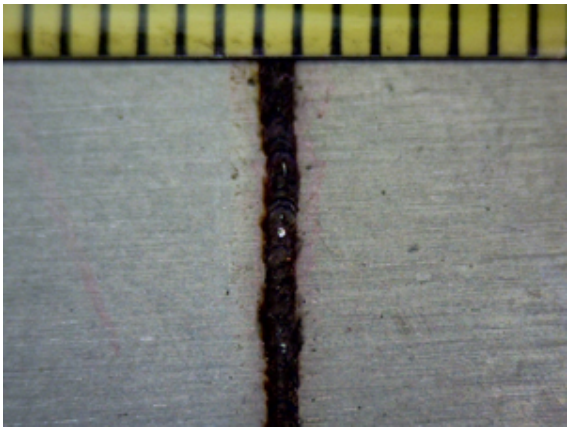
(c) Probe 2.4 Nahtoberseite



(d) Probe 2.4 Nahtunterseite

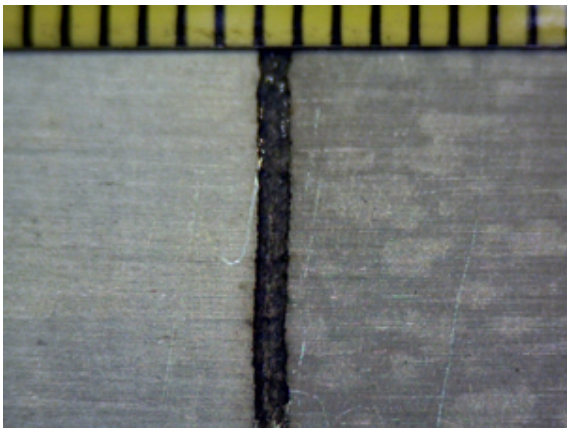


(e) Probe 2.5 Nahtoberseite

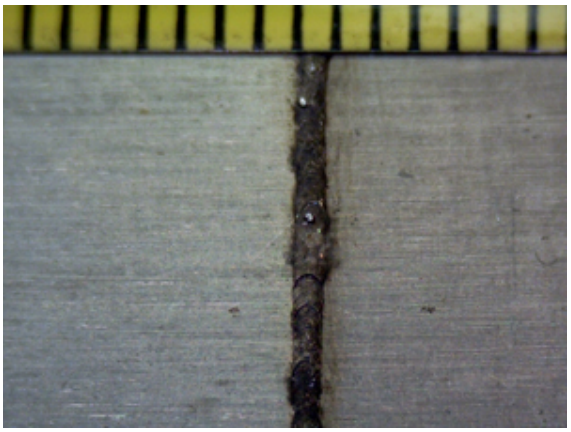


(f) Probe 2.5 Nahtunterseite

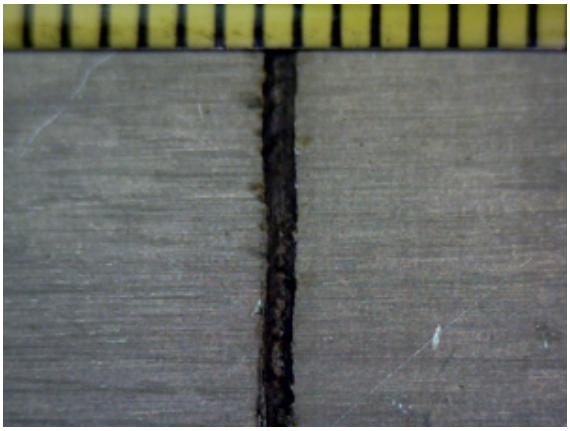
Abbildung 11.6: Schweißnaht 3 bis 5 der Gruppe 2 im Detail



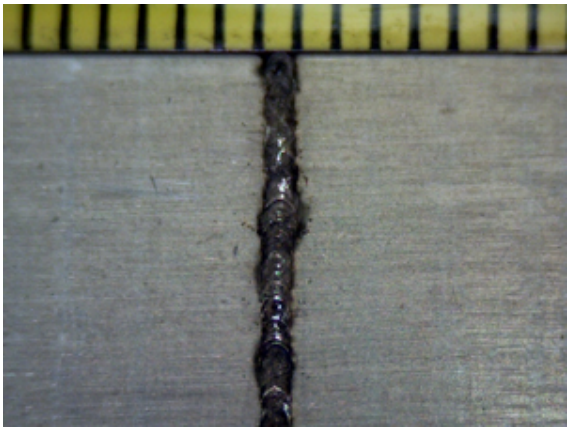
(a) Probe 2.7 Nahtoberseite



(b) Probe 2.7 Nahtunterseite

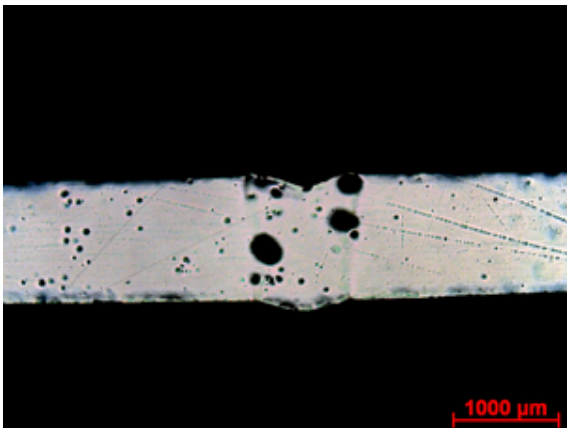


(c) Probe 2.8 Nahtoberseite

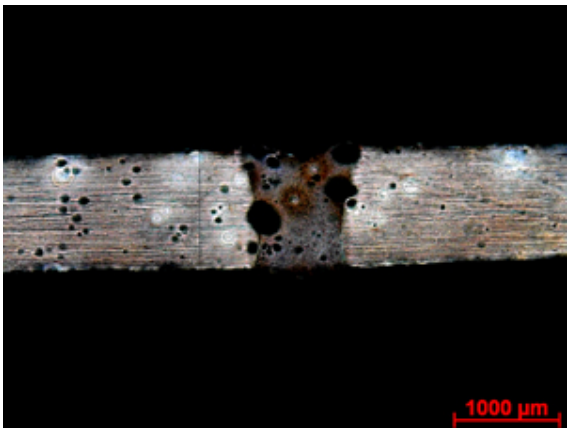


(d) Probe 2.8 Nahtunterseite

Abbildung 11.7: Schweißnähte 7 und 8 der Gruppe 2 im Detail

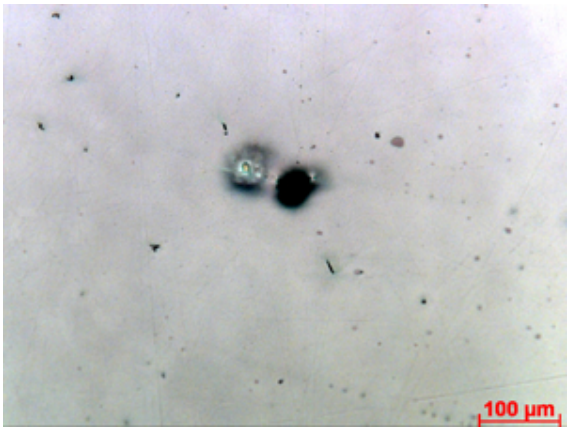



(a) Probe 2.1 25fache Vergrößerung, ungeätzt

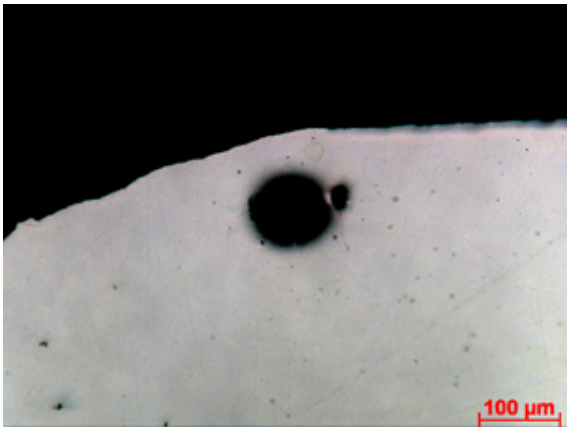



(b) Probe 2.1 25fache Vergrößerung, geätzt

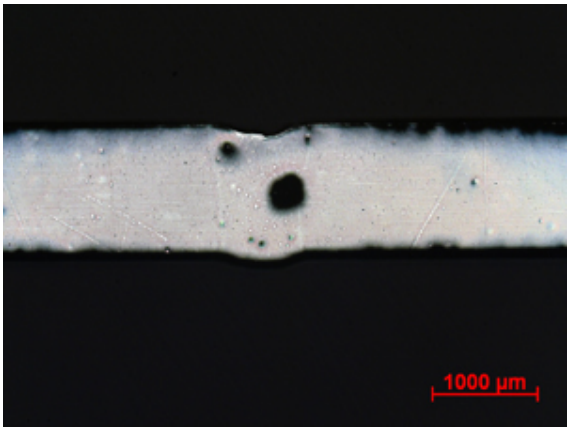
Abbildung 11.8: weitere Schliffbilder der Schweißnaht 1 der Gruppe 2



