

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion

## **Bachelorarbeit**

geschrieben bei der Firma



Knaack und Jahn GmbH, Usedomstraße 16, 22047 Hamburg

# **Untersuchungen zur Schaffung der Prozesssicherheit beim WIG-Orbitalschweißen mit Kaltdrahtzufüh- rung an Rohrstumpfnähten aus CuNi10Fe1,6Mn**

vorgelegt am 15.02.2012

von

**Darg Ingber**  
Tondernstr. 7  
22049 Hamburg  
darg.ingber@haw-hamburg.de

Matrikel-Nr.: 1936167

Wintersemester 2011/ 12

**Erstgutachter:** Prof. Dr. Gerhard Biallas  
**Zweitgutachter:** Dipl.-Ing. Dietmar Glombik

**Inhaltsverzeichnis**

1	Einleitung .....	1
2	Verfahrensbeschreibung zu WIG-Orbitalschweißen.....	2
2.1	Allgemeines.....	2
2.2	Prinzip und Funktionsweise .....	2
2.3	Vorzüge .....	3
2.4	Besonderheiten .....	3
2.4.1	Impulsstrom.....	3
2.4.2	Programmierung von Sektoren.....	5
3	Grundlegendes zu Kupfer und Kupferlegierungen.....	6
3.1	Eigenschaften .....	6
3.1.1	Allgemein .....	6
3.1.2	Schweißbeignung .....	6
3.1.3	Metallurgie .....	8
3.1.4	Einfluss des Sauerstoffgehalts .....	10
3.1.5	Einfluss der Legierungselemente .....	11
3.2	WIG-Schweißen .....	13
3.2.1	Schweiß- und Formiergase.....	14
4	Vorgaben und Zielsetzung.....	16
4.1	Grundwerkstoff und Abmessungen des zu fügenden Rohres.....	17
4.1.1	Eigenschaften .....	18
4.1.1	Abmessungen und Anforderungen.....	18
4.2	Zusatzwerkstoff .....	18
4.2.1	Eigenschaften .....	19
4.3	Vorgaben aus geltenden Regelwerken .....	19
4.3.1	Schweißfehler .....	19
4.3.2	Poren.....	20
4.3.3	Prüfverfahren.....	22
4.3.4	Prüfstücke.....	25
4.4	Prozessparameter.....	25
4.4.1	Netzanschluss .....	25
4.4.2	Anordnung des Brenners, der Wolframelektrode und des Zusatzdrahtes .....	26
4.4.3	Parametereinstellung, Schweißprogramm .....	27
4.4.4	Schweißgas.....	27
4.4.5	Wurzelschutz .....	27

4.4.6	Wolframelektroden Vor- bzw. Aufbereitung .....	27
4.5	Randbedingung des Schweißprozesses .....	28
4.5.1	Nahtvorbereitung .....	28
5	Versuchsanlage .....	30
5.1	Schweißstromquelle .....	30
5.2	Schweißkopf .....	30
5.3	Gasflaschen mit Druckminderer .....	31
5.4	Schläuche .....	31
5.5	Formierkammer .....	31
6	Versuchsdurchführung .....	31
6.1	Ermittlung der Schweißparameter .....	32
6.1.1	Einstellen/ Festlegen der Parameter im Schweißprogramm .....	32
6.1.2	Gewählte Schutzgase .....	32
6.1.3	Schweißen von Blindraupen .....	32
6.2	Prinzipieller Ablauf beim Rohrstumpfschweißen .....	35
6.2.1	Anfertigen der Prüfstücke .....	35
6.2.2	Nahtvorbereitung .....	35
6.2.3	Reinigung der Fugestelle .....	35
6.2.4	Heften der zu fügenden Rohrstücke .....	36
6.2.5	Aufbereiten der Wolframelektrode .....	36
6.2.6	Anbringung des Schweißkopfes und Anordnung der einzelnen Komponenten .....	37
6.2.7	Starten des Schweißvorganges .....	38
6.2.8	Temperaturmessung .....	38
6.2.9	Wechsel der Schutzgase .....	39
6.2.10	Bewertung/ Untersuchung der Schweißnähte .....	39
7	Versuchsauswertung .....	40
7.1	Auswertung der Prüfverfahren .....	40
7.1.1	Sichtprüfung .....	40
7.1.2	Farbeindringprüfung .....	42
7.1.3	Durchstrahlungsprüfung .....	44
7.1.3	Makroschliffe .....	48
7.2	Einflussfaktoren auf das Schweißergebnis .....	52
7.2.1	Nahtvorbereitung/ Reinigung der Fugestelle .....	52
7.2.2	Parameter (Strom, Geschwindigkeit) .....	52
7.2.3	Schutzgas .....	52
7.2.4	Temperatur .....	53

## **Inhaltsverzeichnis**

---

8	Schlussbetrachtung.....	55
	Literatur.....	57
	Anhang.....	59

## Abbildungsverzeichnis

### Kapitel 2

Abbildung 2.1: Beispiel zur Innenformierung [1] .....	2
Abbildung 2.2: Impulsstrom [2] .....	4
Abbildung 2.3: Einteilung der Schweißpositionen.....	.
nach dem Sektorenmodell [2].....	5

### Kapitel 3

Abbildung 3.1: Abhängigkeit der Schweißbarkeit [4].....	7
Abbildung 3.2: Temperaturverlauf beim Schweißen von Kupfer und Stahl [4] .....	8
Abbildung 3.3: Korngröße des Gefüges in der WEZ [6] .....	9
Abbildung 3.4: Wirkung der Legierungselemente von Kupferwerkstoffen auf die elektrische.....	
Leitfähigkeit [4].....	13
Abbildung 3.5: Dichte und Ionisierungsenergie [11] .....	15
Abbildung 3.6: Wärmeleitfähigkeit von Schutzgaskomponenten [11] .....	16
Abbildung 3.7: Einbrandtiefe von Argon (links) und Helium (rechts) [12].....	16

### Kapitel 4

Abbildung 4.1: Porenbildung durch Gasaufnahme (Metall-Schutzgasschweißen) [16] .....	21
Abbildung 4.2: Durchstrahlungsprüfung [20] .....	24
Abbildung 4.3: Maße des Prüfstücks [13].....	25
Abbildung 4.4: Anordnung WIG-Brenner und Drahtzufuhr [22] .....	26
Abbildung 4.5: Längsschliff der Wolframelektrode [2].....	28
Abbildung 4.6: Anschliffwinkel (A) und Abplattungsdurchmesser (M) [2].....	28

### Kapitel 5

Abbildung 5.1: Schweißkopf Bild 1 .....	31
Abbildung 5.2: Schweißkopf Bild 2.....	31
Abbildung 5.3: Formierkammer .....	31

### Kapitel 6

Abbildung 6.1: Nahtvorbereitung.....	35
Abbildung 6.2: Fixierung zum Heften.....	36
Abbildung 6.3: Elektrodenanschleifmaschine.....	37
Abbildung 6.4: Prinzipieller Prozessablauf [22] .....	38

**Kapitel 7**

Abbildung 7.1: Schutzgas 1 (0 % He)..... 40

Abbildung 7.2: Schutzgas 2 (50 % He)..... 41

Abbildung 7.3: Schutzgas 3 (70 % He)..... 41

Abbildung 7.4: Farbeindringprüfung Schutzgas 1 (0 % He)..... 42

Abbildung 7.5: Farbeindringprüfung Schutzgas 2 (50 % He)..... 43

Abbildung 7.6: Farbeindringprüfung Schutzgas 3 (70 % He)..... 43

Abbildung 7.7: Röntgenaufnahme Schutzgas 1 (0 % He)..... 45

Abbildung 7.8: Röntgenaufnahme Schutzgas 2 (50 % He)..... 46

Abbildung 7.9: Röntgenaufnahme Schutzgas 3 (70 % He)..... 47

Abbildung 7.10: Schematischer Aufbau einer Schweißverbindung [4] ..... 48

Abbildung 7.11: Makroschliff Schutzgas 1 (0 % He) ..... 49

Abbildung 7.12: Makroschliff Schutzgas 2 (50 % He) ..... 50

Abbildung 7.13: Makroschliff Schutzgas 3 (70 % He) ..... 51

Abbildung 7.14: Auswirkung der Schutzgaszusammensetzung auf den Schweißstrom ..... 53

Abbildung 7.15: Temperaturvergleichsmessung zwischen den Schutzgasen bei gleichen  
Stromwerten ..... 54

## Tabellenverzeichnis

### Kapitel 3

Tabelle 3.1: Einfluss der Legierungselemente auf den Kupferwerkstoff [4] .....	12
Tabelle 3.2: Eigenschaften von Argon und Helium [10].....	15

### Kapitel 4

Tabelle 4.1: Chemische Eigenschaften [13].....	18
Tabelle 4.2: Mechanische Eigenschaften [13].....	18
Tabelle 4.3: Physikalische Eigenschaften [13].....	18
Tabelle 4.4: Chemische Eigenschaften vom Zusatzwerkstoff [14].....	19
Tabelle 4.5: Mechanische und Physikalische Eigenschaften [14].....	19
Tabelle 4.4: Schweißfehler [15] .....	20
Tabelle 4.5: Zulässige Porigkeit nach DIN 85004-4 [13] .....	22
Tabelle 4.6: Prüfverfahren [17] .....	23
Tabelle 4.7: Zulässige Toleranzen beim WIG-Orbitalschweißen [1].....	29

### Kapitel 5

Tabelle 5.1: Anlagendaten der Schweißstromquelle [1] .....	30
--	----

### Kapitel 6

Tabelle 6.1: Gewählte Schutzgaszusammensetzung .....	32
Tabelle 6.2: Schweißparameter .....	34

### Kapitel 7

Tabelle 7.1: Absolute Porenanzahl.....	48
Tabelle 7.2: Raum und Rohrtemperatur .....	53

# 1 Einleitung

Schweißen ist das standardmäßige Fügeverfahren im Schiffbau, weil die Fertigung von Schiffsrümpfen aus Stahlblechen mittels der Schweißtechnik gleichzeitig niedrige Kosten und gute mechanische Eigenschaften ermöglicht. Zur Verrohrung von Ballasttanks werden Kupferbasislegierungen verwendet, deren schweißtechnische Verarbeitung sich deutlich schwieriger gestaltet als die von Stahlblechen. Firmen des Rohr- und Anlagenbaus bietet sich hier ein Ansatzpunkt für die Etablierung im Schiffbau, wenn sie ein zuverlässiges schweißtechnisches Fügeverfahren anbieten können, dass wirtschaftlicher als klassische Handschweißverfahren ist.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit schweißtechnischen Untersuchungen an einer Rohrstumpfverbindung (Rohr-Rohr-Verbindung), welche mittels einer teilautomatisierten WIG-(Wolfram-Inertgas)-Orbitalschweißanlage unter Kaltdrahtzuführung erzeugt werden soll. Der Fokus liegt dabei auf der Porenbildung, insbesondere darauf wie diese verhindert oder zumindest reduziert werden kann. Die CuNi10Fe1,6Mn Legierung, aus der die zu fügenden Rohre bestehen, verfügen aus schweißtechnischer Sicht nicht über optimale Eigenschaften. So hat der Werkstoff neben seiner großen Affinität zu Gasen, die er beim Schweißen aufnimmt, auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit, die beim Schmelzschweißen unvorteilhaft ist. Dennoch wird dieser Werkstoff wegen seiner guten Korrosionsbeständigkeit gegen Meer-/Salzwasser häufig im Schiffbau oder in anderen offshoretechnischen Bereichen eingesetzt.

Diese Bachelorarbeit verfolgt das Ziel mehr Prozesssicherheit beim Orbitalschweißen dieses Werkstoffes zu schaffen und eine höhere Sicherheit gegen die Porenbildung in der Schweißnaht zu bekommen. Durch eine geeignete Wahl bzw. Einstellung der Prozessparameter soll ein im höchsten Maße reproduzierbares Schweißergebnis ermöglicht werden. Besonders die Wahl der Schweißgaszusammensetzung spielt hier eine wichtige Rolle und muss untersucht werden. In einer entsprechenden Literaturrecherche konnte für diese Arbeit keine verknüpfende Literatur gesichtet werden, so dass viele Zusammenhänge durch Praxisversuche und Richtlinien selbst hergeleitet werden musste.

Zunächst wird der Stand der Technik sowohl zum WIG-Orbitalschweißen als auch zur schweißtechnischen Verarbeitung von Kupferlegierungen aufgezeigt. Daraus werden die Zielsetzung der Arbeit und die Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen abgeleitet. Maßstab der Optimierung sollen die geltenden Regelwerke zur Prüfung und Abnahme von Schweißverbindungen unter technischen Randbedingungen sein.



## 2 Verfahrensbeschreibung zum WIG-Orbitalschweißen

### 2.1 Allgemeines

Das Orbitalschweißverfahren wird heutzutage in vielen Industriezweigen, beispielsweise in der Luft- und Raumfahrtindustrie, im Fahrzeugbau, in der Nuklearindustrie, der Pharmaindustrie, der Nahrungsmittelindustrie oder der Halbleiterindustrie erfolgreich eingesetzt. Es hat sich als zuverlässiges Schweißverfahren etabliert. Aus schweißtechnischer Sicht ist das Orbitalschweißverfahren ein teilmechanisiertes Schweißverfahren, welches bevorzugt auf dem WIG-Schweißverfahren beruht und zum Fügen von Rohr-Rohr-Verbindungen bzw. Rohr-Boden-Verbindungen entwickelt wurde [2].

### 2.2 Prinzip und Funktionsweise

Beim Orbitalschweißen werden beispielsweise zwei gleichgroße Rohrstümpfe zusammengeführt (I-Fuge), wobei der WIG-Brenner das Bauteil orbital (lat.: orbis = Kreis) von außen umfährt. Beim WIG-Schweißen entsteht ein elektrischer Lichtbogen zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem zu fügenden Werkstoff. In den meisten Fällen wird ein Zusatzwerkstoff in Form eines Drahtes von außen hinzugeführt. Die durch den Lichtbogen entstehende Wärme bringt den Grund- und Zusatzwerkstoff (Draht) zum Schmelzen und lässt so ein Schmelzbad entstehen. Schmelzbad und Elektrode werden dabei von einem Schutzgas, meist Argon und/ oder Helium, vor dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff geschützt.

Im Inneren des Rohres wird durch Formierung, mit einem entsprechenden inerten Gas (z.B. Argon) ein Schweißnahtwurzelschutz vorgenommen, um diese ebenfalls vor dem Sauerstoff der Luft zu schützen. Ein typisches Beispiel für eine solche Formierungsanordnung ist in folgender Abbildung 2.1 zu sehen.

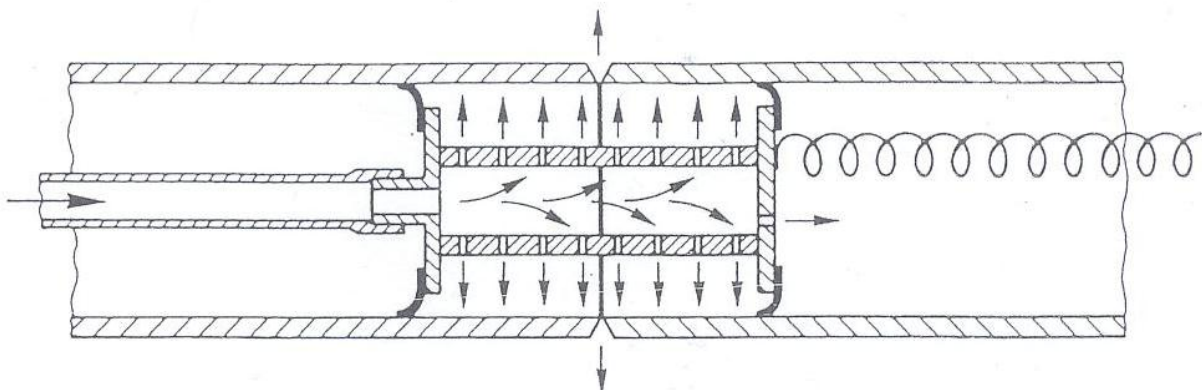


Abbildung 2.1: Beispiel zur Innenformierung [1]

### 2.3 Vorzüge

Ein essentieller Vorteil des WIG-Orbitalschweißen ist die einfache Reproduzierbarkeit. Durch das zum Teil automatisierte Verfahren lassen sich alle Schweißsequenzen abspeichern und beliebig oft wiederholen. Schweißfehler, die sich wie bei einem manuellen Schweißprozess einschleichen können, sind daher ausgeschlossen. Die Konsequenz daraus könnte eine Steigerung der Produktivität bedeuten, da die Schweißapparatur von einer angelernten Fachkraft lediglich richtig platziert und bedient werden muss. So lassen sich bei häufiger Anwendung Personalkosten einsparen.

Darüber hinaus kann die Schweißapparatur auch unter erschwerten, zum Teil lebensfeindlichen Bedingungen (z.B. radioaktiver Strahlung) arbeiten und so das Personal von gefährlichen Situationen fernhalten oder die Arbeit erheblich erleichtern (z.B. bei Zwangslagen, verdeckter Sicht, etc.). Oft werden dabei auch Fernbedienungen und Videokameras eingesetzt [2].

Heutzutage wird von den Geräten meistens eine lückenlose Protokollierung des Vorganges vorgenommen, die während des Schweißprozesses in Echtzeit im Hintergrund abläuft und alle wichtigen Daten speichert. Diese lassen sich dann exportieren, ausdrucken und können ggf. als Qualitätsnachweis dienen [2].

### 2.4 Besonderheiten

#### 2.4.1 Impulsstrom

Die Tatsache, dass beim WIG-Orbitalschweißen die Schweißposition kontinuierlich geändert wird, wobei das Schmelzbad permanent dem Einfluss der Schwerkraft ausgesetzt ist und eine stetige Aufheizung der Bauteile stattfindet, führt zu einer entsprechenden Methode, um das Schmelzbad besser zu kontrollieren. Diese Kontrollierbarkeit lässt sich durch die Verwendung von Impulsstrom erreichen (siehe Abb. 2.2).

- Durch den hohen Stromwert  $I_h$ , der über die Zeitspanne  $T_h$  gehalten wird, entsteht auf Grund der so höheren Energieeinbringung ein recht großvolumiges Schmelzbad, welches leicht zum Abtropfen neigt.
- Der kleinere Strom  $I_b$ , der über die Zeitspanne  $T_b$  gehalten wird, bewirkt ein Abkühlen des Schmelzbades und sein Volumen verkleinert sich wieder. Das im Mittel kleinere Schmelzbad ist so weniger der Schwerkraft ausgesetzt und ist besser zu kontrollieren.

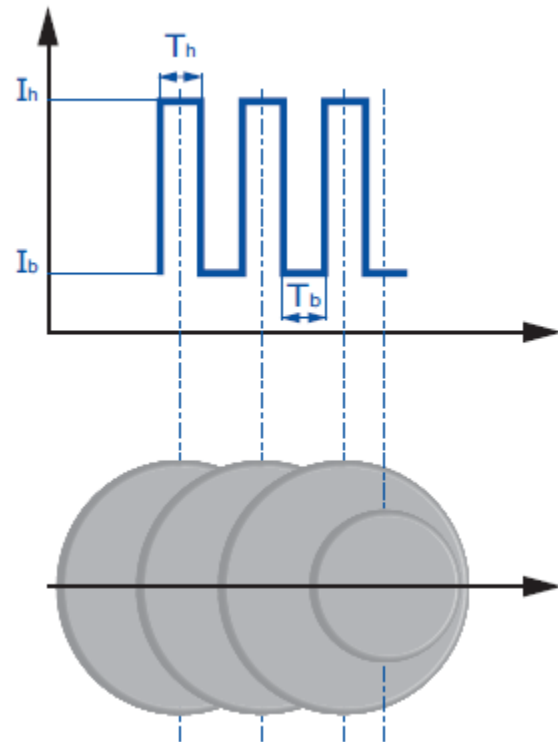


Abbildung 2.2: Impulsstrom [2]

Ein Vorteil des Schweißens mit Impulsstrom ist, dass die eingebrachte Energie durch den gegenüber  $I_h$  geringeren Strom  $I_{\text{Mittel}}$  geringer ist [2].

Die eingebrachte Streckenenergie  $E$  lässt sich dabei wie folgt berechnen [2]:

$$E = \frac{U \cdot I \cdot r \cdot 60}{v}$$

mit

$$I_{\text{mittel}} = \frac{I_h \cdot T_h + I_b \cdot T_b}{T_b + T_h}$$

$U$  Lichtbogenspannung [Volt]

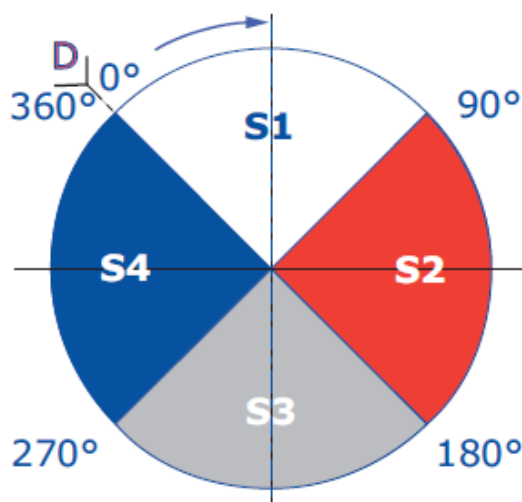
$I$  Schweißstrom [Ampere]

$v$  Lineare Schweißgeschwindigkeit [mm/ min]

$r$  Verlustkoeffizient (zwischen 0,6 – 0,8)

### 2.4.2 Programmierung von Sektoren

Um den heutzutage gestellten Anforderungen an eine gute Schweißnaht gerecht zu werden und das Ergebnis weiter zu verbessern, ist es erforderlich, die jeweiligen Schweißparameter in Abhängigkeit ihrer Schweißbrennerposition beim Umfahren einzustellen. Da beispielsweise sowohl die Wannelage als auch die Überkopfnah bzw. Fall- und Steignah geschweißt werden muss, macht es Sinn diese Bereiche jeweils in Sektoren einzuteilen. Die Abb. 2.3 zeigt eine beispielhafte Einteilung in solche Sektoren, wie sie häufig bereits automatisch von einer modernen Orbitalschweißanlage vorgenommen wird. Die Parameter werden dann von dieser anhand einiger zuvor eingegebener Eckdaten angepasst, wobei der Bediener diese nach Bedarf im Nachhinein noch spezifizieren kann.



**Abbildung 2.3: Einteilung der Schweißpositionen nach dem Sektorenmodell [2]**

Das Kreismodell stellt den Querschnitt eines Rohres dar, der hier beispielhaft in vier Sektoren (S1-S4) eingeteilt wurde und einen Startpunkt D hat, von dem in Pfeilrichtung geschweißt wird.

- S1 Wannelage: 0 - 90 °
- S2 Fallnah: 90 - 180 °
- S3 Überkopfnah: 180 – 270 °
- S4 Steignah: 270 – 360 °

Sobald der jeweils neue Sektor erreicht wird, werden die Schweißparameter entsprechend der neuen Schweißposition angepasst.

Die Einteilung der Sektoren kann dabei auch abhängig von der Schweißanlage variieren oder anders bestimmt werden.

## 3 Grundlegendes zu Kupfer und Kupferlegierungen

### 3.1 Eigenschaften

#### 3.1.1 Allgemein

Der verbreitete Einsatz von Kupfer als Werkstoff, welcher sich seit Tausenden von Jahren verfolgen lässt, ist in erster Linie bedingt durch seine guten Eigenschaften, wie z.B. die gute Kaltumformbarkeit. Zudem liegt Kupfer in der Natur in relativ reiner Form vor und ließ sich damals schon leicht abbauen. Im Zuge der Industrialisierung gewannen Eigenschaften wie die sehr gute thermische und elektrische Leitfähigkeit und die gute Korrosionsbeständigkeit an Bedeutung [3]. Durch die Möglichkeit, Legierungselemente in Form vieler verschiedener Metalle, wie z.B. Ni, Mn, Zn, Sn, Al, Fe, Be, Cr und Si, hinzuzufügen, können Eigenschaften wie z.B. Zugfestigkeit, Dehngrenze, Härte, Verschleißwiderstand sowie die chemische Korrosionsbeständigkeit, je nach Anforderung, so verändert oder zumindest positiv beeinflusst werden, dass sie vergleichbar oder zum Teil sogar besser als die von CrNi-Stähle werden [3].

Kupfer ist ein Nichteisen(NE)-Metall mit einer Dichte von  $8,9 \text{ kg/dm}^3$  und weist eine kubisch-flächenzentrierte (kfz) Gitterstruktur auf, die für die gute Tieftemperaturzähigkeit und Kaltumformbarkeit sorgt, andererseits eine hohe Kaltverfestigung des Werkstoffes bedingt.

Unterteilen lassen sich Kupferwerkstoffe daher zunächst nach den Behandlungszustand in:

- **Ausscheidungshärtende Werkstoffe** wie z.B. CuBe-Legierungen,
- **Kaltverfestigte Werkstoffe**

und nach der Werkstoffzusammensetzung in:

- **einphasige Werkstoffe** (reines Cu oder z.B. CuNi-Legierungen, die komplett aus Mischkristallen bestehen)
- **mehrphasige Werkstoffe** (z.B. zweiphasiges Messing) [3].

#### 3.1.2 Schweißbeignung

Ein weiterer besonders wichtiger Aspekt ist die Schweißbeignung von Kupfer bzw. Kupferlegierungen. Hierzu ist vorab zu klären, welche Schweißparameter (Abb. 3.1) hinsichtlich des eingesetzten Grundwerkstoffes zu wählen sind. Es muss demnach zunächst das Schweißverfahren, evtl. Zusätze (Zusatzwerkstoff, Schutzgas, etc.) und eine evtl. Vor- und Nachbehandlung (z.B. Vorwärmen der Fügestelle) gewählt werden. Anders als bei Stahl findet beim Schweißen von Kupfer bzw. bei den meisten Kupferlegierungen keine Gitterstrukturumwandlung statt.

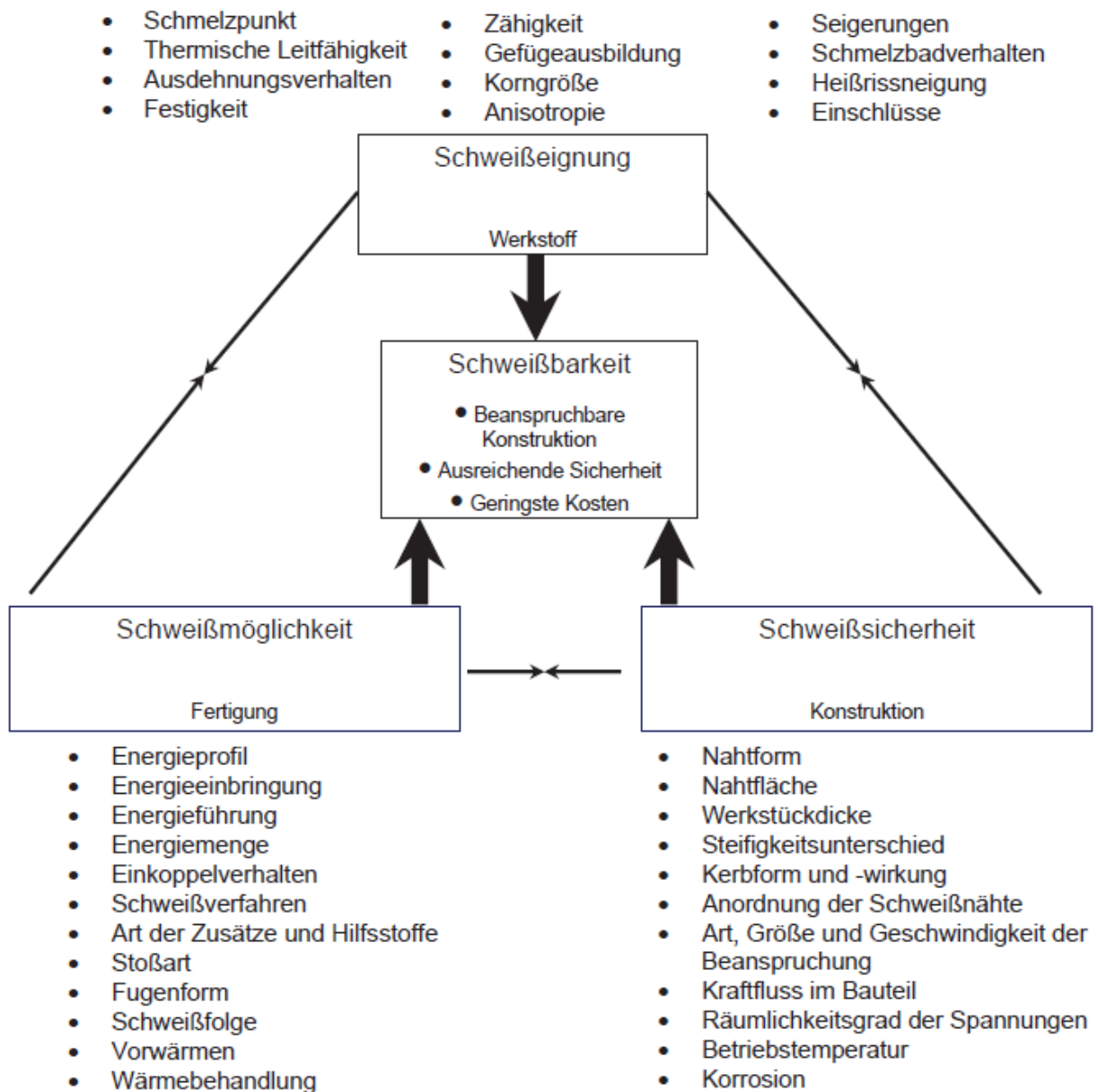


Abbildung 3.1: Abhängigkeit der Schweißbarkeit [4]

Generell lässt sich Kupfer unter den richtigen Bedingungen gut schweißen. Einige Nachteile ergeben sich allerdings durch die Tatsache, dass Nichteisen(NE)-Metalle bei Schweißverfahren, bei denen mit über 600 K gearbeitet wird, dazu neigen, Gase aus der Atmosphäre aufzunehmen und so die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht verschlechtern. Um dies weitestgehend zu verhindern, müssen entsprechende inerte Schutzgase oder Beschichtungen eingesetzt werden, die das Schmelzbad vor der Luft schützen [3].