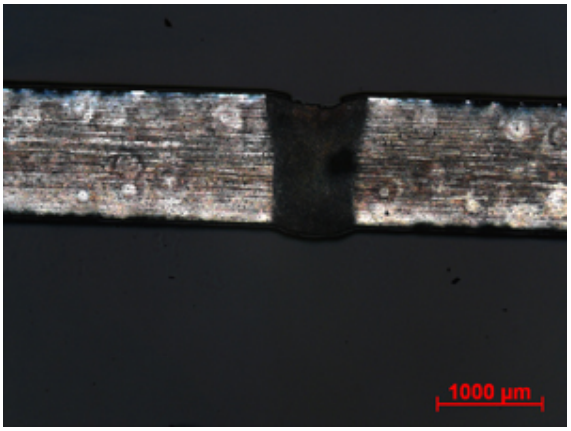

(a) Probe 2.1 200fache Vergrößerung, ungeätzt



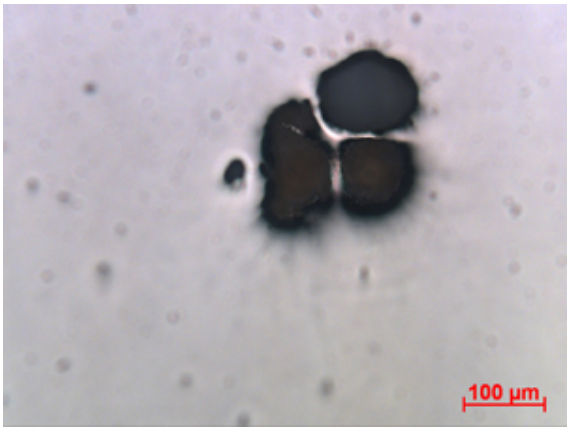

(b) Probe 2.1 200fache Vergrößerung, geätzt



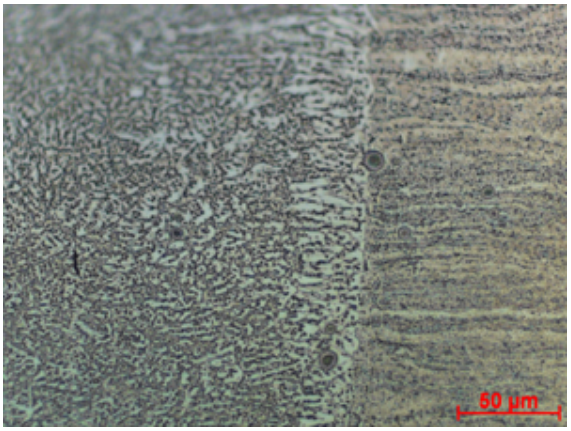

(c) Probe 2.6 25fache Vergrößerung, ungeätzt




(d) Probe 2.6 25fache Vergrößerung, geätzt

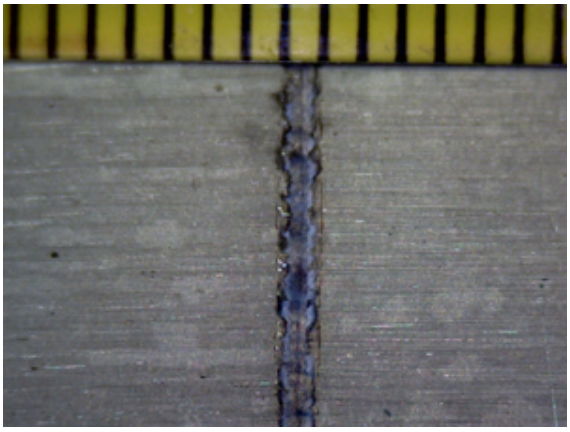



(e) Probe 2.6 200fache Vergrößerung, ungeätzt

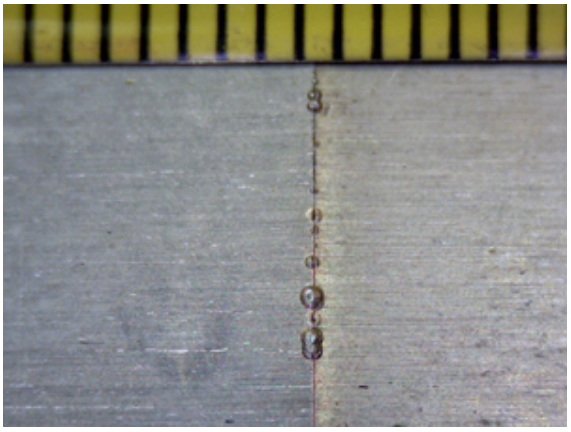



(f) Probe 2.6 500fache Vergrößerung, geätzt

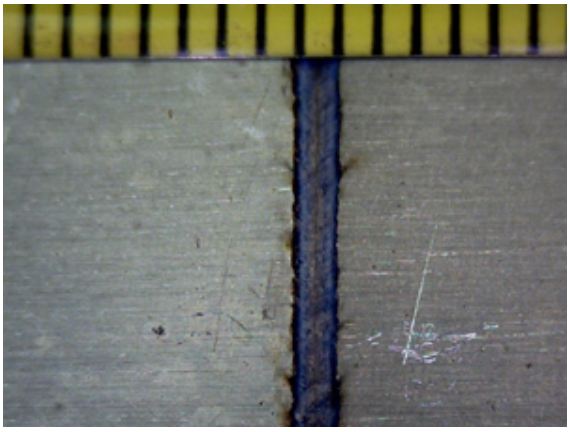
Abbildung 11.9: weitere Schliffbilder der Schweißnähte 1 und 6 der Gruppe 2



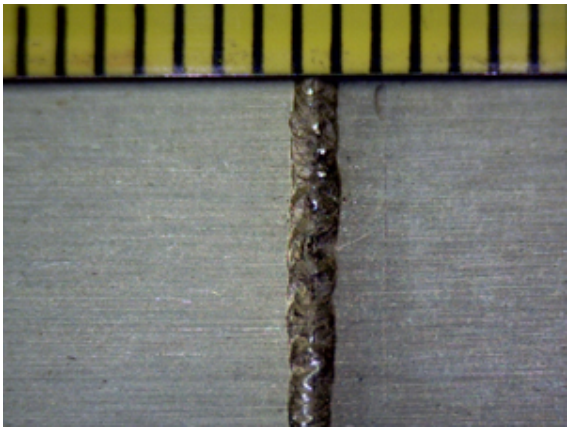
(a) Probe 3.1 Nahtoberseite



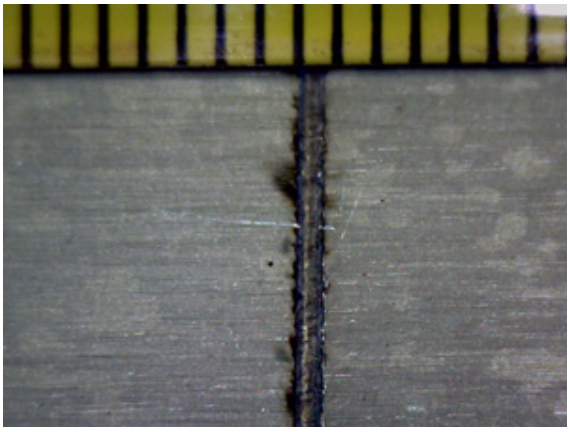
(b) Probe 3.1 Nahtunterseite



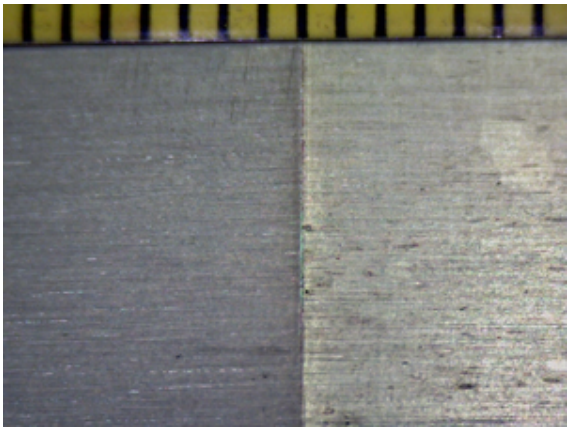
(c) Probe 3.2 Nahtoberseite



(d) Probe 3.2 Nahtunterseite

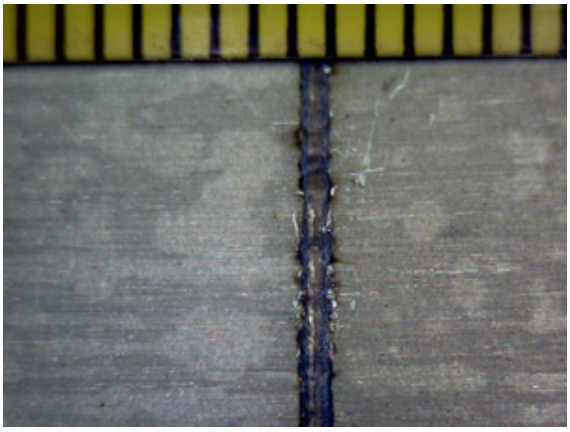


(e) Probe 3.3 Nahtoberseite

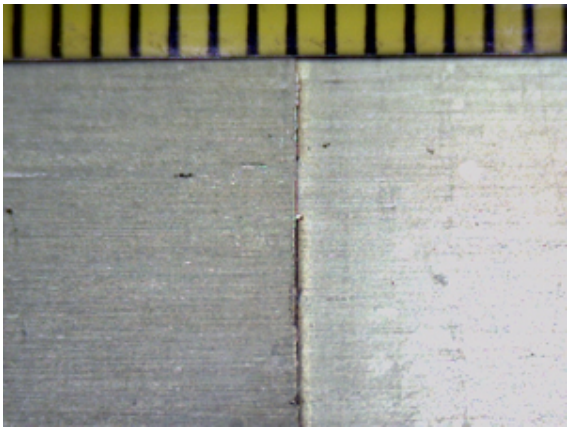


(f) Probe 3.3 Nahtunterseite

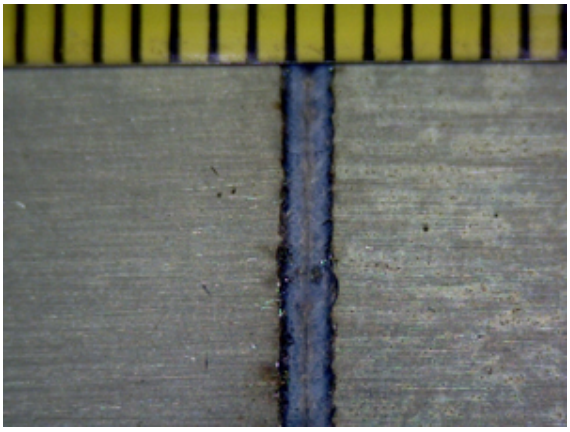
Abbildung 11.10: Schweißnaht 1 bis 3 der Gruppe 3 im Detail