Ein weiterer für die Schweißtechnik relevanter Punkt ist die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmeausdehnung bzw. Schrumpfung beim Erkalten von reinem Kupfer. Gegenüber einfachem unlegiertem Stahl ergeben sich folgende Unterschiede:

- Bei Raumtemperatur eine sechsmal größere und bei 1000 ° C eine 15 mal größere Wärmeleitfähigkeit [3],
- eine 1,4 mal größere Wärmeausdehnung sowie
- bei Erstarrung eine zweimal größere Schrumpfung [5].

Durch die vielfach größere Wärmeleitfähigkeit wird ein Großteil der beim Schweißen eingebrachten Energie/ Wärme schnell in das angrenzende Material übertragen bzw. abtransportiert, sodass die Energie, die zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes zur Verfügung stehen sollte, nicht mehr genutzt werden kann. Um dies zu verhindern werden die zu fügenden Bauteile oft vorgewärmt. Ansonsten müsste die Energieeinbringung deutlich erhöht werden, um das Abtransportieren der Energie durch Wärmeleitung zu kompensieren.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers sorgt zudem für ein kleineres Temperaturgefälle im Werkstoff, da sich dieser recht weiträumig um das Schmelzbad erwärmt (vgl. Abb. 3.2). Dies und die beim Erstarren auftretenden Schrumpfungen können daher zu großen Verformungen im Werkstoff führen [4].

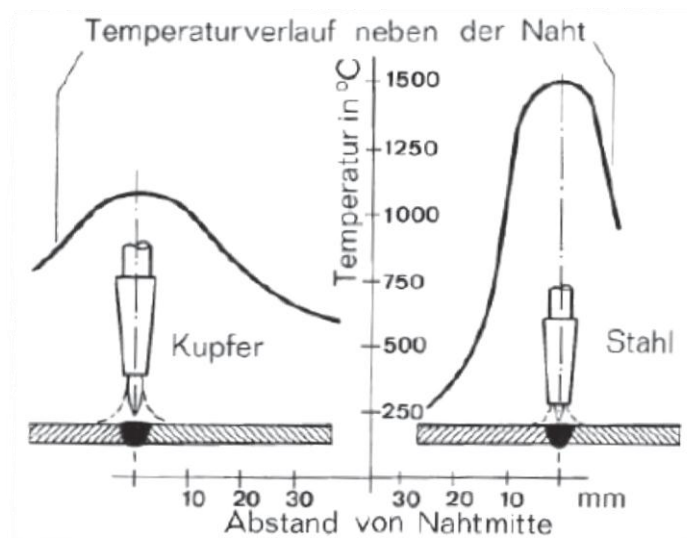


Abbildung 3.2: Temperaturverlauf beim Schweißen von Kupfer und Stahl [4]

### 3.1.3 Metallurgie

Bei unlegiertem Kupfer kommt es bei Umformprozessen zu einer homogenen Kaltverfestigung. Ebenso ist bei einigen einphasigen Kupferlegierungen, die ausreichend duktil sind, eine Kaltverformung möglich. Werden dem Kupferwerkstoff Elemente wie beispielsweise Cr, Ni unter Zugabe von Si, P (oder Sn, Be, Co, etc.) zulegiert, kann dieser ausscheidungsgehärtet werden [3].

Da auch beim Schweißen von Kupferwerkstoffen neben dem Schmelzbad eine Wärmeeinflusszone entsteht, die Einfluss auf den Zustand des Grundwerkstoffes hat, kommt es an diesen Stellen zu Ver-

änderungen im Gefüge. Abhängig von der Wärmeeinbringung und der Vorwärmtemperatur an der Fügestelle kommt es in einem dementsprechenden Bereich neben der Schweißverbindung zu Kornvergrößerung/ -wachstum (vgl. Abb. 3.3), die wiederum von der Struktur des Gefügegitters abhängen. Ein kfz-Gitter ( $\alpha$ -Gefüge), wie es bei z.B. reinem Kupfer vorliegt, zeigt unter Wärmeeinfluss ein geringeres Kornwachstum als ein kubisch-raumzentriertes (krz) Gitter ( $\beta$ -Gefüge), da Metalle mit kfz-Struktur eine bessere thermische Stabilität aufweisen [3].

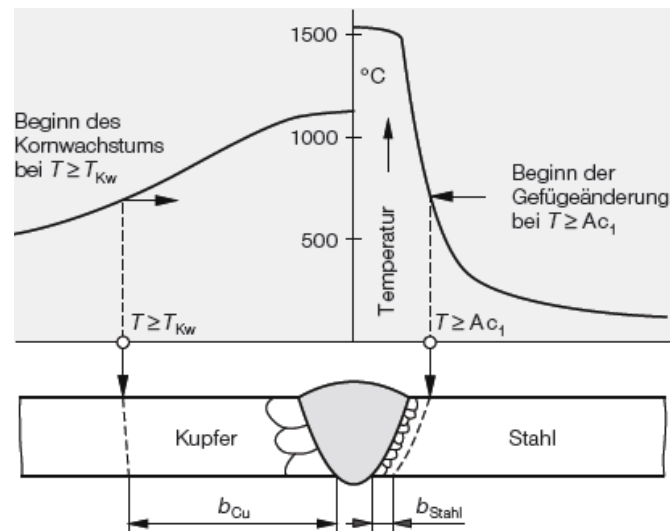


Abbildung 3.3: Korngröße des Gefüges in der WEZ [6]

Unerwünschte Gefügestände, die durch das Erwärmen und Erkalten entstehen, treten besonders leicht bei folgenden Werkstoffen auf [3]:

- verunreinigte Werkstoffe, bei denen sich verspröde Ausscheidungen und niedrig schmelzende Phasen bilden,
- Werkstofflegierungen, bei denen auf Grund großer Erstarrungsintervalle nach dem Schweißen kristallgeseigerte Bereiche entstehen, und
- ausscheidungshärtende Werkstoffe

Gefügeveränderungen lassen sich im Nachhinein nur sehr schwer wieder aus der Schweißnaht entfernen und es bleibt meist ein typisch gussartig dendritisches (aus dem griechischen *déndron* "Baum"), stengeliges Gefüge.

Die **einphasigen Werkstoffe** lassen sich unter Beachtung des Sauerstoffgehaltes (siehe Pkt. 3.1.4) im Grunde gut schweißen, da sie über eine hohe Zähigkeit verfügen. Krz Kristallgitter hingegen lassen sich schlecht und hexagonale (hdp) Kristallgitter noch schlechter schweißen. Zusätzlich zu der in der Wärmeeinflusszone entstehenden Kornvergrößerung können beim Schweißen von einphasigen Werkstoffen bei vorhandenen Verunreinigungen Wiederaufschmelzrisse oder Ausscheidungen entstehen [3].



Bei **mehrphasigen Werkstoffen** wird die Schweißbarkeit meist durch die Phase bestimmt, die als schlechter schweißbar gilt. Kaltumformung ist dann ebenfalls meist durch eine sprödere Phase beeinträchtigt. Zusätzlich können sogenannte intermetallische Phasen, die sich im Grundwerkstoff befinden oder sich erst beim Schweißen bilden, durch ihre sehr harte und spröde Struktur Risse entstehen lassen [3].

**Ausscheidungsgehärtete Legierungen** sind zum Schweißen eher nicht geeignet. Beim Schweißen können Vergrößerungen von Ausscheidungen in der Wärmeeinflusszone entstehen, die die Eigenschaften negativ beeinflussen. Die in dem Werkstoff zur Festigkeit vorhandenen Teilchen werden beim Erwärmen und dem anschließenden Erkalten meist an den Korngrenzen ausgeschieden. In Folge dieser ungleichmäßigen Verteilung kommt es zu einer Verschlechterung von Härte, Zähigkeit sowie Festigkeit [3]. Des Weiteren besteht bei mehrfach legierten Werkstoffen die Gefahr, dass sich bei schneller Wärmeeinbringung Phasen mit niedrigem Schmelzpunkt und/ oder Eutektika bilden, die evtl. zu Aufschmelzrissen in der Wärmeeinflusszone führen. Um dem entgegenzuwirken, müsste die Wärmezufuhr möglichst gering gehalten werden [3]. Um also hohe mechanische Gütewerte zu erreichen, wäre es erforderlich eine umfangreiche Wärmebehandlung mit Lösungsglühen, Abschrecken und anschließendem Auslagern durchzuführen. Dieser recht hohe Aufwand und die Tatsache, dass die meisten Bauteile recht groß sind, können die Umsetzung erschweren oder nicht realisierbar machen.

Bei **kaltverfestigten Werkstoffen** sinken die Festigkeitskennwerte auf die des nicht kaltverfestigten Werkstoffes ab wenn beim Schweißen die Rekristallisierungstemperatur des Werkstoffes erreicht wird. Je länger die Temperatur gehalten wird, umso größer wird der Bereich bzw. die Wärmeeinflusszone in dem dieser Härteabfall stattfindet. Darum sollte die eingebrachte Energie auf ein Minimum reduziert werden.

### 3.1.4 Einfluss des Sauerstoffgehalts

Ein weiterer Punkt, der die Schweißbeignung von Kupfer maßgeblich beeinflusst, ist der Sauerstoffgehalt im Werkstoff. Um bei der Herstellung ein möglichst reines Kupfer ohne Verunreinigungen zu erhalten, wird dem Kupfer während der Raffination Sauerstoff zugegeben. Durch den Sauerstoff werden Verunreinigungen, die mit Sauerstoff reagieren (Oxidation), abgebunden, was in der Elektrotechnik bzw. Elektronik eine wichtige Rolle spielt. Es gilt: je mehr Verunreinigungen im ungebundenen Zustand vorhanden sind, desto schlechter wird die elektrische Leitfähigkeit [5]. Durch den Sauerstoff kann es zudem bei der Verwendung von wasserstoffhaltigem Schutzgas und einer entsprechend hohen Temperatur, zur sogenannten Wasserstoffkrankheit kommen, bei der sich Wasserdampf während der Erwärmung bilden kann. Die damit einhergehende Volumenvergrößerung führt dann evtl. zur Bildung von Rissen im Inneren des Werkstoffs. Daher wird bei der Herstellung von Kupfersorten, die zur schweißtechnischen Weiterverarbeitung vorgesehen sind, versucht, den Sauerstoffgehalt mit Hilfe von beispielsweise Phosphor zu binden, um so den Werkstoff zu desoxidieren. Dieser an freien Sauerstoff

arme und somit schlecht elektrisch leitende Werkstoff verfügt nun im Gegenzug über gute Dehnungs- und Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindung und wird daher z.B. im Bereich des Apparate- und Behälterbaus verwendet. Sauerstoffhaltige Kupferwerkstoffe werden beim Schmelzschweißen auch nicht eingesetzt, da sich spröde Cu-Cu<sub>2</sub>O Kristallgefüge bilden können oder das Cu<sub>2</sub>O mit dem H<sub>2</sub> reagiert und es zur Wasserstoffkrankheit kommen kann [5].

### 3.1.5 Einfluss der Legierungselemente

Abhängig von den Legierungselementen können sich die Eigenschaften auf unterschiedlichste Art und Weise ändern. Werden dem Kupfer nur kleinste Mengen anderer chemischer Elemente zulegiert, so dass sich ein Mischkristall bildet, sinkt bei dieser Legierung die elektrische Leitfähigkeit erheblich. Anders ist dies nur bei in Kupfer nicht löslichen Legierungselementen, wie z.B. Pb oder S, die die Leitfähigkeit lediglich durch eine resultierende Verringerung des effektiven Querschnitts mindern. Es kann also davon ausgegangen werden, dass durch eine größere Menge an Legierungselementen im Kupferwerkstoff die Leitfähigkeit grundsätzlich abnimmt, die Schweißbeugung allerdings in gleicher Weise zunimmt (vgl. Tabelle 3.1).

Wird Blei als Legierungselement eingesetzt, so sind diese Legierungen nur bis zu einem Bleigehalt von 0,03 % problemlos schweißbar, da es durch den niedrigen Schmelzpunkt (327 °C) und die schlechte Löslichkeit in Kupfer zur Bildung von Warmrissen kommt. Des Weiteren kann die Naht durch Schwefel spröde werden, so dass oft Mangan als Bindemittel für Schwefel eingesetzt wird, um die Legierung schweißbar zu machen. Ein Überblick über wichtige Legierungselemente und deren Auswirkung auf den Werkstoff Kupfer findet sich in Tabelle 3.1 [4].

Tabelle 3.1: Einfluss der Legierungselemente auf den Kupferwerkstoff [4]

Element	Besonderheiten	Rekristallisations- temperatur		Oxid- bildung	Elektr. Leitfähig- keit	Wärme- leitfähig- keit	Korrosions- beständig- keit	Warm- festigkeit	Festigkeit/ Härte	Verschleiß- festigkeit	Dehn- grenze	Farb- änderung
		O <sub>2</sub> - haltig	O <sub>2</sub> - frei									
Ag	Erhöhung der Zeitstandfestigkeit	↑	↑	nein	→	→		↑	↑			
Al				ja	↓	↓	↑	↑	↑	↑		
As	Ermöglichen der Aushärtbarkeit	↑	↑	nein	↓↓	↓↓						
Be	Ermöglichen der Aushärtbarkeit			nein	↓↓	↓↓		↑	↑↑		↑	
Co		-	→	nein	↓↓	↓↓						
Cr	Ermöglichen der Aushärtbarkeit	-	↑	nein	↓↓	↓↓		↑	↑	↑		
Fe	kornfeinende Wirkung, begrenzte Löslichkeit, Ermöglichen der Aushärtbarkeit, Verbesserung der Gleiteigenschaften	→	leicht ↑	ja	↓↓	↓↓	↑		↑	↑		
Mn	Desoxidation, Abbinden von Schwefel, Verbesserung der Gießeigenschaften (mit Si und Al)			nein	↓↓	↓↓		↑	↑	↑ (mit Al und Si)		
Ni	Erhöhung Dauerschwingfestigkeit, Anlaufbeständigkeit gute Verformbarkeit, Erhöhung Schmelztemperatur, in Verbindung mit anderen Elementen (z.B. P, Si)	→	→	nein	↓	↓	↑	↑	↑	↑		x
O <sub>2</sub>	Ermöglichung der Aushärtbarkeit Oxidation unerwünschter Verunreinigungen, Mischkristallbildung	→	-	ja	↓↓	↓↓						
P	Mischkristallbildung, Desoxidation, Verbesserung Gießbarkeit und Gleiteigenschaften, Verschlechterung Warmformbarkeit	↑	leicht ↑	nein	↓↓	↓↓						
Pb	spannbrechende Wirkung, Unlöslichkeit, Erhöhung Warmisempfindlichkeit, Verschlechterung Warmformbarkeit	↑	leicht ↑	nein	↓	↓					↓ bei Temp. ↑	
S	Unlöslichkeit	→	→	ja	↓	↓					↓ bei Temp. ↑	
Sb	häufig vorkommende Verunreinigung	↑	↑	nein	↓↓	↓↓					↓ bei Temp. ↑	
Se	Unlöslichkeit	leicht ↑	leicht ↑	nein	↓	↓					↓ bei Temp. ↑	
Si	Mischkristallbildung, Desoxidation, Ermöglichen der Aushärtbarkeit	-	↑	nein	↓↓	↓↓						
Sn	gute Verformbarkeit	→	↑	nein	↓	↓	↑	↑	↑	↑		x
Te	Unlöslichkeit, gute Zerspanbarkeit	leicht ↑	leicht ↑	nein	↓	↓		↑			↓ bei Temp. ↑	
Zn	Verbesserung Verformbarkeit, Desoxidation	-	↑	ja	→	→	↑	↑	↑		↑ bis 37 % Zn, darüber ↓	
Zr	geringe Kerbempfindlichkeit			nein	↓	↓		↑				

nicht ausgefüllt = keine Informationen vorhanden    → = bleibt annähernd gleich    ↑ = steigt    ↓ = sinkt    ↑↑ = steigt stark    ↓↓ = sinkt stark