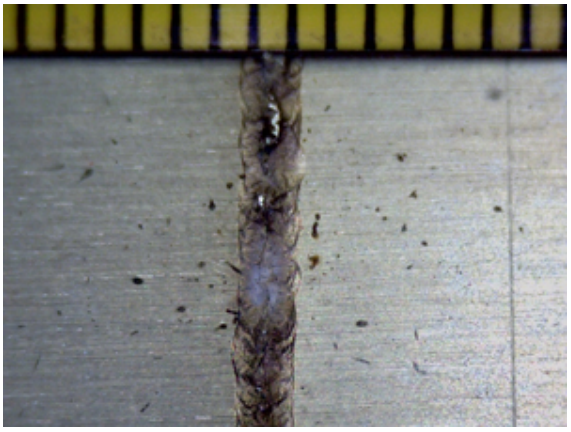
(a) Probe 3.5 Nahtoberseite



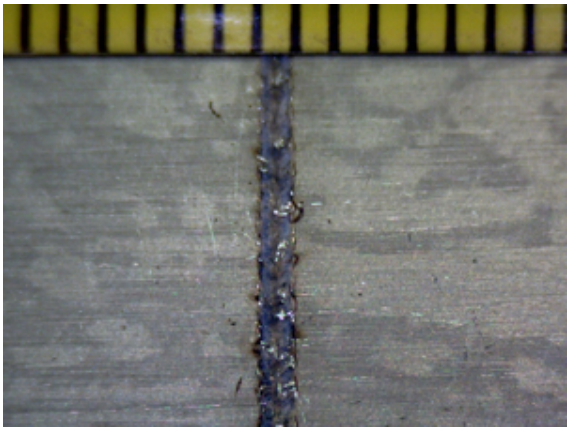
(b) Probe 3.5 Nahtunterseite



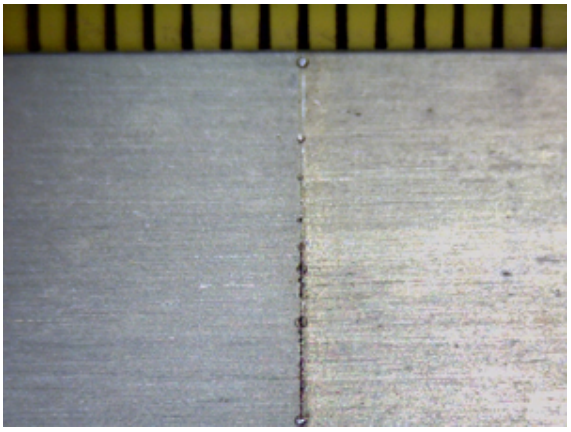
(c) Probe 3.6 Nahtoberseite



(d) Probe 3.6 Nahtunterseite

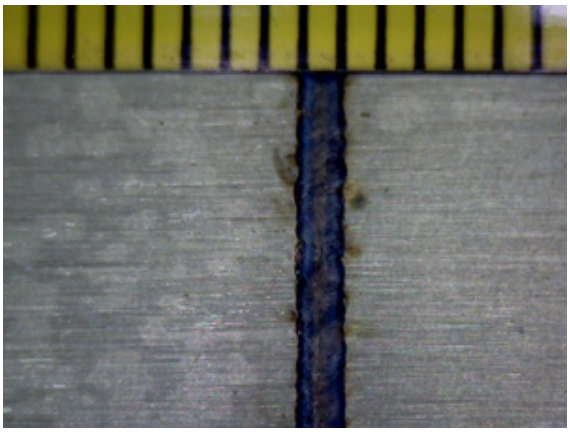


(e) Probe 3.7 Nahtoberseite

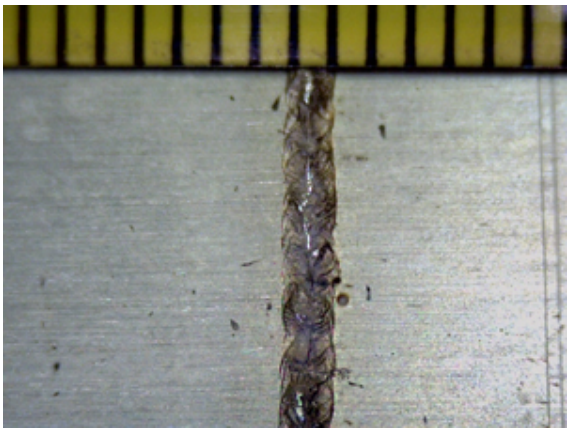


(f) Probe 3.7 Nahtunterseite

Abbildung 11.11: Schweißnähte 5 bis 7 der Gruppe 3 im Detail

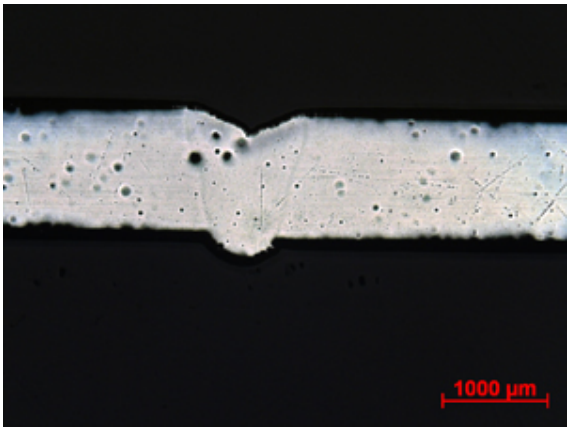


(a) Probe 3.8 Nahtoberseite

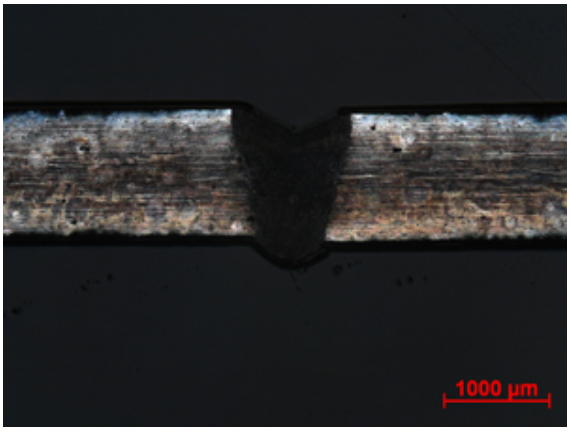


(b) Probe 3.8 Nahtunterseite

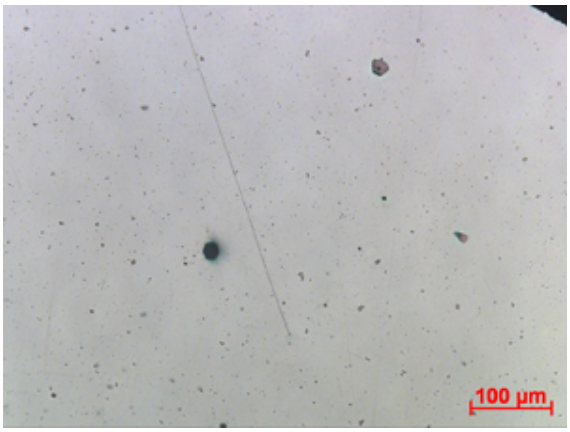
Abbildung 11.12: Schweißnaht 8 der Gruppe 3 im Detail