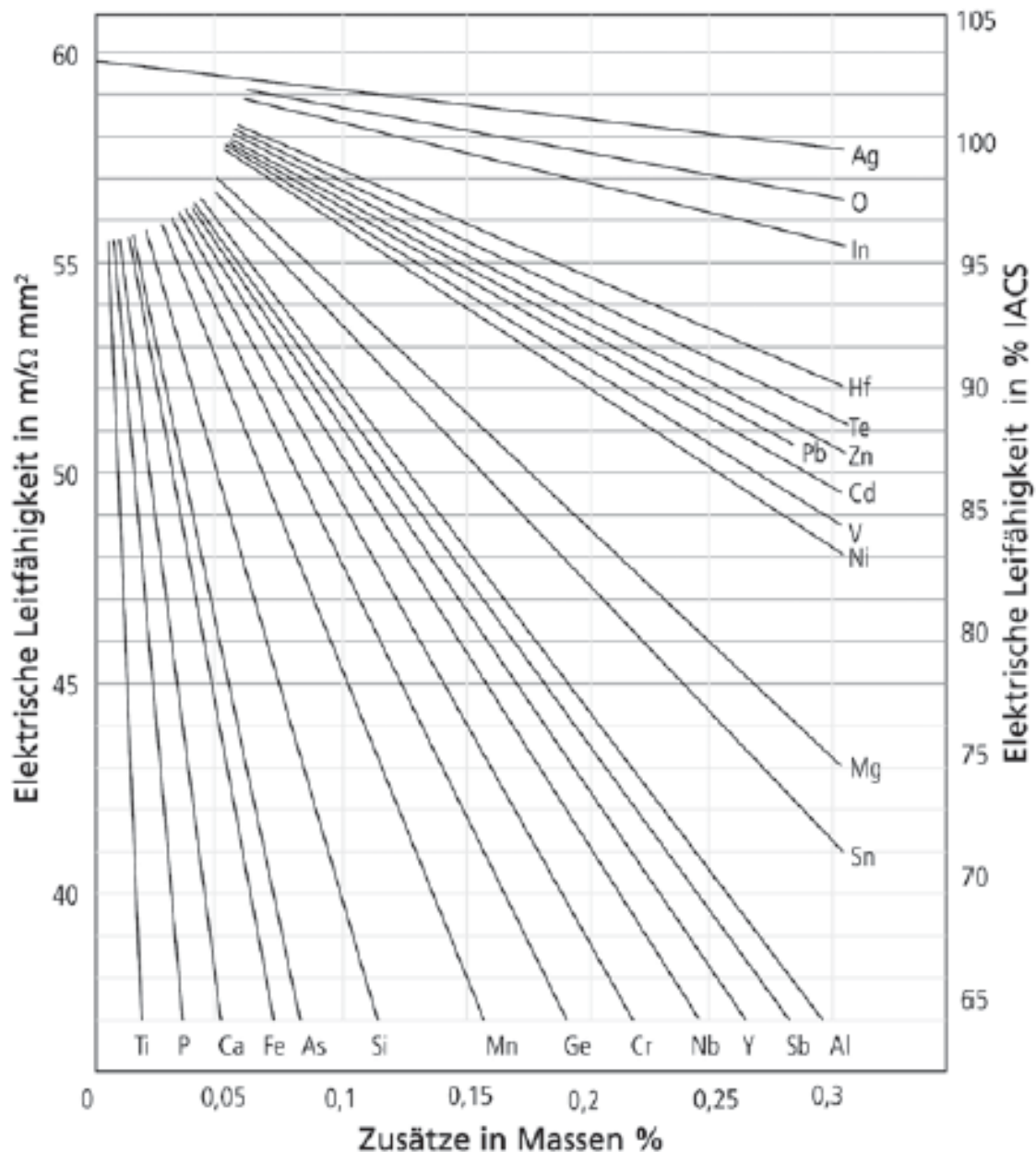


Abbildung 3.4: Wirkung der Legierungselemente von Kupferwerkstoffen auf die elektrische Leitfähigkeit [4]

### 3.2 WIG-Schweißen

Beim Wolfram-Inertgas-Schweißen (141) von Kupfer und Kupferlegierungen wird primär mit Gleichstrom geschweißt, wobei die Wolframelektrode die Kathode darstellt. In seltenen Fällen wird auch Wechselstrom eingesetzt. Die Zündung des Lichtbogens kann zum einen durch eine Hochspannungsanregung vorgenommen werden. Der Vorteil ist, dass es zu keiner Berührung zwischen der Wolframelektrode und dem Werkstück kommt, die eine evtl. Verunreinigung der Elektrode mit Kupfer verursachen könnte und so das Zünden beeinträchtigt. Die andere Methode wäre die Lift-Arc-Technik, bei der durch Berührung der Elektrode mit dem Werkstück ein Kurzschlussstrom entsteht, welcher dann mit Hilfe von modernen Schweißstromquellen sofort reduziert wird [8].

Zum Schützen des Schmelzbades vor der Atmosphäre wird hier meist Argon und/ oder ein Gemisch mit einem gewissen Heliumanteil eingesetzt. Je nach Wanddicke und Nahtvorbereitung kann mit oder ohne Schweißzusatz geschweißt werden.

Durch die gute thermische Leitfähigkeit von Kupfer wird die eingebrachte Wärme, die nötig ist, um den Werkstoff zu verflüssigen, schnell abtransportiert und erwärmt den anliegenden Werkstoff weit-räumig. Um zu verhindern, dass das Schmelzbad sich durch Mangel an Energieeinbringung wieder verfestigt bzw. der umliegende Werkstoff die Energie aufnimmt, muss entweder zusätzliche Energie durch Vorwärmen des zu fügenden Werkstoffs zugeführt werden oder eine Schweißanlage mit ausreichend Stromstärke (ca. 500 A) eingesetzt werden [9].

Das WIG-Schweißen zeichnet sich im Allgemeinen durch eine gute Nahtqualität sowie eine gute Spaltüberbrückbarkeit aus, so dass saubere porenarme Schweißnähte entstehen. Zudem kann eine gegenüber dem Autogen- und Lichtbogenhandschweißen höhere Schweißgeschwindigkeit erreicht werden. Es eignet sich außerdem gut zum Schweißen in Zwangslagen und wird daher bei teilautomatisierten Verfahren eingesetzt [8].

Durch gleichmäßige Bogenentladung werden Spritzer verhindert und durch die konzentrisch entstehende Wärmeeinbringung des Lichtbogens wird die Wärmeeinflusszone schmal gehalten. Durch Trennung des Lichtbogens vom Zusatzwerkstoff können die Energieeinbringung und die Abschmelzleistung unabhängig voneinander variiert bzw. gesteuert werden. So treten gegenüber dem MIG-(Metall-Inertgas)-Schweißverfahren seltener Bindefehler auf. Dies ist ein Grund dafür, dass das WIG-Schweißverfahren dort eingesetzt wird, wo es weniger auf die Abschmelzleistung ankommt, sondern wo besonders hochwertige Nähte gefragt sind, wie z.B. bei Wurzellagen und dünnen Blechstärken. Natürlich ist dabei ein entsprechender Wurzelschutz Voraussetzung [8].

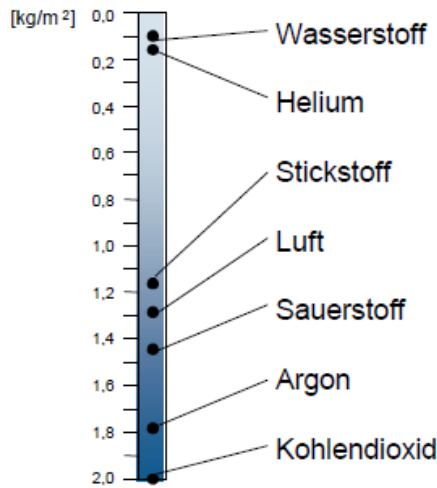
### 3.2.1 Schweiß- und Formiergase

Bei den Schweiß- und Formiergasen, die beim WIG-Schweißen von Kupfer bzw. Kupferlegierungen eingesetzt werden, handelt es sich um die inerten Gase Argon (Ar) und Helium (He), die beim Schweißen keine chemische Reaktionen hervorrufen (metallurgisch neutral) und so weder eine oxidierende noch eine reduzierende Wirkung auf den Grund- und/ oder Zusatzwerkstoff haben. Die Gase haben in erster Linie die Aufgabe das beim Fügen entstehende Schmelzbad vor der Atmosphäre/ Luft zu schützen, um so eine Reaktion mit Sauerstoff zu verhindern. Somit ist auch ein Abbrand der Legierungselemente auszuschließen, da kein Kontakt zum Sauerstoff (O<sub>2</sub>) besteht. Lediglich ein Verdampfen, durch eine zu hohe Wärmeeinbringung wäre möglich [11].

Tabelle 3.2: Eigenschaften von Argon und Helium [10]

Gase	Dichte in kg/ m <sup>3</sup>	rel. Dichte zu Luft in kg/ m <sup>3</sup>	Siedetemperatur bei p = 1,013 bar in °C
Argon (Ar)	1,784	1,380	-185,9
Helium (He)	0,178	0,138	-286,9

Dichte bei 1 bar und 15 °C



Ionisierungsenergie

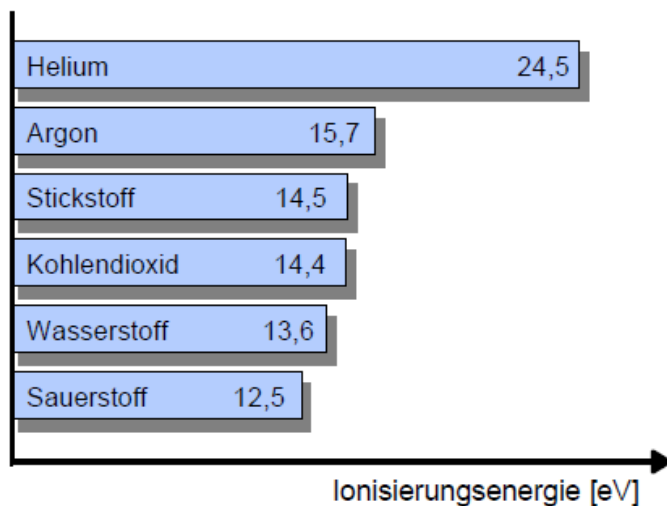


Abbildung 3.5: Dichte und Ionisierungsenergie [11]

Einfluss der Gase auf das Schweißergebnis

Die Zusammensetzung des Schweißgases hat einen großen Einfluss auf das Resultat einer Schweißung. Da bei Kupferwerkstoffen Ar und He verwendet werden, ist hier je nach Anforderung das richtige Gas bzw. Mischungsverhältnis zu wählen. Es muss zunächst angegeben werden, was für eine Verbindung geschweißt werden soll. Dabei sind sowohl Blechdicke, Nahtvorbereitung und Werkstoff als auch der Einsatz von evtl. Schweißzusatz (Draht) zu berücksichtigen.

Dadurch, dass He gegenüber Ar eine bessere thermische Leitfähigkeit hat (vgl. Abb. 3.6), wird eine höhere Lichtbogenspannung vorausgesetzt, um die gegenüber Ar höhere Ionisierungsenergie aufzubringen. Zudem entsteht durch He ein heißeres Schmelzbad, wodurch dieses flüssiger wird und zugleich ein tieferer gleichmäßiger Einbrand entsteht (siehe Abb. 3.7). Die geringere Viskosität und die geringere Oberflächenspannung sorgen für eine bessere Entgasung des Schmelzbades, d.h. das Gas, welches später Poren in der Schweißnaht bilden würde, steigt ähnlich wie eine Luftblase in einem Wasserbehälter auf und verlässt das Schmelzbad. Ein Vorteil von Ar ist die bessere elektrische Leitfähigkeit, welche auf die niedrigere Ionisierungsenergie zurückzuführen ist, die das Zünden erleichtert und so für eine bessere Lichtbogenstabilität sorgt [11]; [4].

Daneben ist das Verdrängen von Luft leichter zu bewerkstelligen, da Ar eine höhere Dichte als Luft hat (siehe Tab. 3.2 und Abb. 3.5).

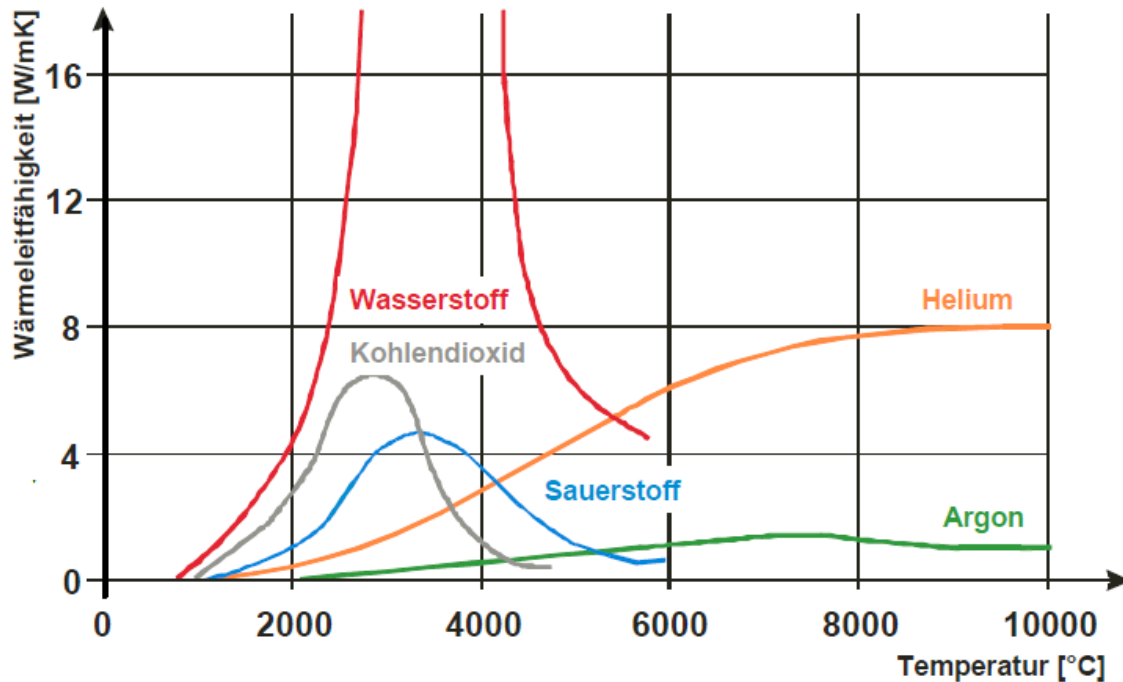


Abbildung 3.6: Wärmeleitfähigkeit von Schutzgaskomponenten [11]

Mit He kann durch die höhere Wärmeeinbringung das Vorwärmen reduziert und die Schweißgeschwindigkeit erhöht werden. Wie man an Blindraupenschweißungen unter sonst gleichbleibenden Randbedingungen sieht, die in Abbildung 3.7 gezeigt werden. Auf Grund des höheren Preises von He gegenüber Ar ist allerdings abzuwägen, ob sich der Einsatz aus wirtschaftlicher Sicht lohnt. Meist

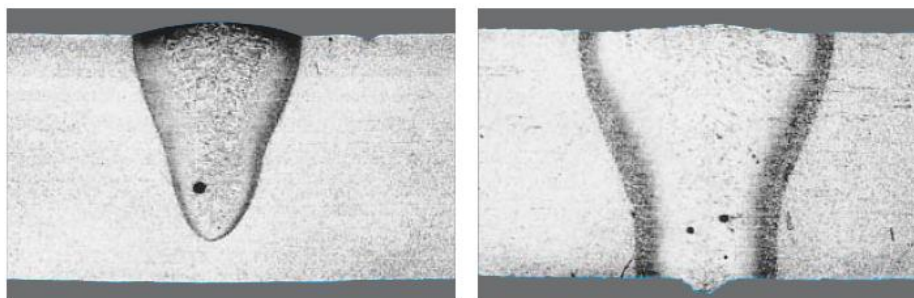


Abbildung 3.7: Einbrandtiefe von Argon (links) und Helium (rechts) [12]

wird daher ein Gemisch aus beiden Gasen verwenden, um die Kosten möglichst gering zu halten.