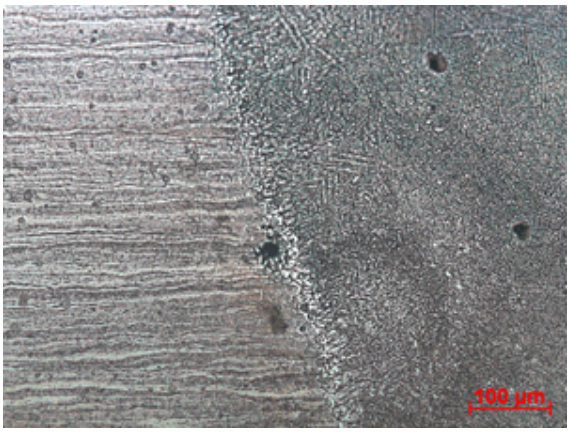

(a) Probe 3.4 25fache Vergrößerung, ungeätzt




(b) Probe 3.4 25fache Vergrößerung, geätzt

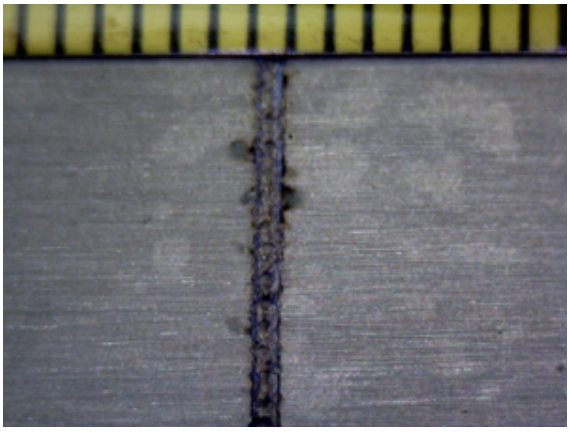



(c) Probe 3.4 200fache Vergrößerung, ungeätzt

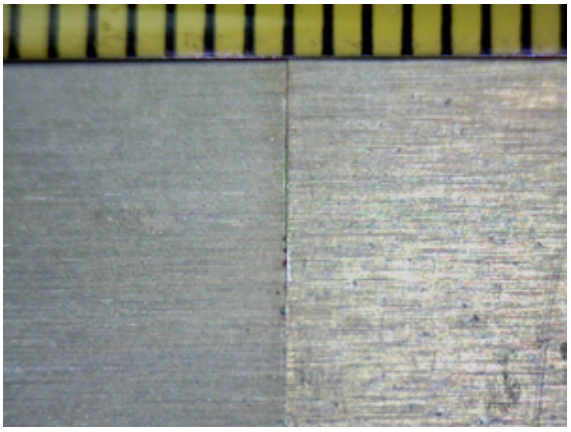



(d) Probe 3.4 200fache Vergrößerung, geätzt

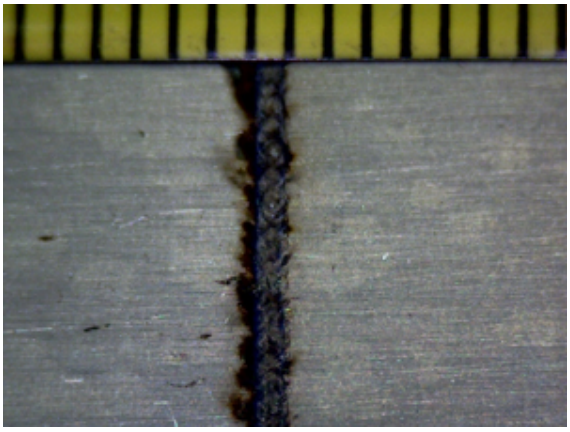
Abbildung 11.13: weitere Schliffbilder der Schweißnaht 4 der Gruppe 3



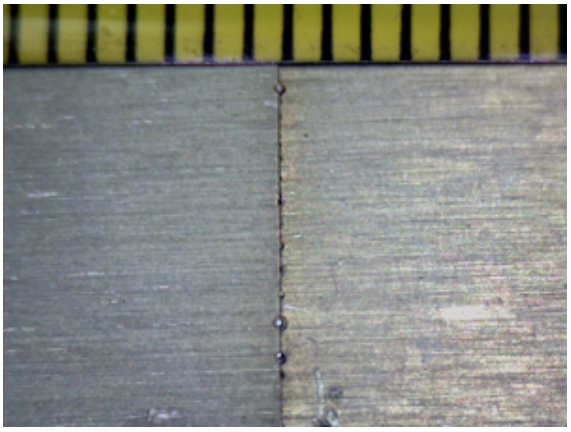
(a) Probe 4.1 Nahtoberseite



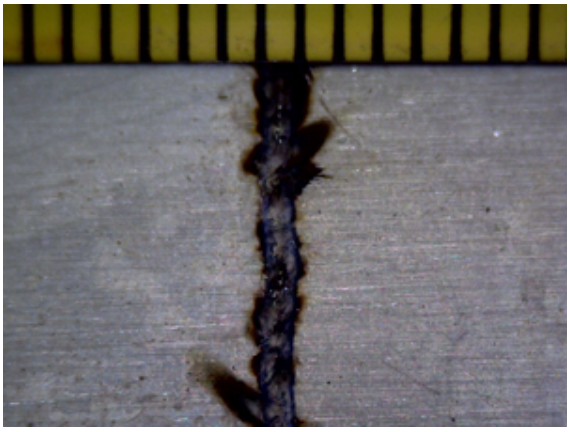
(b) Probe 4.1 Nahtunterseite



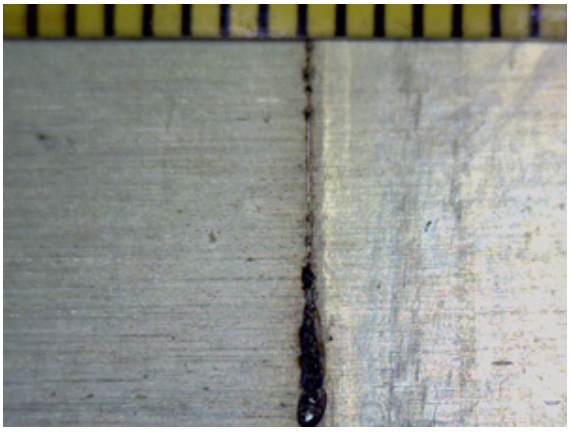
(c) Probe 4.2 Nahtoberseite



(d) Probe 4.2 Nahtunterseite

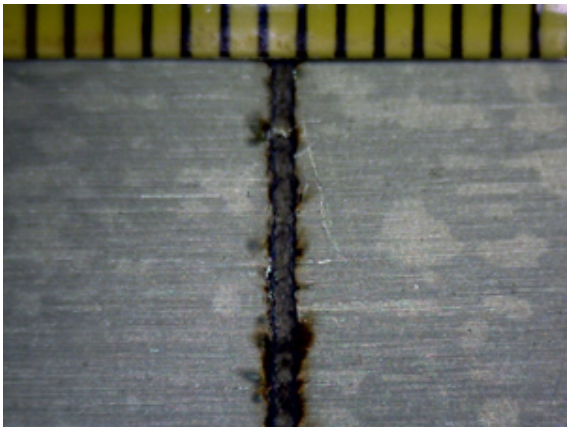


(e) Probe 4.4 Nahtoberseite

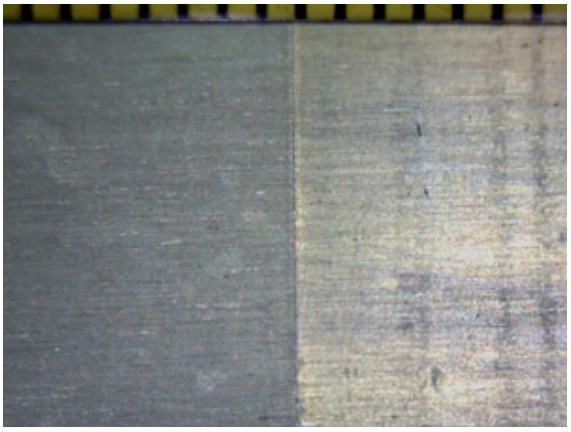


(f) Probe 4.4 Nahtunterseite

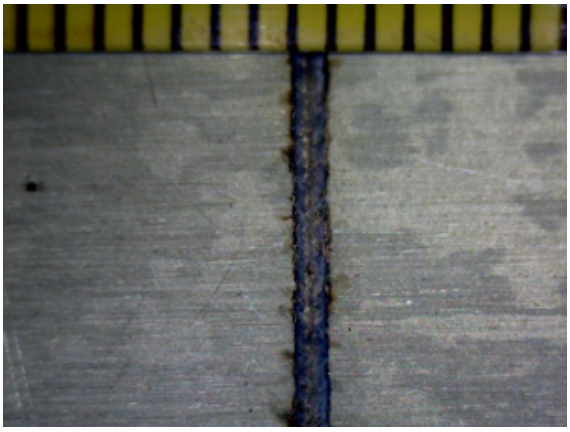
Abbildung 11.14: Schweißnaht 1,2 und 4 der Gruppe 4 im Detail