Um den Schutz der Schweißnahtwurzel durch das Fernhalten der sauerstoffhaltigen Atmosphäre zu gewährleisten, wird beim Formieren meist das kostengünstigere Ar verwendet, um den Sauerstoff zu verdrängen. Bei Rohrverbindungen kann durch ausreichenden Innendruck bei der Innenformierung (vgl. Abb. 2.1) zugleich der Wurzeldurchhang verhindert werden.

### 4 Vorgaben und Zielsetzung

Ziel der folgenden in Kapitel 6. dargestellten Versuche ist es, beim Fügen von CuNi10Fe1,6Mn eine höhere Prozesssicherheit im Hinblick auf die Vermeidung von Poren durch richtige Wahl der Schweißparameter und Schutzgase zu bekommen. Dazu werden auf Grundlage einiger Vorgaben Untersuchungen zur schweißtechnischen Verarbeitung des Werkstoffes gemacht, so dass eine Art Verarbeitungsstandard gefunden wird. Um dies zu realisieren, wird das teilautomatisierte WIG-Orbitalschweißverfahren eingesetzt, wobei eine einlagige Schweißnaht zwei Rohrstümpfe aneinander fügen soll.

Zunächst wird durch Schweißen von Blindraupen eine Optimierung von Nahtvorbereitung, Stromstärke, Anordnung von Brenner, Elektrode und Drahtzufuhr sowie Schweißgeschwindigkeit vorgenommen.

Unter Einsatz verschiedener Schweißschutzgasgemische werden die jeweiligen Schweißergebnisse ausgewertet und beurteilt. Ziel ist es in erster Linie, anhand von Untersuchungen zur Porenbildung festzulegen, bei welchem Gasgemisch die Porenbildung weitestgehend reduziert werden kann. Aufbauend darauf könnten in Form weiterer Untersuchungen die obigen Einflussparameter erneut betrachtet werden, die die Prozesssicherheit weiter verbessern können.

Der Grundgedanke dahinter ist, dass die entstehenden Schweißnähte später den hohen Anforderungen der TÜV-Vorgaben gerecht werden und die so hergestellten/ verschweißten Bauteile für den Einsatz im maritimen Bereich beispielsweise in Seewassertanks verwendet werden können.

In den folgenden Unterpunkten werden zunächst die Vorgaben bzw. Erklärungen dargestellt, die notwendig sind, um den später beschriebenen Versuchsablauf besser zu verstehen.

#### 4.1 Grundwerkstoff und Abmessungen des zu fügenden Rohres

Der verwendete Grundwerkstoff, für die Rohre  $\varnothing 108 \times 2,5$  mm, die hier gefügt werden sollen, ist eine CuNi10Fe1,6Mn-Legierung mit der Werkstoffnummer 2.1972. Diese Legierung wird vorzugsweise in Bereichen eingesetzt, bei denen Kontakt zu Seewasser besteht. Durch die hohe Korrosionsbeständigkeit gegenüber Seewasser wird dieser Werkstoff in maritimen Bereichen wie dem Schiffbau oder der Offshoretechnik eingesetzt (vgl. Pkt. 3.1). Ein weiterer Überblick über die Eigenschaften sowie Anforderungen an die Rohre, liefern die Tabellen 4.1 bis 4.3 aus der DIN 85004-4 „Rohrleitungen aus Kupfer-Nickel-Legierungen“, wo vereinzelt auf das Werkstoff-Leistungsblatt (WL) 2.1972 verwiesen wird.



### 4.1.1 Eigenschaften

Tabelle 4.1: Chemische Eigenschaften [13]

Elementbezeichnung:	Cu	Ni	Fe	Mn	C	Pb	S	Zn	P	Zr	Sonst.
Anteil in %:	min.		9,0	1,5	0,5	-	-	-	-	-	-
	max.	Rest	11,0	1,8	1,0	0,05	0,01	0,005	0,05	0,02	0,03

Tabelle 4.2: Mechanische Eigenschaften [13]

0,2 % Dehngrenze (Rp 0,2) in N/mm <sup>2</sup>	100 - 160
Zugfestigkeit (Rm) in N/mm <sup>2</sup>	300 - 400
Bruchdehnung A5 %	> 30
Brinellhärte HB 10	70 - 90

Tabelle 4.3: Physikalische Eigenschaften [13]

Dichte bei 20 °C in kg/m <sup>3</sup>	8900
Spezifische Wärme bei 20 °C in kg/m <sup>3</sup>	377
Schmelztemp. in °C	1100 - 1145
Thermische Leitfähigkeit bei 20 °C in W/m*k	50
Ausdehnungskoeffizient (linear) bei 20-100 °C, 10 <sup>-6</sup> /K	17
Elektrischer Widerstand bei 20 °C in Microohm cm	19
Elastizitätsmodul bei 20 °C in GN/m <sup>2</sup>	138

### 4.1.1 Abmessungen und Anforderungen

Um ein gutes Schweißergebnis in der WIG-Orbitalschweißtechnik zu gewährleisten, müssen nicht nur die Toleranzen der Schweißanlage aus dem Punkt 4.5.1 berücksichtigt werden, sondern auch die Anforderungen an den Werkstoff aus [13]. Der Nachweis über die Einhaltung der Vorgaben aus [13] muss vom Auftragnehmer durch das Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach E DIN EN 10204 (Bescheinigung EN 10204-3.1) durch Angabe der Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen nachgewiesen werden. Ein Beispiel für ein solches Abnahmeprüfzeugnis 3.1 befindet sich im Anhang A.

### 4.2 Zusatzwerkstoff

Beim eingesetzten Zusatzwerkstoff CuNi30 (S Cu 7158) mit der Werkstoffnummer 2.0837 nach DIN 1733 handelt es sich um einen Kupfer-Nickel-Schutzgasdraht mit einem Durchmesser von 0,8 mm. Dieser Werkstoff wird bevorzugt in Bereichen, wie dem chemischen Apparatebau, der Meerwasserentsalzung, dem Schiffbau und der Offshoretechnik eingesetzt [14]. Er lässt sich mit inerten und reduzierenden Gasen mit einem maximalen H<sub>2</sub>-Anteil von 3 % nach DIN EN 439 verarbeiten.

### 4.2.1 Eigenschaften

Da der Zusatzwerkstoff beim Schweißprozess komplett aufgeschmolzen wird, ist hier i.d.R. mit einem höheren Abbrand-/ Verdampfungsverlust bestimmter Legierungselemente zu rechnen, die dem Werkstoff seine besonderen Eigenschaften (z.B. Korrosionsbeständigkeit, etc.) verleihen. Um zu garantieren, dass die Qualität der Schweißnaht nach dem Fügen immer noch mindestens gleich der Qualität des Grundwerkstoffs ist, muss dieser entsprechend höhere Legierungsanteile enthalten. Ansonsten müsste von einer metallurgischen Schwächung des Bauteils an dieser Stelle ausgegangen werden (vgl. Tab. 4.1 und Tab.: 4.4).

**Tabelle 4.4: Chemische Eigenschaften vom Zusatzwerkstoff [14]**

Elementbezeichnung:	Cu	Ni	Fe	Mn	C	Ti
Anteil in %:	Rest	30,0	0,6	0,8	< 0,05	< 0,05

**Tabelle 4.5: Mechanische und Physikalische Eigenschaften [14]**

0,2 % Dehngrenze (Rp 0,2) in N/mm <sup>2</sup>	> 200
Zugfestigkeit (Rm) in N/mm <sup>2</sup>	> 300
Bruchdehnung A5 %	> 30
Brinellhärte HB 10	120
Schmelztemp. in °C	1180 - 1240

Der Werkstoff ist vom TÜV (VdTÜV, Kennblattnummer 01625.05.01.07) und dem GL zugelassen und wird oft beim Fügen von CuNi10Fe1,6Mn eingesetzt [14].

## 4.3 Vorgaben aus geltenden Regelwerken

### 4.3.1 Schweißfehler

Auch beim WIG-Schweißen kann es zu unterschiedlichsten Schweißfehlern, die in Tabelle 4.4 aufgelistet sind, kommen. Jedem dieser Fehler wird eine bestimmte Ordnungsnummer zugewiesen, wie sie z.B. in den TÜV-Versuchs-Protokollen verwendet werden (vgl. Anhang B). Im Folgendem werden nur die Porenfehler betrachtet, da diese der Schwerpunkt der weiteren Untersuchung ist.

Tabelle 4.4: Schweißfehler [15]

Nach DIN EN ISO 6521-1			Bemerkung
Benennung	Ordnungsnummer	Buchstabensymbol	
Pore	2011	Aa	siehe Tabelle 4.5
Porennest	2013	-	nicht zulässig <sup>a, b</sup>
Porenzeile	2014	-	nicht zulässig <sup>b</sup>
Schlauchpore	2016	Ab	nicht zulässig
Wolframeinschluss	3041	H	nicht zulässig <sup>c</sup>
Bindefehler	401	C	nicht zulässig
Ungenügende Durchschweißung	402	D	nicht zulässig
Kerbe, durchlaufend	5011	F	nicht zulässig
Kerbe, unterbrochen	5012	F	bedingt zulässig
Wurzelkerbe	5013	-	nicht zulässig
Riss	100	E	nicht zulässig
Unregelmäßige Nahtzeichnung	514	-	zulässig
Ansatzfehler	517	-	nicht zulässig
<sup>a</sup> Porengröße bis 0,5 mm bleibt ab Wanddicke von 2 mm unberücksichtigt. <sup>b</sup> Poren bis 0,3 mm werden nicht bewertet. <sup>c</sup> Wolframeinschlüsse bis 0,5 mm bleiben ab einer Wanddicke von 2 mm unberücksichtigt; Wolframeinschlüsse bis 0,3 mm werden nicht bewertet			

#### 4.3.2 Poren

„Poren sind im erstarrten Schweißgut ganz oder teilweise eingeschlossene Gasblasen“ [Zitat 16].

Es wird dabei zwischen der metallurgischen- und mechanischen Porenbildung unterschieden.

##### Metallurgische Porenbildung

Diese Art der Porenbildung ist auf die Löslichkeit der Gase in der flüssigen Schmelze des Stahls zurückzuführen. Dabei handelt es sich meist um Wasserstoff (H), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O). Ist die Zeit der Erstarrungsphase kleiner als die Zeit, die die Gasblasen brauchen um aus dem flüssigen Schmelzbad aufzusteigen, kommt es durch die eintretende Erstarrung zu Gaseinschlüssen. Die Hohlräume nachfolgend Poren genannt, bleiben in der Schweißnaht zurück. Die Entstehung von Gasblasen aus der eigentlichen Schmelze ist nicht möglich [16].

## Mechanische Porenbildung

Tritt auf, wenn z.B. Hohlräume wie Spalte unter Einsatz von Gasen überschweißt werden. So können die durch die Wärme expandierenden Gase nicht komplett in die andere Richtung entgasen. Der sich so aufbauende Druck sorgt für eine Gasbildung in der Schmelze. Befinden sich in den Hohlräumen zusätzlich noch vergasende Reststoffe, durch z.B. Verschmutzungen (Öle, Fette, etc.), bilden sich zusätzliche Gasblasen. Die so entstehenden Poren haben meist eine Verbindung zu den Hohlräumen bzw. Spalten [16].

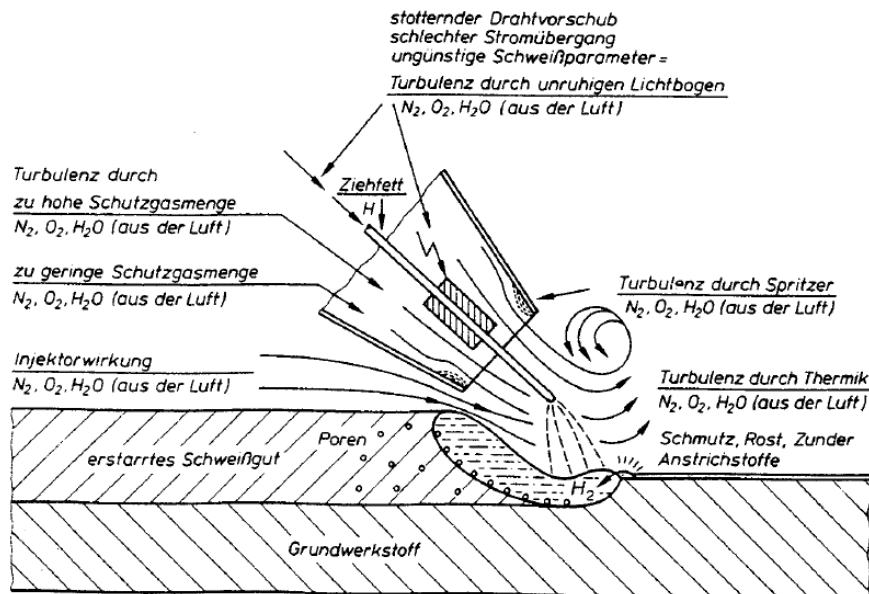


Abbildung 4.1: Porenbildung durch Gasaufnahme (Metall-Schutzgasschweißen) [16]

Da sich die Porenbildung nie gänzlich ausschließen lässt, werden daher Vorgaben zu der zulässigen Porenanzahl bzw. Porengröße in Form einer DIN [13] gemacht (siehe Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5: Zulässige Porigkeit nach DIN 85004-4 [13]

Wanddicke s mm	Schweißnahtdicke mm  min.	Zulässige Porenzahl je 50 mm Nahtlänge bei Porengröße <sup>a</sup> in mm			Wanddicke s mm	Schweißnahtdicke mm  min.	Zulässige Porenzahl je 50 mm Nahtlänge bei Porengröße <sup>a</sup> in mm		
		über 0,3 bis 0,5	über 0,5 bis 1	über 1,0 bis 1,5			über 0,3 bis 0,5	über 0,5 bis 1	über 1,0 bis 1,5
1,5	1,65	4	0	0	8	8,8	-	7	0
2	2,2	b	2	0			-	5	1
2,5	2,75						-	2	2
3	3,3	-	2	0	10	11	-	0	3
		-	0	1			-	8	0
3,5	3,85	-	2	0			-	6	1
		-	0	1	-	4	2		
4	4,4	-	3	0	-	2	3		
		-	1	1	-	0	4		
5	5,5	-	4	0	12	13,2	-	10	0
		-	2	1			-	7	1
		-	0	2			-	5	2
6	6,6	-	5	0	-	3	3		
		-	3	1	-	1	4		
		-	0	2	-				

<sup>a</sup> Porengröße ist das im Film feststellbare (projizierte) Größtmaß einer Pore  
<sup>b</sup> Porengröße bis 0,5 mm bleibt ab einer Wanddicke von 2 mm unberücksichtigt; Poren bis 0,3 mm werden nicht bewertet

Die Prüfung der Schweißnähte auf ihre Porigkeit wird dann mit Hilfe verschiedener Prüfverfahren, wie sie im Folgenden beschrieben sind, durchgeführt.