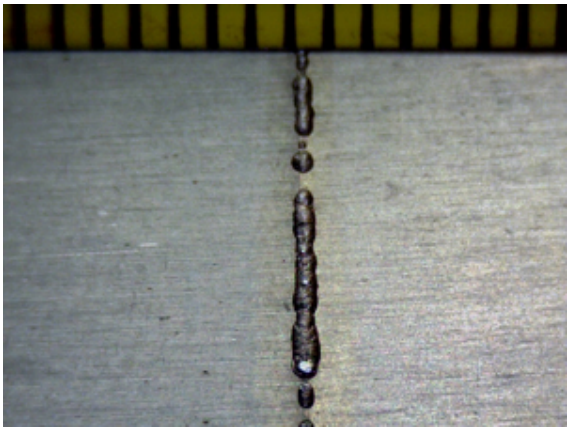
(a) Probe 4.5 Nahtoberseite



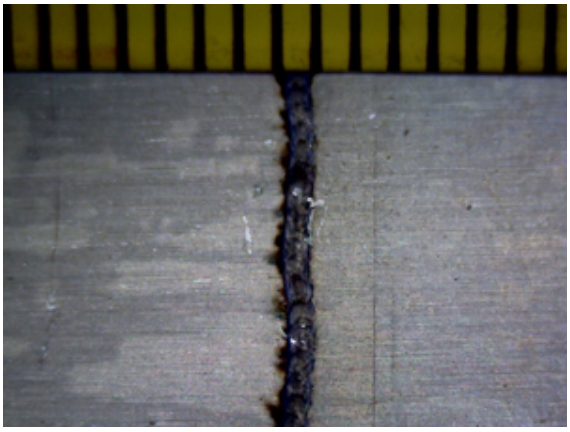
(b) Probe 4.5 Nahtunterseite



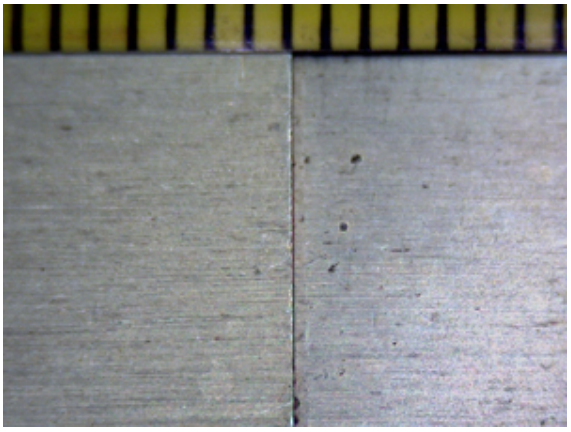
(c) Probe 4.6 Nahtoberseite



(d) Probe 4.6 Nahtunterseite

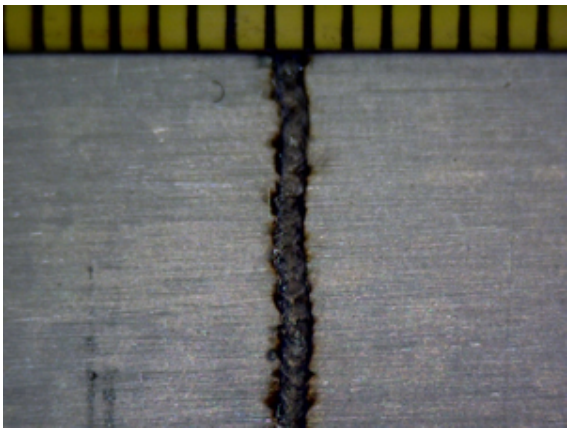


(e) Probe 4.7 Nahtoberseite

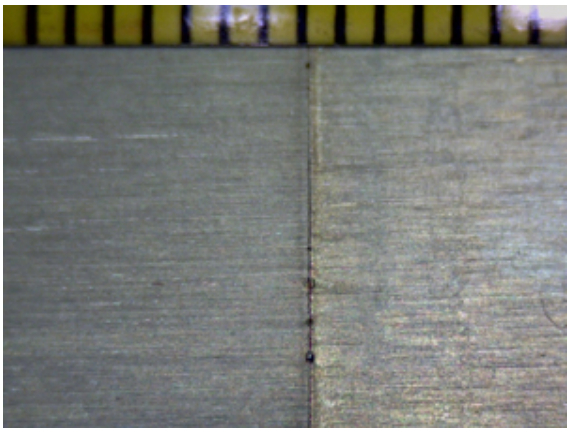


(f) Probe 4.7 Nahtunterseite

Abbildung 11.15: Schweißnähte 5 bis 7 der Gruppe 4 im Detail

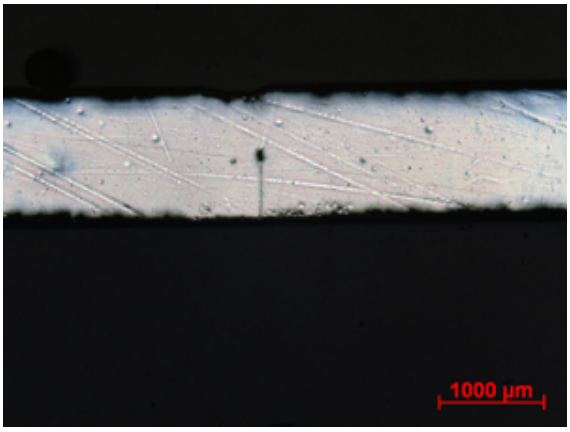


(a) Probe 4.8 Nahtoberseite

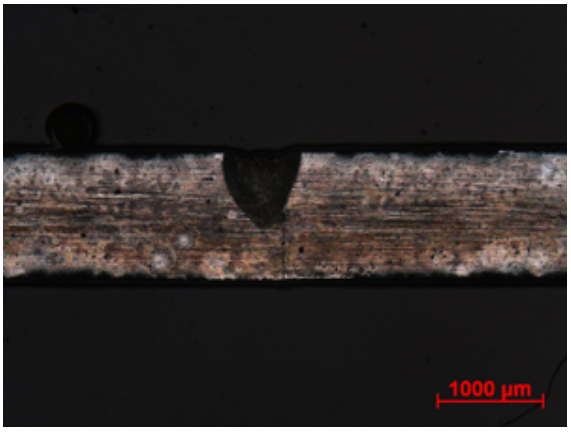


(b) Probe 4.8 Nahtunterseite

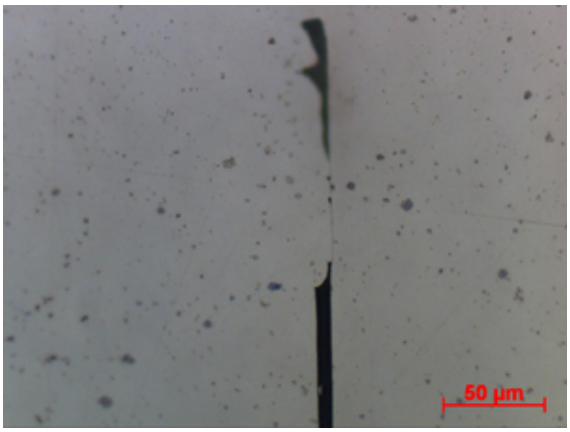
Abbildung 11.16: Schweißnaht 8 der Gruppe 4 im Detail



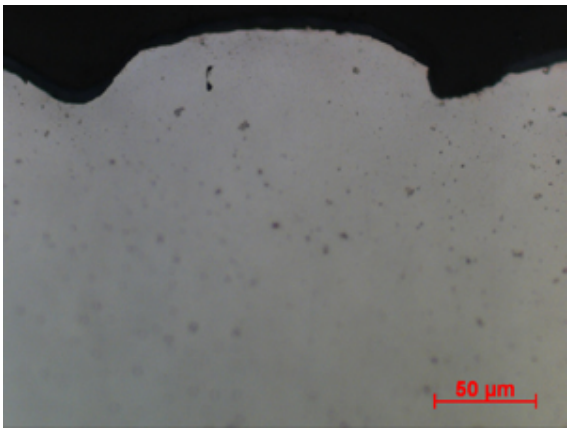

(a) Probe 4.3 25fache Vergrößerung, ungeätzt




(b) Probe 4.3 25fache Vergrößerung, geätzt

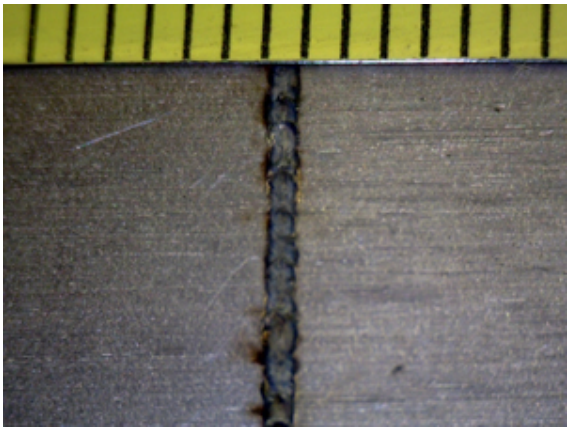



(c) Probe 4.3 500fache Vergrößerung, ungeätzt

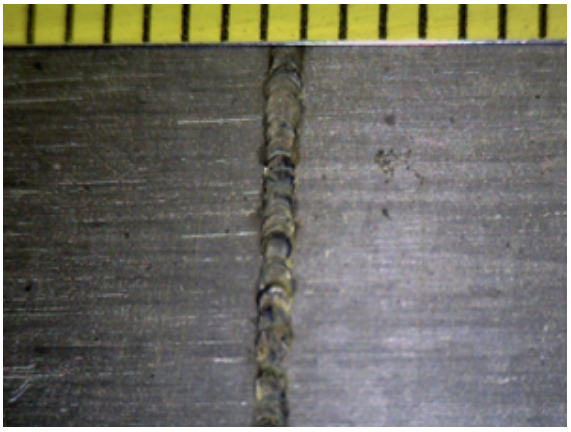



(d) Probe 4.3 500fache Vergrößerung, geätzt

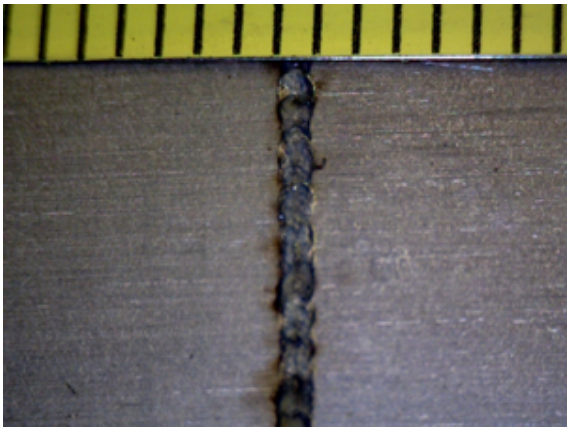
Abbildung 11.17: weitere Schliffbilder der Schweißnaht 3 der Gruppe 4