### 4.3.3 Prüfverfahren

Als Grundlage zur Durchführung der Prüfverfahren sind die Anforderungen an die Prüfstücke aus der DIN EN 287-1:2004 + A2:2006 (D) [17] zu beachten. Hier müssen vor Beginn der Prüfung folgende Bedingungen erfüllt sein:

- alle Schlacken und Spritzer müssen entfernt sein
- keine mechanische Nachbearbeitung der Schweißnaht durch Schleifen
- bei Festeinspannung des Rohres muss die 12 Uhr Position gekennzeichnet werden
- die vorgegebenen Formen und Maße für die Größe des Probenstückes, sollten denen in der Abbildung 4.3 entsprechen

Jede Schweißnaht muss durch die in der Tabelle 4.6 dargestellten Prüfverfahren auf ihren Zustand geprüft werden. Es sollte dabei zuerst die Sichtprüfung durchgeführt werden, um vorab sichtbar fehlerhafte Proben/ Schweißnähte auszusortieren, damit diese nicht unnötig kostenintensiveren Prüfungen unterzogen werden. Außerdem kann zu Anfang noch eine sogenannte Farbeindringprüfung durchgeführt werden, die Risse und Poren erkennen lässt. Dieses recht einfache und ohne teure Gerätetechnik durchführbare Verfahren kann beim Aufdecken von Schweißfehler helfen.

**Tabelle 4.6: Prüfverfahren [17]**

Prüfverfahren	Stumpfnah (am Blech oder am Rohr)	Kehlnah und Rohrabzweigung
Sichtprüfung nach EN 970	obligatorisch	obligatorisch
Durchstrahlungsprüfung nach EN 1435	obligatorisch <sup>a b d</sup>	nicht obligatorisch
Biegeprüfung nach EN 910	obligatorisch <sup>a b f</sup>	nicht anwendbar
Bruchprüfung nach EN 1320	obligatorisch <sup>a b f</sup>	obligatorisch <sup>c e</sup>

<sup>a</sup> Es müssen entweder Durchstrahlungs- oder Biege- oder Bruchprüfungen durchgeführt werden.  
<sup>b</sup> Wenn Durchstrahlungsprüfungen durchgeführt werden, sind bei den Schweißprozessen 131, 135, 136 (nur Metallpulver-Fülldrahtelektroden) und 311 zusätzlich Biege- oder Bruchprüfung vorgeschrieben.  
<sup>c</sup> Die Bruchprüfungen können durch makroskopische Untersuchungen nach EN 1321 ersetzt werden, mindestens zwei Schlitze.  
<sup>d</sup> Bei ferritischem Stahl darf die Durchstrahlungsprüfung bei Dicken  $\geq 8$  mm durch eine Ultraschallprüfung nach EN 1714 ersetzt werden.  
<sup>e</sup> Die Bruchprüfungen an Rohren dürfen durch Durchstrahlungsprüfungen ersetzt werden.  
<sup>f</sup> Für Rohraußendurchmesser  $D \leq 25$  mm dürfen die Biege- oder Bruchprüfungen durch eine Kerbzugprüfung des kompletten Prüfstücks ersetzt werden.

Da bei den folgenden Untersuchungen die Schweißnähte primär auf Poren untersucht werden sollen, ist es nicht notwendig, alle Prüfverfahren durchzuführen, sondern nur die, welche für die Porenerforschung in Frage kommen. Die Verfahren können in zerstörungsfreie (Zf) und zerstörende (Z) Prüfung eingeteilt werden. Eine Erklärung zu den relevanten Verfahren für diese Arbeit wird im Folgenden gegeben.

### **Sichtprüfung VT (Zf)**

Bei der Sichtprüfung handelt es sich um eine visuelle Prüfung der Schweißnaht in Bezug auf Schweißnahtfehler. Dabei sollten die Vorgaben der Norm DIN EN 970:1997 [18] beachtet werden, die unter anderem vorschreiben, dass nur Personal mit entsprechender Schulung unter ausreichender Beleuchtung und einem Betrachtungswinkel  $> 30^\circ$  die gesäuberte Naht beurteilen darf. Ebenso wie die Nahtoberseite, muss hier auch die Wurzel betrachtet werden.

### **Farbeindringprüfung PT (Zf)**

Da sich bei der Sichtprüfung nur recht große Risse und Poren an der Oberfläche erkennen lassen, bietet die Farbeindringprüfung die Möglichkeit kleinere Poren schon vor einer Durchstrahlungsprüfung sichtbar zu machen [19].

Hierzu muss zunächst einmal die Prüffläche mit einem speziellen Reiniger gereinigt und anschließend getrocknet werden. Als nächstes wird ein geeignetes Eindringmittel (meist rot) aufgetragen, welches in die zur Oberfläche offenen Schweißfehler eindringt. Nach vorgegebener Eindringdauer wird das überschüssige Eindringmittel gründlich mit einem Lappen und Reiniger entfernt. Als letztes wird der Entwickler aufgetragen, der das eingedrungene Färbungsmittel aus den offenen Fehlern aufnimmt und diese dann durch eine Färbung in Entwicklerfarbe anzeigt [19]. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Mittel aufeinander abgestimmt sind bzw. jeweils vom gleichen Hersteller gewählt werden.

### Durchstrahlungsprüfung RT (Zf)

Die Durchstrahlungsprüfung wird eingesetzt um Volumeneinschlüsse, die nicht von außen sichtbar sind, wie z.B. Poren oder Lunker, erkennbar zu machen. Die Röntgen- oder Gammastrahlen werden beim Durchdringen, abhängig vom Werkstoff und der eingesetzten Strahlungsenergie, unterschiedlich stark abgeschwächt. So lassen sich Unterschiede in Volumen und Dichte später als unterschiedliche Schwärzung auf einem hinterlegten Röntgenfilm erkennen (siehe Abb. 4.2). Neben der Wahl der richtigen Strahlungsquelle und des Abstands des Films wirkt sich auch die Bauteildicke auf das Ergebnis der Durchstrahlungsbilder aus. Diese Prüfung wird daher von erfahrenem Personal eingestellt und durchgeführt werden [20]. In der Norm DIN EN 1435 [21] finden sich umfassende Angaben zur genauen Vorgehensweise bei dieser Prüfung.

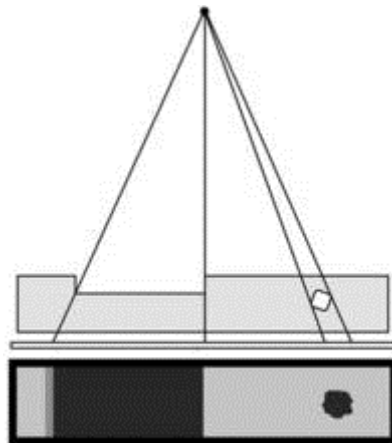


Abbildung 4.2: Durchstrahlungsprüfung [20]

### Makroschliffe (Z)

Bei dem Makroschliff wird ein Querschnitt der Fügestelle angefertigt, um so beispielsweise das Gefüge in und um die Schweißnaht sichtbar zu machen. Dazu wird zunächst quer zur Schweißnaht ein kleines Stück aus der Probe herausgetrennt und auf eine entsprechend handliche Größe zu recht geschnitten. Weiter wird die herausgetrennte Probe auf der zu untersuchenden Seite in verschiedenen

immer feiner werdenden Stufen mit Schleifpapier plan geschliffen. Durch das Schleifen entsteht eine feine Oberfläche ohne Riefen und Unebenheiten, die das Gefügebild verbergen kann. Im Anschluss wird das Probestück mit Ammoniumpersulfat angeätzt. So werden grobe Strukturen wie Aufbau, Korngröße oder evtl. Fehler besser sichtbar gemacht. Diese lassen sich dann unter einem Mikroskop erkennen.

### 4.3.4 Prüfstücke

Die Vorgaben für die Geometrie der Probestücke sind in der DIN EN 287-1 [17] beschrieben. Hier wird vorgegeben, dass bei Rohren drei Prüfstücke erforderlich sind, sofern eine Mindestprüflänge von 150 mm vorhanden ist (Umfang  $> 150$  mm). Zudem müssen die Maße aus Abb. 4.3 eingehalten werden.

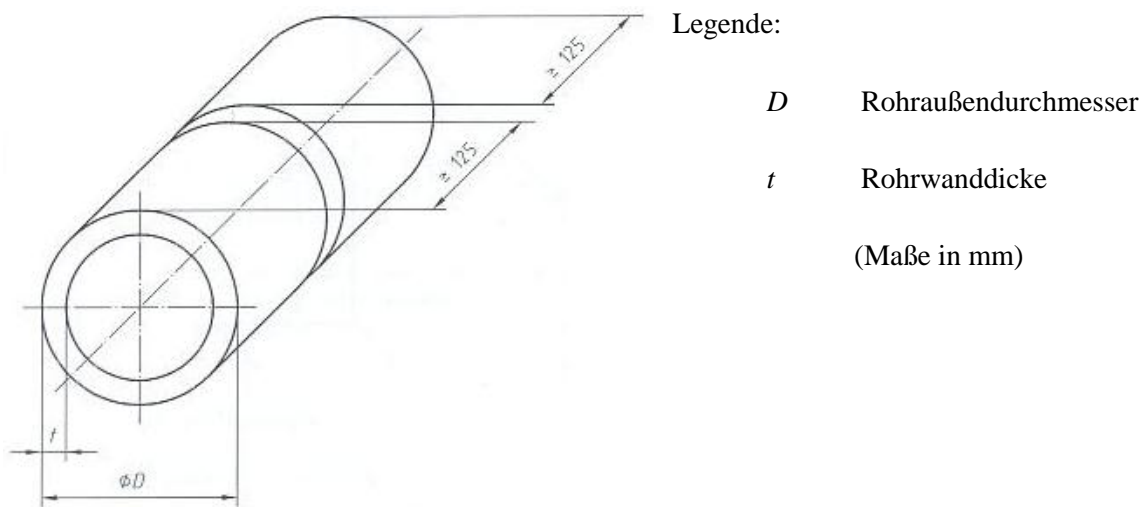


Abbildung 4.3: Maße des Prüfstücks [13]

## 4.4 Prozessparameter

Prozessparameter sind in einem Schweißprozess festgelegt und können die Qualität des Schweißprozesses wesentlich beeinflussen. Sie beinhalten die Anordnung von Wolframelektroden, Gasdüse, Gaslinse und Zusatzwerkstoff, die elektrischen Größen und Angaben zum Schutzgas [22].

### 4.4.1 Netzanschluss

Kommt es während des Schweißprozesses zu einer Schwankung der anliegenden Netzspannung, die nicht größer als 10 % ist, so können moderne Schweißanlagen diese i.d.R. ohne Probleme kompensieren. Treten Schwankungen auf, die von der Schweißanlage nicht kompensiert werden können, so hat dies Auswirkungen auf die zuvor eingestellten Stromdaten des Schweißprozesses und die Reproduzierbarkeit des Schweißergebnisses [22]. Besonders auf Baustellen ist daher zu überprüfen, ob die erforderliche Netzspannung gegeben ist, da hier oft viele Verbraucher an einer Stromquelle angeschlossen sind und diese die Netzspannung beeinflussen können. Es sollten dementsprechend mög-



lichst wenig Verbraucher an derselben Stromquelle angeschlossen werden. Auch beim Einsatz von Verlängerungskabeln, insbesondere bei Kabeltrommeln, ist darauf zu achten, dass diese möglichst komplett abgewickelt werden [22].

### 4.4.2 Anordnung des Brenners, der Wolframelektrode und des Zusatzdrahtes

Durch die Möglichkeit, die einzelnen Komponenten wie Brenner, Wolframelektrode und Zusatzdraht verschieden zu positionieren, lässt sich ebenfalls das Schweißergebnis beeinflussen. Besonders wenn das Ergebnis reproduzierbar sein soll, ist darauf zu achten, dass jeweils die gleichen Einstellungen gewählt und stetig überprüft werden. Dabei müssen Einstellmöglichkeiten wie Abstände, Geometrie, etc. (siehe Abb. 4.4) berücksichtigt und festgelegt werden [22].

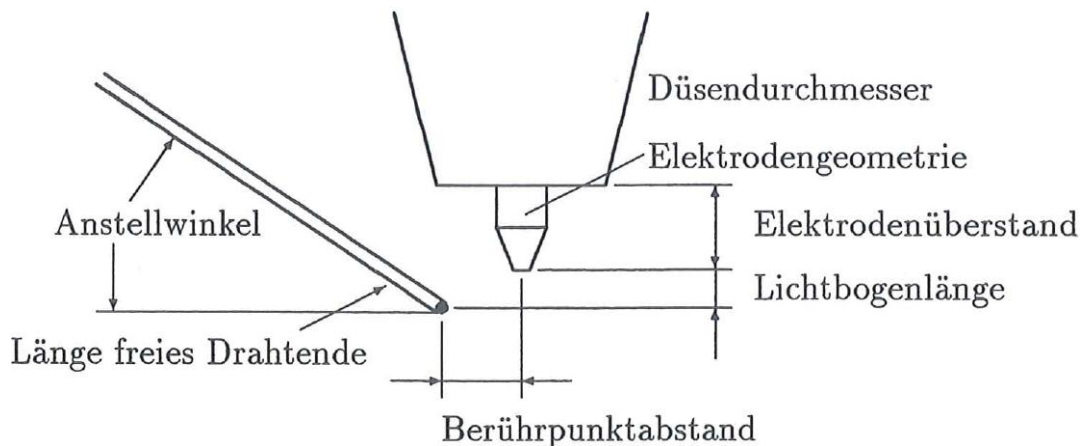


Abbildung 4.4: Anordnung WIG-Brenner und Drahtzufuhr [22]

Da sich die Lichtbogenlänge nicht an der Orbitalschweißquelle regulieren lässt, wird diese in Abhängigkeit der Lichtbogenspannung, dem Elektrodenüberstand, der Schutzgasmenge, der Wolframelektrode und der Schutzgasmenge bestimmt [22]. Grundsätzlich sind dabei die Vorgaben der Schweißanlage zu beachten, da diese meist passend dafür festgelegt wurden.

Da aber die Lichtbogenlänge zu einem gewissen Teil vom Verschleiß der Elektrode abhängig ist und sich durch diesen die Lichtbogenlänge automatisch vergrößert, sinkt der Wirkungsgrad des Lichtbogens. Als Ausgleich könnte der Schweißstrom erhöht werden, was allerdings zu Schweißnahtfehlern führen kann. Aus diesem Grund muss der Verschleiß der Elektrode beobachtet werden und ein Austausch oder eine Aufbereitung, wie in Punkt 4.4.6 dargestellt, stattfinden. Insbesondere bei der Verwendung eines Zusatzdrahtes, kann der Berührungsabstand des freien Drahtendes zur Elektrode durch einen längeren Lichtbogen verkleinert werden und die Wolframelektrode vorzeitig dotieren lassen, so dass diese früher als üblich ausgetauscht werden muss [22].

### 4.4.3 Parametereinstellung, Schweißprogramm

Ebenso wichtig für die Reproduzierbarkeit des Schweißprozesses ist auch die gleichbleibende Einstellung der Prozessdaten, die zuvor für den jeweiligen Fall festgelegt werden. Dabei werden die elektrischen Prozessgrößen, die Schweiß- und Zusatzdrahtgeschwindigkeit, die programmgesteuerten Bewegungsabläufe sowie weitere Prozessabläufe (z.B. Gasvor- und Nachströmzeit) von den meisten Anlagen schon automatisch durch Eingabe der Eckdaten (Rohrgeometrie, Werkstoff, etc.) festgelegt und können dann vom Bediener meist noch genauer oder anders programmiert werden (vgl. 2.4.2) [22].

### 4.4.4 Schweißgas

Die Wahl des Schutzgases, welches hier aus Ar und/ oder He bestehen soll, spielt gerade bei Kupferwerkstoffen eine wichtige Rolle (vgl. Pkt. 3.2.1). Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und die dadurch recht hohe Energieeinbringung, die benötigt wird, um das Schmelzbad für die Entgasung flüssig genug zu halten, muss die Schutzgaszusammensetzung so gewählt werden, dass genügend Energie zur Verfügung gestellt wird, ohne dass das Werkstück übermäßig erhitzt, bzw. es im schlimmsten Fall zum Durchbrand kommt.

Die erforderlichen Schutzgasströmzeiten werden, wie auch die anderen Prozessdaten, über die Orbital-schweißanlage eingestellt. Festgelegt wird dabei das Ein- und Ausschalten des Schutzgases vor und nach dem Schweißvorgang. Die Gasmenge wird dabei manuell an der Schweißanlage eingestellt und von dieser ebenfalls dokumentiert [22].

### 4.4.5 Wurzelschutz

Als Wurzelschutz soll hundertprozentiges Argon eingesetzt werden. Dabei muss so lange gespült werden, bis die sauerstoffhaltige Luft komplett verdrängt ist und der Restsauerstoffgehalt nur noch zwischen 20 - 50 ppm liegt [23]. Wasserstoffhaltige Formiergase sind hier unzulässig, da diese zur Porenbildung führen.

### 4.4.6 Wolframelektroden Vor- bzw. Aufbereitung

Um bei jedem Schweißvorgang ein gleichbleibendes Schweißergebnis zu erzielen, ist es wichtig, die vorgeschriebene Elektrodengeometrie einzuhalten, da diese die Lichtbogenstabilität und die Durchschweißigenschaften beeinflusst. Deshalb sollte vor jedem neuen Schweißvorgang die Elektrode hinsichtlich ihrer Geometrie kontrolliert werden. Insbesondere nach einem Kurzschluss kann es an der Elektrode zu Verunreinigung kommen, die dann beseitigt werden müssen.

Bei der Vor- bzw. Aufbereitung ist darauf zu achten, dass der Schliff immer in Längsrichtung geschieht und dabei möglichst keine übermäßig tiefen Riefen entstehen (vgl. Abb. 4.5). Der Winkel, in dem die Elektrode angeschliffen werden muss, ist in Abb. 4.6 dargestellt. Dabei sollte der Winkel  $\alpha$ , zwischen 18 und 30 ° und der Abplattungsdurchmesser  $M$  zwischen 0,1 und 0,5 mm liegen [2].



Abbildung 4.5: Längsschliff der Wolframelektrode [2]

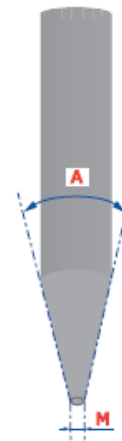


Abbildung 4.6: Anschliffwinkel (A) und Abplattungsdurchmesser (M) [2]

## 4.5 Randbedingungen des Schweißprozesses

Bei den Randbedingungen handelt es sich um sekundäre Prozessparameter, die indirekten Einfluss auf die Qualität des Schweißergebnisses haben können.

### 4.5.1 Nahtvorbereitung

Da es sich bei den Poren um eine Folge der Bildung von Gasen wie H, CO oder S-Oxide handelt, muss gewährleistet werden, dass sich Gase auf Grund einer Verbrennung von z.B. Verunreinigungen, wie Fetten oder Ölen, nicht bilden. Diese Fette und Öle können im Kühl- und/ oder Schneidmittel vorkommen, welches bei Trennvorgängen eingesetzt worden ist. Die Entfernung aller Verunreinigungen bei der Nahtvorbereitung im ausreichenden Abstand innen und außen (mind. 50 mm von der Stirnfläche) durch Aceton oder Alkohol ist daher eine Grundvoraussetzung für ein porenfreies Schweißergebnis (siehe 6.2.3 Reinigung der Fügestelle)! Doch auch Kantenversatz- und Nahtgeometrieabweichungen (vgl. Tab. 4.7) bzw. übermäßige Rauhtiefen (Kratzer) sind so gering wie möglich zu halten und ggf. mechanisch anzupassen [22]. Auch der Grat, der evtl. durch das Trennen/ Sägen am Rohrende entsteht, muss mit einem entsprechenden Werkzeug mechanisch ohne übermäßige Wärmeeinbringung entfernt werden. Das Entfernen der Oxidschicht mittels einer korrosionsbeständigen Drahtbürste (z.B. CrNi-Stahl) im ausreichenden Abstand (ca. 10 mm) von der Fügestelle auf der Innen- und Außenseite des Rohres ist ebenfalls durchzuführen [4]; [22]. Zu beachten ist dabei, dass dies jeweils zeitnah vor dem Schweißen geschieht oder die Fügestelle kurz vor dem Schweißen noch einmal gereinigt wird, um eine erneute Verunreinigung oder Oxidschichtbildung weitestgehend auszuschließen [22].

Beim Orbitalschweißen ist die am häufigsten verwendete Fügeform ein Stumpfstoß, der sich i.d.R. bis zu Wanddicken von etwa 4 mm ohne geometrische Nahtvorbereitung realisieren lässt [1]. Da das WIG-Schweißverfahren empfindlich auf Spalte reagiert, müssen die Rohrenden jeweils so vorbereitet werden, dass der größte Spalt nicht größer als 0,1 mm ist.

Weitere zulässige Toleranzen, die hier eingehalten werden müssen, finden sich in Tabelle 4.7.

**Tabelle 4.7: Zulässige Toleranzen beim WIG-Orbitalschweißen [1]**

Fügespalt	max. 0,1 mm
Versatz	max. 0,1 mm
Rohrdurchmesser	0,2 mm
Rohrwanddicke	0,1 mm

## 5 Versuchsanlage

Im Folgenden werden einigen wichtige Angaben zu der Versuchsanlage gemacht.

### 5.1 Schweißstromquelle

Die Schweißstromquelle besteht aus folgenden Modulen:

- Schweißstromversorgung
- Lichtbogenzündeinrichtung
- Bedienfeld
- Schweißgasversorgung
- Kühlwasserversorgung
- Funktions- und Antriebssteuerung für die Schweißköpfe
- Funktions- und Antriebssteuerung der Kaltdrahtzufuhr

Weitere Anlagendaten sind der Tabelle 5.1 zu entnehmen.

**Tabelle 5.1: Anlagendaten der Schweißstromquelle [1]**

Schweißstromeinstellbereich, stufenlos	3 - 250 A
Nennstrom bei 100 % Einschaltdauer	190 A
Nennspannung bei 100 %	18 V
Nennstrom bei 60 % Einschaltdauer	250 A
Nennspannung bei 60 %	20 V
Leerlaufspannung	106 V

### 5.2 Schweißkopf

Der offene Schweißkopf verfügt über einstellbare Klemmbacken, mit denen der Kopf auf dem zu schweißenden Rohr festgeklemmt wird. Durch die Wahl verschiedener Klemmbacken lassen sich Rohrdurchmesser von 25 bis 115 mm schweißen. Der Schweißkopf wird dabei über ein Schlauchpaket, welches mit der Schweißanlage verbunden ist, mit Strom, Kühlung und Schutzgas versorgt. Die eigentliche Steuerung erfolgt dabei ebenfalls mit Hilfe eines separaten Kabels über die Anlage. Der Zusatzwerkstoff (Draht) befindet sich auf einer kleinen Rolle direkt am Schweißkopf. Dementsprechend steht dieser während des Schweißprozesses für die Drahtvorschubeinheit zur Verfügung.

Die folgenden Bilder zeigen den Schweißkopf.



Abbildung 5.1: Schweißkopf Bild 1,  
eigene Aufnahme



Abbildung 5.2: Schweißkopf Bild 2,  
eigene Aufnahme

### 5.3 Gasflaschen mit Druckminderer

Die Gasflaschen werden jeweils mit einem passendem Druckminderer nach DIN EN 585 ausgestattet und mit der Schweißanlage bzw. der Formierkammer über die entsprechenden Schläuche verbunden.

### 5.4 Schläuche

Die verwendeten Gasschläuche entsprechen den Vorgaben der DIN 20018-1:2003-04, die unter anderem vorschreibt, dass diese sauerstoffundurchlässig sein müssen.

### 5.5 Formierkammer

Die Formierkammer ist entsprechend der Größe des Rohres passend gewählt. Die Abbildung 5.3 zeigt die für den Versuch eingesetzte Formierkammer.



Abbildung 5.3: Formierkammer, eigene Aufnahme

## 6 Versuchsdurchführung

### 6.1 Ermittlung der Schweißparameter

#### 6.1.1 Einstellen/ Festlegen der Parameter im Schweißprogramm

Das Einstellen der Parameter bzw. das Schreiben eines Schweißprogrammes und das Einteilen von Sektoren wird über die Bedieneinheit der Orbitalschweißanlage vorgenommen. Vorab müssen jedoch unter Berücksichtigung einiger Faktoren, wie Werkstoff, Rohrwanddicke, Rohrdurchmesser, verwendetes Schweißgas, etc., Anhaltswerte bestimmt werden. Einige typische Verfahrensdaten hierfür können aus der Bedienungsanleitung [1] entnommen werden. Dies dient als Ausgangspunkt und Orientierung für die einzelnen Punkte des Versuchsprogramms.

Das Ermitteln der optimalen Prozessparameter an der Schweißstromquelle ist sehr zeitintensiv, da hierzu eine Reihe von Versuchen mit aufwendiger Vorbereitung erforderlich ist (siehe 6.1.3). Die jeweiligen Parameterwerte der Schweißprogramme lassen sich abspeichern und mit einem internen Drucker ausdrucken. Ein solcher Ausdruck der Schweißparameter befindet sich im Anhang C.

#### 6.1.2 Gewählte Schutzgase

Insgesamt werden drei verschiedene Schutzgase mit einer Zusammensetzung gemäß Tabelle 6.1 unter Berücksichtigung der DIN EN 14175 ausgewählt und bei der Versuchsdurchführung eingesetzt:

Tabelle 6.1: Gewählte Schutzgaszusammensetzung

<b>Schutzgas 1</b>	Argonanteil	100 %
	Heliumanteil	0 %
<b>Schutzgas 2</b>	Argonanteil	50 %
	Heliumanteil	50 %
<b>Schutzgas 3</b>	Argonanteil	30 %
	Heliumanteil	70 %

Die entsprechenden Datenblätter der Schutzgase befinden sich im Anhang D.

#### 6.1.3 Schweißen von Blindraupen

Bei Kupfer-Nickel handelt es sich um einen vergleichsweise teuren Werkstoff. Durch die Vorversuche wird deutlich, dass bereits kleinste Änderungen der Parametereinstellungen (insbesondere beim Strom) Einfluss darauf nehmen, wie groß der Einbrand der Schweißnaht ist. Daher kann es passieren,

dass bei gleichen Stromstärken die Schweißnaht am Übergang zwischen den einzelnen Sektoren teilweise nicht bis zum Inneren des Rohres ausgebildet wird oder es partiell sogar zu einem Durchbrand des Rohres kommt. Es werden deshalb zunächst „Blindraupen“ ohne Stoß geschweißt (Schweißnaht auf der Außenseite des Rohres), ohne dabei zwei Rohrstücke miteinander zu verbinden.

Die Optimierung der Stromeinstellungen kann hier genauso vorgenommen werden, wie es beim Stumpfschweißen erforderlich ist. Allerdings können die Blindnähte weitaus enger nebeneinander gesetzt werden, so dass nur ein kleiner Teil des Rohres zur Ermittlung der richtigen Schweißparameter verbraucht wird. Neben dem geringen Materialverbrauch besteht ein weiterer Vorteil der Blindraupenschweißungen darin, dass die recht zeitintensive Prüfstück- und Nahtvorbereitung (vgl. Pkt. 6.2.1 u. 6.2.2) beim Blindraupenschweißen auf das Entfernen der Oxidschicht und das Entfetten mit Aceton an der entsprechenden Stelle der Rohraußenseite reduziert werden kann. Das Anfertigen und Heften der Prüfstücke fällt ebenfalls weg. Nur der Wurzelschutz wird beibehalten, so dass der Innendruck einem evtl. Durchhang entgegenwirkt.

Die so ermittelten und festgelegten Parameter können dann ohne Änderungen für das im Anschluss durchgeführte Rohrstumpfschweißen (Pkt. 6.2) übernommen werden. Eine Auflistung dieser Parameter für die drei verschiedenen Schutzgaszusammensetzungen befindet sich in Tabelle 6.2.