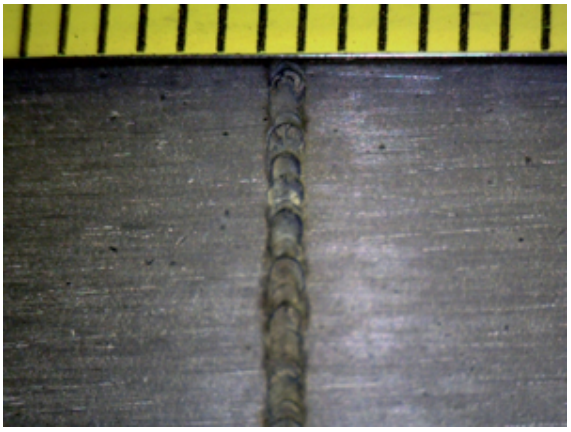
(a) Probe 5.1 Nahtoberseite



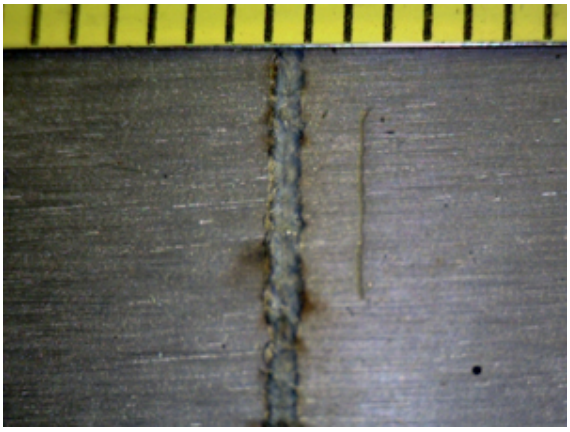
(b) Probe 5.1 Nahtunterseite



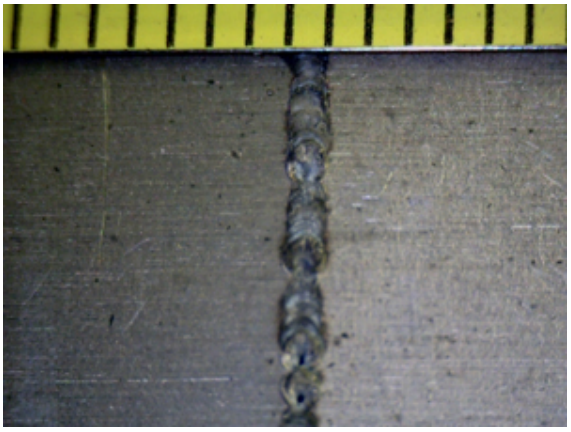
(c) Probe 5.4 Nahtoberseite



(d) Probe 5.4 Nahtunterseite

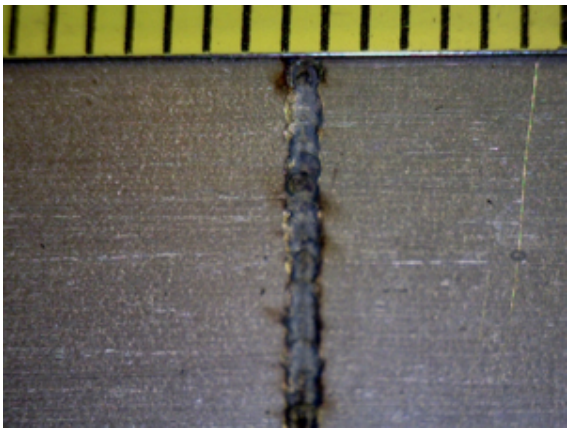


(e) Probe 5.5 Nahtoberseite

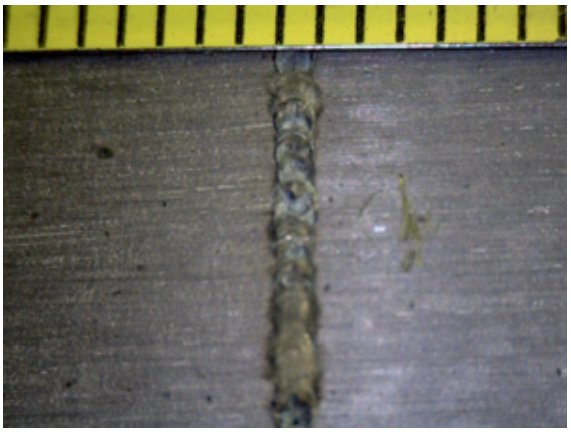


(f) Probe 5.5 Nahtunterseite

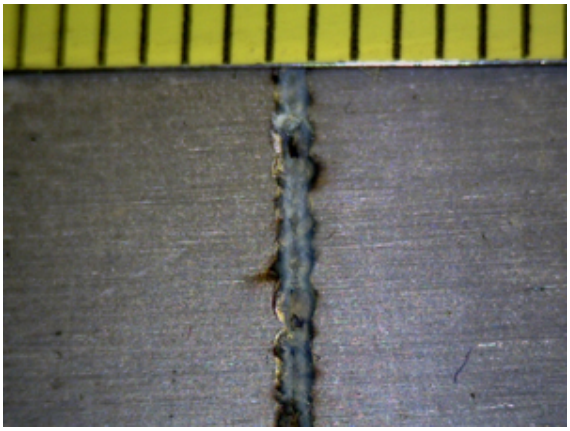
Abbildung 11.18: Schweißnähte 1, 4 und 5 der Gruppe 5 im Detail



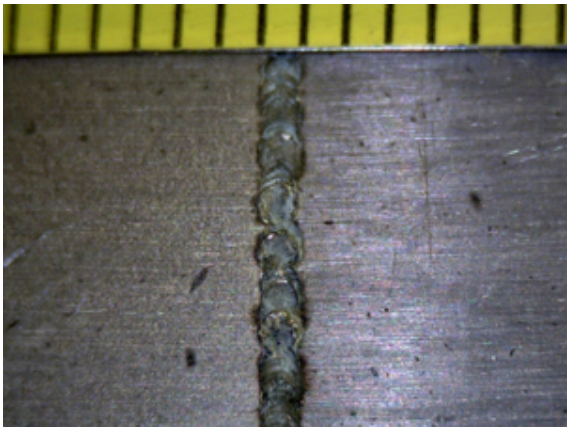
(a) Probe 5.6 Nahtoberseite



(b) Probe 5.6 Nahtunterseite

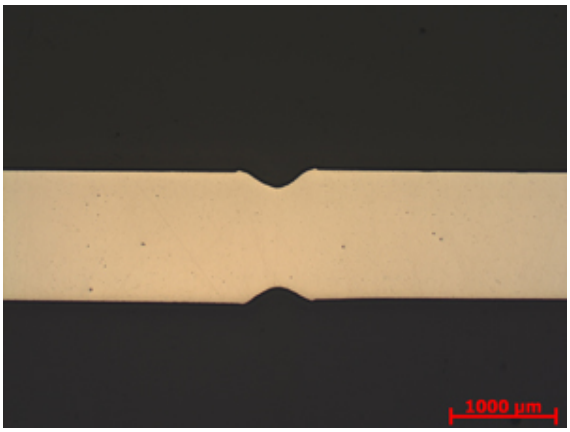


(c) Probe 5.7 Nahtoberseite

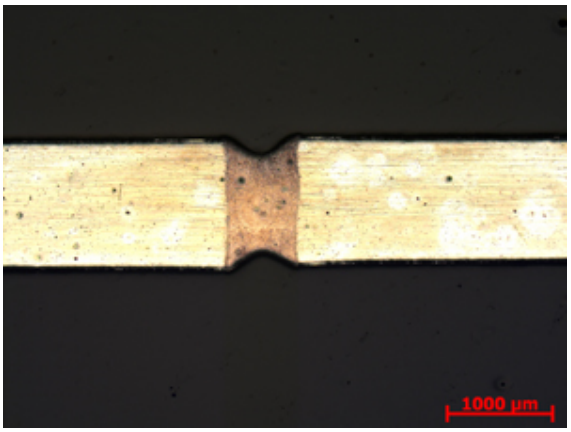


(d) Probe 5.7 Nahtunterseite

Abbildung 11.19: Schweißnähte 6 und 7 der Gruppe 5 im Detail

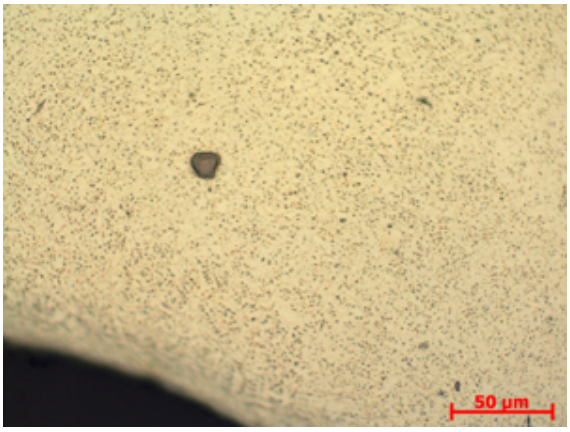



(a) Probe 5.2 25fache Vergrößerung, ungeätzt

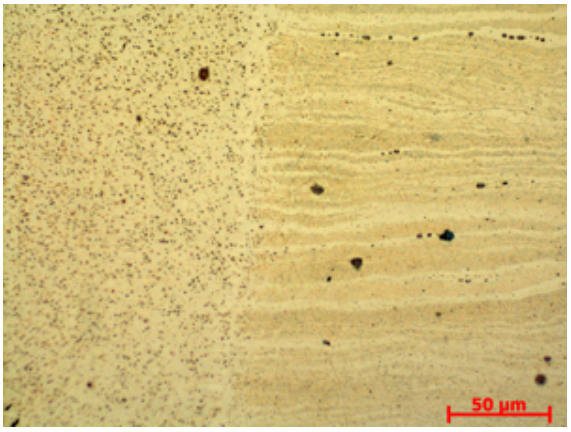



(b) Probe 5.2 25fache Vergrößerung, geätzt

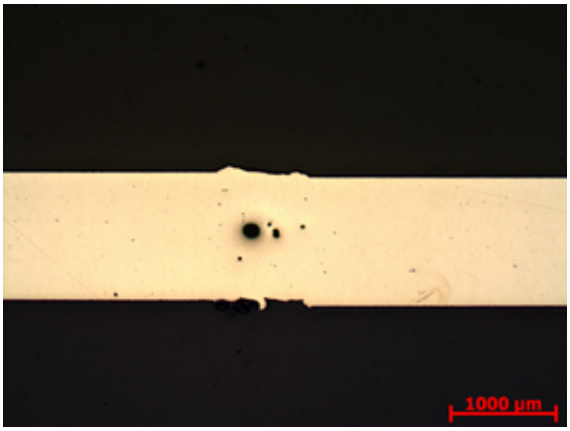
Abbildung 11.20: weitere Schliffbilder der Schweißnaht 2 der Gruppe 5



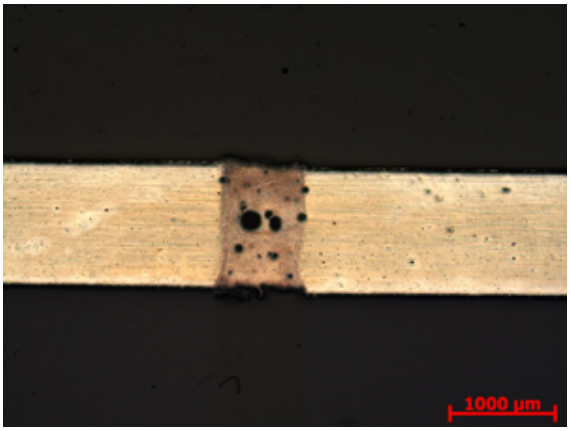

(a) Probe 5.2 500fache Vergrößerung, geätzt



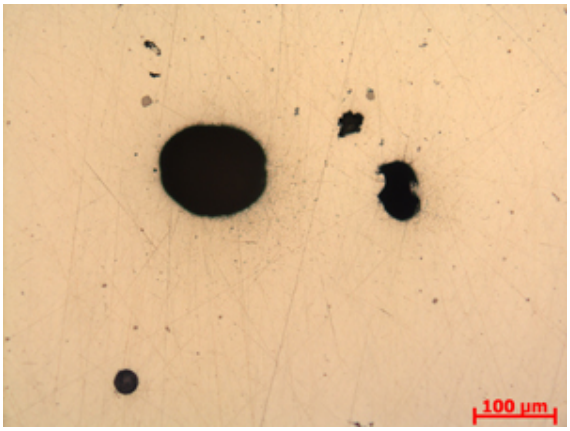

(b) Probe 5.2 500fache Vergrößerung, geätzt



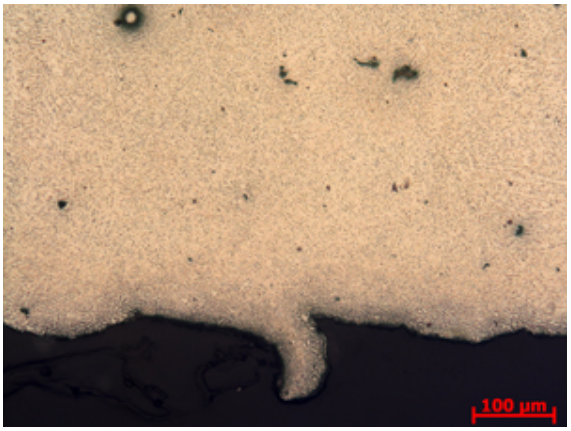

(c) Probe 5.3 25fache Vergrößerung, ungeätzt




(d) Probe 5.3 25fache Vergrößerung, geätzt

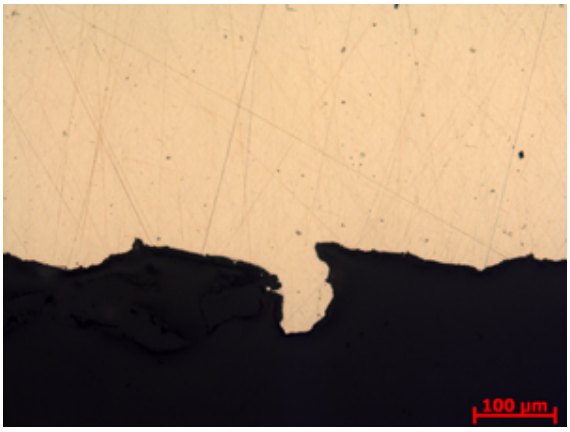



(e) Probe 5.3 200fache Vergrößerung, ungeätzt

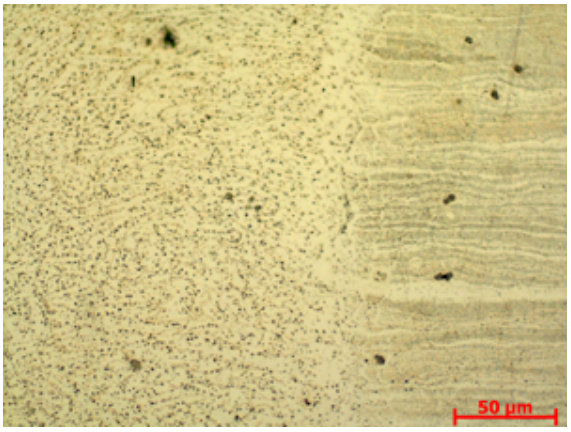



(f) Probe 5.3 200fache Vergrößerung, geätzt

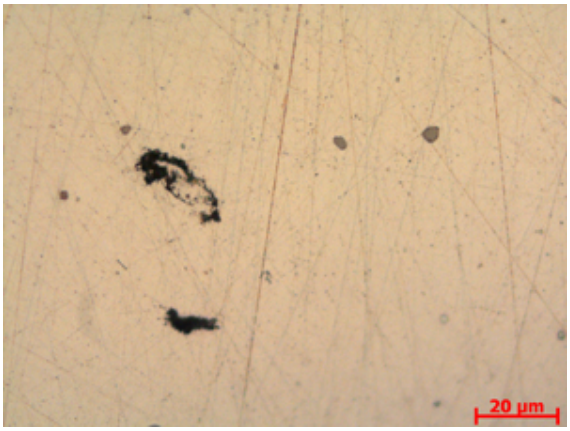
Abbildung 11.21: weitere Schliffbilder der Schweißnähte 2 und 3 der Gruppe 5



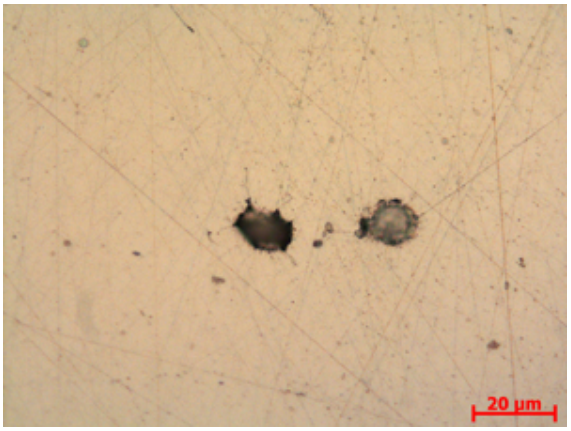

(a) Probe 5.3 200fache Vergrößerung, ungeätzt



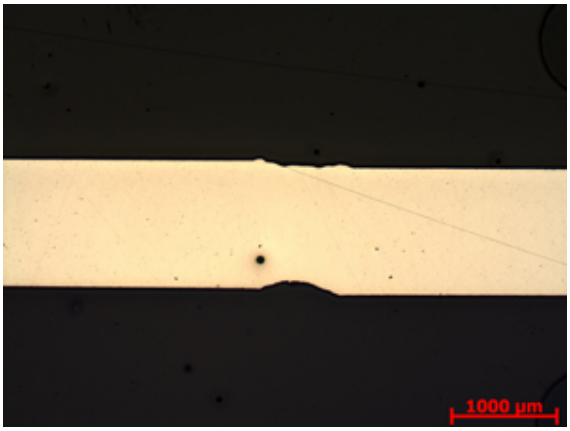

(b) Probe 5.3 500fache Vergrößerung, geätzt



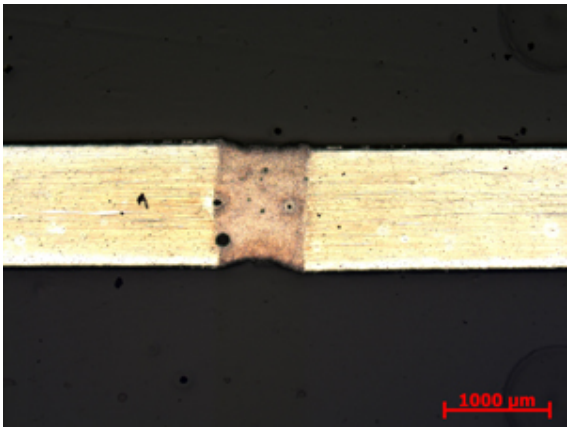

(c) Probe 5.3 1000fache Vergrößerung, ungeätzt




(d) Probe 5.3 1000fache Vergrößerung, ungeätzt

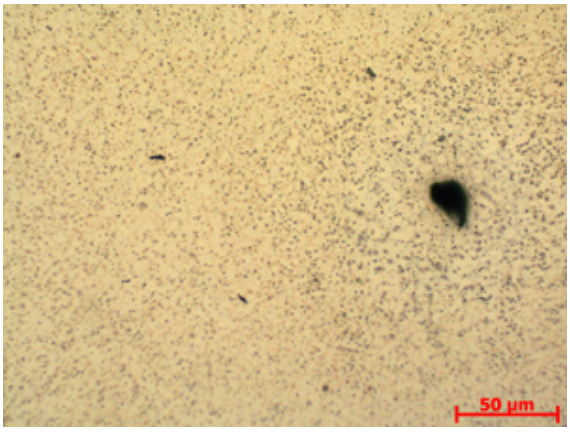



(e) Probe 5.8 25fache Vergrößerung, ungeätzt

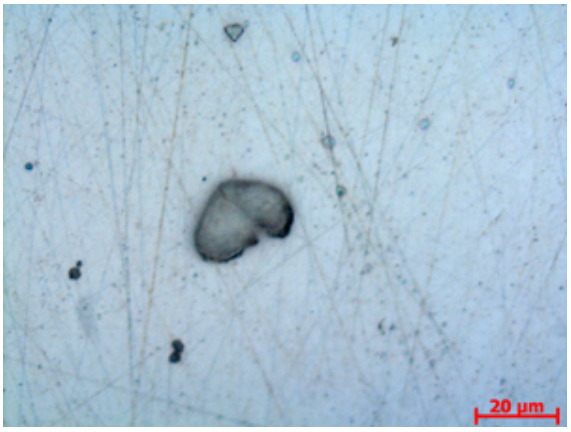



(f) Probe 5.8 25fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 11.22: weitere Schliffbilder der Schweißnähte 3 und 8 der Gruppe 5

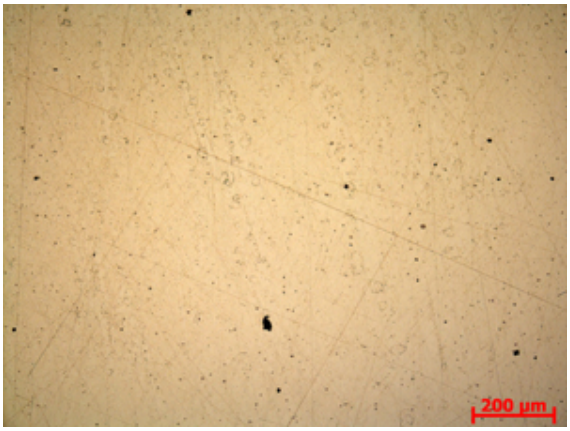



(a) Probe 5.8 500fache Vergrößerung, ungeätzt

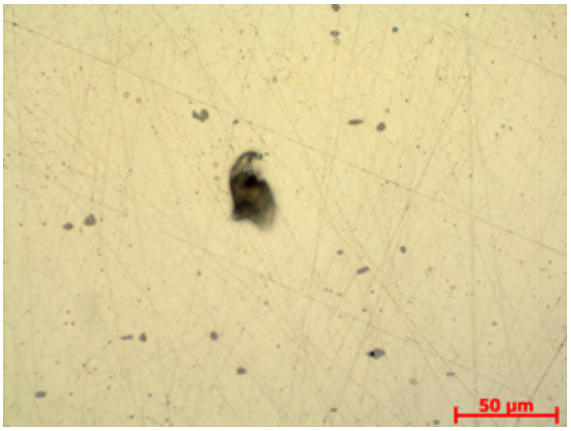



(b) Probe 5.8 1000fache Vergrößerung, geätzt

Abbildung 11.23: weitere Schliffbilder der Schweißnaht 8 der Gruppe 5




(a) Grundmaterial 100fache Vergrößerung




(b) Grundmaterial 500fache Vergrößerung

Abbildung 11.24: weitere Schliffbilder des ungeätzten Grundmaterials AZ31

# Literaturverzeichnis


[1] *HIGHYAG Lasertechnologie GmbH, Laserbearbeitungskopf BIMO Manual, Stahnsdorf, Deutschland, 2009.* : *HIGHYAG Lasertechnologie GmbH, Laserbearbeitungskopf BIMO Manual, Stahnsdorf, Deutschland, 2009*

[2] *IPG Laser GmbH, YLR-1500CT Manual , 2005.* : *IPG Laser GmbH, YLR-1500CT Manual , 2005*

[3] Alumatter: Friction Stir Welding. In: *http : //aluminium.matter.org.uk* (25.2.2011)

[4] AUVA: Grundlagen der Lasersicherheit. In: *Sicherheitsinformation der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt* 2 (2009)

[5] Berger, P.: Gestaltung und Kontrolle des Nahtdurchhangs beim Strahlschweißen. In: *Institut für Strahlwerkzeuge Universität Stuttgart AIF-Schlussbericht* FV 14.959 N (2009)

[6] Brenner, B.: *Laserstrahlschweißen für den Leichtbau.* Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgard, 2006

[7] Danzer, W.: Fügen von Magnesium und Magnesiumlegierungen. In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 36/6 (2005), S. 264–269

[8] Dilthey, U. ; Trube, S.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren Band 2.* VDI Verlag, 1995

[9] Dorn, L. ; Grutzeck, H. ; Jafari, S.: *Schweißen und Löten mit Festkörperlasern.* Springer -Verlag, Berlin, 1992

[10] Draugelates, U. ; A.Schram ; Chr.Kettler: Laserstrahlschweißen und Reibschweißen von Magnesiumlegierungen. In: *DVS-Berichte* 194 (1998), S. 129–135

[11] DVS-Media ; DVS (Hrsg.): *DVS 3214 Unregelmäßigkeiten an Laserstrahlschweißnähten - Ursachen und Abhilfemaßnahmen.* DVS Verlag Gmbh, Düsseldorf, 2009

[12] Fischer, A.: *Praktikum Grundlagen der Werkstofftechnik.* Institut für Produkt Engineering Universität Duisburg-Essen, 2006

[13] Geistert, B.: Digitale Radiologie. In: *Schweizerischer Verein für Schweisstechnik, http://www.svsxass.ch* (2011)

[14] Hahn, O. ; Horstmann, M. ; Wielage, B. ; Mücklich, S.: Fügeverfahren im Vergleich: Löten, Kleben, Mechanisches Fügen von Magnesium. In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 38/2 (2007), S. 173–177

[15] Hügel, H.: *Strahlwerkzeug Laser.* B.G.Teubner, Stuttgart, 1992

[16] Holtaus, Markus: *Laser in der Produktion.* VDI-Verlag Gmbh, Düsseldorf, 2001

[17] Horn, H.: Neue Entwicklungen bei Reibschweißverfahren. In: *http* : $//www.haw-hamburg.de/fileadmin/user_upload/IWS/PDF/dvs_2002reibschw.pdf$(18.2.11) (2002)

[18] Jena, Uni: Faserlaser. In: *http* : $//www.personal.uni-jena.de/\ p3dosv/pdf/Faserlaser_Script.pdf$(15.3.2011) (2011)

[19] Kainer, K.U.: *Magnesium Eigenschaften, Anwendungen, Potentiale.* WILEY-VCH Verlag Gmbh, 2000

[20] Kallage, Peter: *Schweißpraxis aktuell: Laserschweißen.* WEKA MEDIA Gmbh & Co.KG, Kissing, 2010

[21] Kleiner, S.: Magnesium und seine Legierungen. In: *Feinstbearbeitung technischer Oberflächen* 6. Internationales IWF-Kolloquium (18./19.4.2002), S. 19–21

[22] Kolodziejczak, P. ; Kalita, W.: Properties of $CO_2$ Laser-weldet butt joints of dissimilar magnesium alloys. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), S. 1122–1128

[23] MMSOnline: Friction Stir Welding. In: *http* : $//www.mmsonline.com/articles/friction-stir-weldingit39s-not-just-for-aluminum$ (25.2.2011)

[24] Mordike, L. ; Wiesner, P.: *Fügen von Magnesiumwerkstoffen.* DVS Verlag Gmbh, Düsseldorf, 2005

[25] MPA, Materialprüfungsanstalt Universität S.: Metallographie. In: *http* : $//mitglied.multimania.de/fpgc/downs/09_Metallographie.pdf$ (2009)

[26] Neubert, J. ; Weilnhammer, G.: *Laserstrahlschweißen Leitfaden für die Praxis.* DVS Media Gmbh, Düsseldorf, 2009

[27] Ophiopt: Optiken für $CO_2$-Laser. In: *http* : $//www.ophiropt.com/de/co2-lasers-optics/mirrors$ (2011)

[28] Phoenix: FAQ´s zu Röntgenröhren. In: *http://www.phoenix-xray.com* (2011)

[29] Quan, Y. ; Chen, Z. ; Gong, X. ; Yu, Z.: Effects of heat input on microstructure and tensile Proerties of laserwelded magnesiumalloy AZ31. In: *Materials Characterization* 59 (2008), S. 1491–1497

[30] Reuter, M.: Schweißtechnik. In: *Skriptum Fachhochschule Hamburg Fachbereich M+P* (2001), S. 1–26

[31] Richter, E.: *Schweißtechnik.* Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2008

[32] Rofin: Schweißverfahren. In: $http://www.rofin.de/?id = 506$ (23.2.2011)

[33] Schaller, E.: Metallographie, Lichtmikroskopie Praktikum 4. In: *www.metphys.mat.ethz.ch/education/courses/praktikum4/prakt4.pdf* (2011)

[34] Scheffler, E.: *Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung.* Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1973

[35] Schnabel, W.: Reibschweißen: Vorteile/Nachteile. In: *http://www.lohnreibschweissen.de/vorteile-nachteile.html (15.4.2011)* (2011)

[36] Seefeld, T. ; Gumenyuk, A.: Prozessverständnis beim Strahlschweißen von Aluminium. In: *DVS-Berichte* 266 (2010), S. 45–51

[37] Suhuddin, U. ; Mironov, S. ; Sato, Y. ; Kokawa, H. ; Lee, C.: Grain structure evolution during friction-stir welding of AZ31 magnesium alloy. In: *Acta Materialia* 57 (2009), S. 5406–5418

[38] Tünnermann, A.: Fasern richtig präparieren. In: *Laser + Produktion* 3. Internationaler Workshop, Dresden (2007), S. 4–7

[39] Trumpf: TruDisk Scheibenlaser. In: $http : //www.trumpf - laser.com/produkte/festkoerperlaser/scheibenlaser.html$(15.4.2011) (2011)

[40] TU-Wien: Labor- und Werkstatt-Ordnung der TU Wien. In: *Mitteilungsblatt* 70 (2008)

[41] VDI: *Schweißen mit Festkörperlasern.* VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, 1995

[42] Ventzke, V. ; Riekehr, S. ; Kocak, M.: Mikrostrukturelle und mechanische Eigenschaften von laserstrahlgeschweißtem Magnesiumfeinblech AZ31-HP mit und ohne Zusatzwerkstoffe. In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 39/7 (2008), S. 435–447

[43] Watkins, K.G.: Laser Welding of Magnesium alloys. In: *TMS (The Minerals, Metals & Materials Society)* (2003), S. 153–156

[44] Zhao, H. ; Debroy, T.: Pore Formation during Laser Beam Welding of Die-Cast Magnesium Alloy AM60B— Mechanism and Remedy. In: *Welding Research Supplement* (2001), S. 204–210

[45] Zhu, J. ; Li, L. ; Liu, Z.: $CO_2$ and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy. In: *Applied Surface Science* 247 (2005), S. 300–306