Tabelle 6.2: Schweißparameter

	Parameter	Schutzgas 1	Schutzgas 2	Schutzgas 3	Einheiten
	Rohr Ø	108	108	108	mm
	Startposition	0 (9)	0 (9)	0 (9)	° (Uhr)
	Gasvorströmzeit	5	5	5	s
	Gasnachströmzeit	8	8	8	s
	Zündstrom	85	85	85	A
	Endstrom	5	5	5	A
	Badbildezeit	14	14	14	s
	Absenkung	10	10	10	s
	Startverzögerung	13	13	13	s
	Stopperverzögerung	2	2	2	s
	Kaltdrahtrückzug	1	1	1	s
S e k t o r 1	Anfangswinkel	0 (9)	0 (9)	0 (9)	° (Uhr)
	Endwinkel	90 (12)	90 (12)	90 (12)	° (Uhr)
	Zeit	74,84	74,84	74,84	s
	Neigungszeit	0	0	0	s
	Hochpulsstrom	102	90	83	A
	Tiefpulsstrom	55	52,3	52,3	A
	Hochpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Tiefpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Hochpulsgeschw.	68	68	68	mm/ min
	Tiefpulsgeschw.	68	68	68	mm/ min
	Drahtgeschw. Hoch	5	5	5	mm/ min
	Drahtgeschw. Tief	0	0	0	mm/ min
S e k t o r 2	Anfangswinkel	90 (12)	90 (12)	90 (12)	° (Uhr)
	Endwinkel	180 (3)	180 (3)	180 (3)	° (Uhr)
	Zeit	67,86	67,86	67,86	s
	Neigungszeit	2	2	2	s
	Hochpulsstrom	102	92	93	A
	Tiefpulsstrom	55	52,3	52,3	A
	Hochpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Tiefpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Hochpulsgeschw.	75	75	75	mm/ min
	Tiefpulsgeschw.	75	75	75	mm/ min
	Drahtgeschw. Hoch	5	5	5	mm/ min
	Drahtgeschw. Tief	0	0	0	mm/ min
S e k t o r 3	Anfangswinkel	180 (3)	180 (3)	180 (3)	° (Uhr)
	Endwinkel	270 (6)	270 (6)	270 (6)	° (Uhr)
	Zeit	67,86	67,86	67,86	s
	Neigungszeit	2	2	2	s
	Hochpulsstrom	103	97,8	98	A
	Tiefpulsstrom	53	50,3	50,3	A
	Hochpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Tiefpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Hochpulsgeschw.	75	75	75	mm/ min
	Tiefpulsgeschw.	75	75	75	mm/ min
	Drahtgeschw. Hoch	5	4,5	4,5	mm/ min
	Drahtgeschw. Tief	0	0	0	mm/ min
S e k t o r 4	Anfangswinkel	270 (6)	270 (6)	270 (6)	° (Uhr)
	Endwinkel	380 (9)	380 (9)	380 (9)	° (Uhr)
	Zeit	77,75	77,75	77,75	s
	Neigungszeit	2	2	2	s
	Hochpulsstrom	103	97,8	90	A
	Tiefpulsstrom	53	50,3	50,3	A
	Hochpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Tiefpulszeit	0,4	0,4	0,4	s
	Hochpulsgeschw.	80	80	80	mm/ min
	Tiefpulsgeschw.	80	80	80	mm/ min
	Drahtgeschw. Hoch	8,2	7	7	mm/ min
	Drahtgeschw. Tief	0	0	0	mm/ min

### 6.2 Prinzipieller Ablauf beim Rohrstumpfschweißen

Um Unterschiede bzw. Fehler im Schweißergebnis auszuschließen, muss der Versuchsablauf stets nach derselben Vorgehensweise erfolgen. Nur so lässt sich das Schweißergebnis exakt reproduzieren. Es hat sich ebenfalls ergeben, welche Änderungen/ Fehler durch bestimmte Parametervariationen hervorgerufen werden. Im Folgenden wird der Ablauf der Versuche skizziert.

#### 6.2.1 Anfertigen der Prüfstücke

Das Anfertigen der Prüfstücke nach den in 4.3.4 dargestellten Anweisungen für die spätere Prüfung geschieht erst nach dem Schweißvorgang.

Zunächst wird ein ca. 125 mm langes Stück vom Rohr abgeschnitten, damit es dann an derselben Stelle wieder angefügt werden kann. Um den Versatz, der durch eine mögliche Unrundheit des Rohres entstehen kann, zu minimieren, wird das Rohr jeweils vor dem Trennen markiert. Dadurch soll verhindert werden, dass beim Zusammenfügen (Heften) eine Verdrehung gegenüber der ursprünglichen Position zustande kommt. Es ist dementsprechend davon auszugehen, dass es zwischen den Rohrstirnseiten auch zu keinem größeren Versatz durch Unterschiede in Rohrwanddicke und/ oder Innendurchmesser kommt. Das Trennen erfolgt jeweils ohne Schmierung/ Kühlung durch Sägen mit einer Georg-Fischer-Säge.

#### 6.2.2 Nahtvorbereitung

Bei der Vorbereitung der zu fügenden Rohrstücke wird darauf geachtet, dass der durch das Sägen entstandene Grat mit einer Handfeile entfernt wird. Beim Entfernen der Oxidschicht wird ein Gratschleifer mit einem feinen CrNi-Stahl-Bürstenaufsatz benutzt. Die Bearbeitung erfolgt so lange, bis innen und außen ein metallisch blanker Bereich entsteht. Dieser erstreckt sich von den jeweiligen Rohrstirnseiten über einen Abstand von mindestens 30 mm. Ein Beispiel für eine solche Nahtvorbereitung zeigt Abb. 6.1.



Abbildung 6.1: Nahtvorbereitung, eigene Aufnahme

#### 6.2.3 Reinigung der Fügestelle

Die nun metallisch blanke Fügestelle, die durch das Entfernen der Oxidschicht entstanden ist, wird zunächst gründlich mit einem in Aceton getränkten Tuch gereinigt. Auch im weiteren Verlauf der Versuchsdurchführung und unmittelbar vor dem Schweißen wird die Stelle wiederholt mit Aceton gereinigt. So lassen sich Fehler durch erneute Verunreinigungen, die evtl. durch Kontakt mit den Händen (Handschweiß) oder anderen Materialien entstehen, sicher ausschließen.

### 6.2.4 Heften der zu fügenden Rohrstücke

Um sicherzugehen, dass beim Heften die zulässigen Toleranzen der Schweißanlage für Versatz und Fügspalt (Tabelle 4.7) eingehalten werden, liegen die Rohrstücke zur Fixierung auf einem U-Profil. Dadurch ist ein Wegrollen der Stücke nicht möglich und sie lassen sich ohne Verwackeln problemlos exakt aneinander heften. Als Werkstoff für das Profil wird nichtrostender Stahl gewählt und vorher ebenfalls mit Aceton gereinigt.



Abbildung 6.2: Fixierung zum Heften, eigene Aufnahme

Nachdem die Rohrenden stumpf aneinander geschoben und ausgerichtet sind, werden sie mit einer normalen WIG-Schweißanlage per Hand aneinander geheftet. Dies erfolgt unter Ar an acht Stellen in gleichmäßigen Abständen (ca.  $45^\circ$ ) ums Rohr. Im Inneren wird (wie auch beim eigentlichen Schweißvorgang) durch die Verwendung der entsprechenden Formierkammer (Abb. 5.3) mit einem Volumenstrom von 10 l/min und 2,5 Minuten Vorspülzeit unter Ar formiert. Die Werte für die Spülmenge und die Spüldauer resultieren aus früheren betriebsinternen Messungen, die mit Hilfe eines Restsauerstoffmessgerätes festgelegt wurden.

Die nach dem Heften entstandenen Anlauffarben bzw. Verunreinigungen werden mit dem Bürstenaufsatz gründlich entfernt und erneut mit Aceton entfettet, so dass wieder eine metallisch blanke Oberfläche entsteht.

### 6.2.5 Aufbereiten der Wolframelektrode

Die Aufbereitung der 2,4 mm dicken Wolframelektrode wird mit Hilfe einer speziellen Elektrodenanschleifmaschine (vgl. Bild 6.3) vorgenommen. Zuvor wird diese so eingestellt, dass die Spitze nach dem Schleifen einen Winkel von etwa  $23^\circ$  aufweist. Der Anschliff erfolgt dabei, wie in Abb. 4.5 dargestellt, in Längsrichtung. Nach jedem Versuchsdurchlauf wird die Elektrode kontrolliert und je nach Zustand neu aufbereitet oder durch eine neue Elektrode ersetzt.

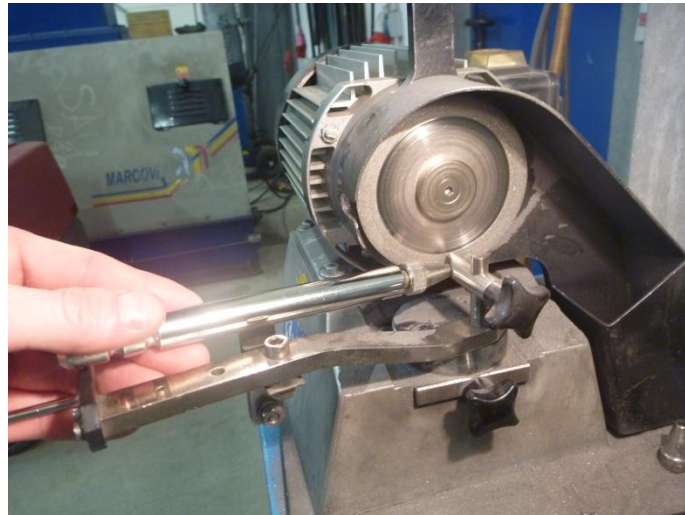


Abbildung 6.3: Elektrodenanschleifmaschine, eigene Aufnahme

### 6.2.6 Anbringung des Schweißkopfes und Anordnung der einzelnen Komponenten

Die zuvor gehefteten Rohrstücke werden für die weitere Bearbeitung vorsichtig, ohne das Rohr zu verformen, mit dem längeren Rohrstück in einen Schraubstock mit weichen Backen gespannt. Zusätzlich wird ein frisches Tuch zwischen Rohr und Backen gelegt, um das Rohr so vor Kratzern und Schmutz zu schützen.

Nachdem das Rohr waagrecht ausgerichtet ist, wird der Schweißkopf mit der Elektrode über die Fügestelle gesetzt und mittels der Stellschrauben an den drei Spannbacken gleichmäßig unter leichter Vorspannung ausgerichtet. Anschließend wird der Schweißkopf mit einem Schnellspannhebel fixiert. Die Kontrolle des gleichbleibenden Brennerabstandes zum Rohr und des Umlaufversatzes zur Stoßstelle, der möglichst Null sein muss, um eine gleichmäßige Naht zu erzeugen, wird durch manuelles Drehen des Brenners per Hand um eine Umdrehung durchgeführt. Ein Nachspannen des Spannhebels wird vorgenommen, um ein Verrutschen der Apparatur unmöglich zu machen. Im Anschluss erfolgt die Feinjustierung des Brenners und der Wolframelektrode. Dazu werden die Vorgaben aus der Bedienungsanleitung [1]; [24] berücksichtigt. Als Elektrodenüberstand aus der Brennerdüse werden 5 mm und als Abstand der Elektrode zum Rohr 1,5 mm gewählt. Die Messung des Abstands der Elektrode zum Rohr erfolgt dabei mit zwei „Spionen“ (0,5 und 1mm Stärke) und wird mit einer Stellschraube für die Brennerhöhe entsprechend korrigiert. Die restlichen Positionierungen wie die Ausrichtung des Brenners exakt über der Stoßstelle und die Ausrichtung der Drahtzufuhreinheit ließen sich ebenfalls über entsprechende Stellschrauben vornehmen. So wird das Drahtende mit leichter Vorspannung und unter einem Winkel zur Elektrode von rund  $20^\circ$ , wie in der Bedienungsanleitung [24] beschrieben, eingestellt. Zur optimalen Anordnung läßt sich die Drahtspitze über die Schweißanlage positionieren, so dass das Drahtende kurz vor der Elektrode (ca. 5 mm) aus dem Zuführrohr ragt und nach Schweißbeginn direkt ins Schmelzbad geführt wird. Zuvor muss der Brenner jedoch im „Leerlauf“ auf

seine Startposition (9 Uhr) gebracht und mit einem kleinen Hebel mit der Antriebsgetriebeeinheit verbunden werden.

### 6.2.7 Starten des Schweißvorganges

Vor Beginn des Schweißvorganges muss auch hier wie beim Heften mit 10 l/min und 2,5 min Spülzeit formiert werden. Der eigentliche Start der Schweißanlage wird per Knopfdruck ausgelöst. Kurz danach zündet der Lichtbogen unter dem vorströmenden Schutzgas. Nach einer im Vorfeld eingestellten Badbildezeit umfährt der Brenner das Rohr mit konstanter Geschwindigkeit. Dabei startet er bei der 9 Uhr Position und passiert danach die 12, 3 und 6 Uhr Position. Nach einer vollständigen Umrundung fährt der Brenner 20 ° über seine Startposition (9 Uhr) hinaus, um eine gewisse Überlappung zu erzeugen. Der Strom wird dabei bis zum Ausschalten mit konstanter Rate auf Null reduziert und der Vorgang nach der Gasnachströmzeit beendet. Parallel dazu zeigt die Schweißanlage die genauen Prozessparameter auf dem Display an. Der prinzipielle Ablauf wird in den nachfolgenden Diagrammen noch einmal veranschaulicht.

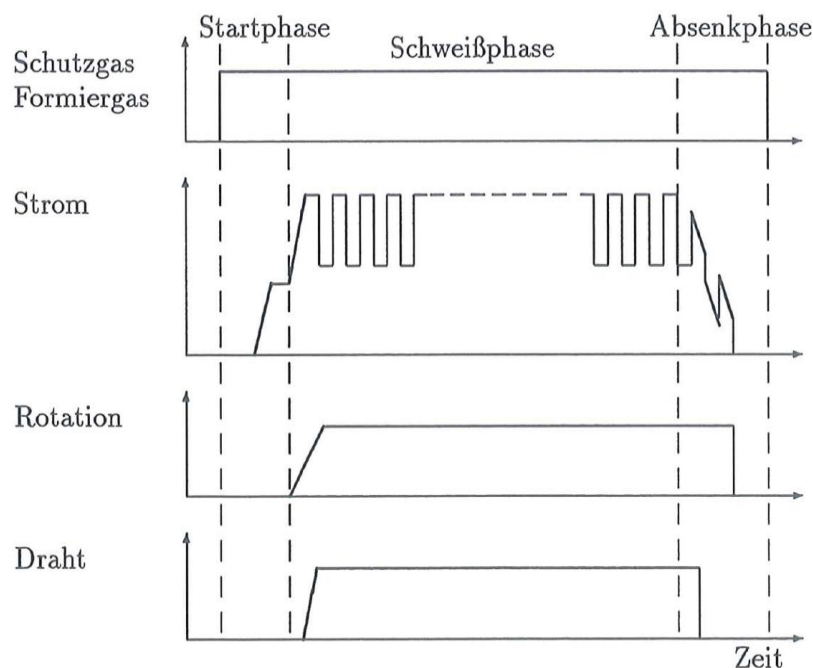


Abbildung 6.4: Prinzipieller Prozessablauf [22]

### 6.2.8 Temperaturmessung

Um die Unterschiede hinsichtlich der Wärmeeinbringung dokumentieren zu können, die auf Grund verschiedener Schutzgase trotz gleicher Parametereinstellungen entstehen, werden Temperaturmessungen in der Wärmeeinflusszone vorgenommen. Daher wird auf einer Kreisbahn im Abstand von 10 mm von der Fügestelle auf der kürzeren Rohrstückseite alle 45 ° auf Höhe des Brenners während des Schweißprozesses, eine Messung vorgenommen. Dabei wird die Temperatur mit einem digitalen Thermometer (NiCr-Ni) in °C gemessen und festgehalten.

Zusätzlich wird noch die Raumtemperatur  $T_{\text{Raum}}$  und die Temperatur des Rohres  $T_{\text{Rohr}}$  kurz vor dem Schweißen festgehalten.

### 6.2.9 Wechsel der Schutzgase

Beim Wechsel der Schutzgase muss darauf geachtet werden, dass jeweils vor dem ersten Schweißprozess mit dem neuen Gas die Schläuche zuvor ausreichend lange mit diesem durchgespült werden. So erfolgt eine Verdrängung des zuvor eingesetzten Gases aus den Schläuchen. Damit ist auszuschließen, dass sich evtl. Reste des alten Gases auf das Schweißergebnis auswirken.

### 6.2.10 Bewertung/ Untersuchung der Schweißnähte

Nach dem Entfernen kleiner Reste von Verunreinigungen und den Anlauffarben mit Hilfe einer Handdrahtbürste aus nichtrostendem CrNi-Stahl, können die Schweißnähte den in 4.3.3 beschriebenen Prüfverfahren unterzogen werden. Als Erstes werden die zerstörungsfreien Prüfungen durchgeführt. Die Sichtprüfung sowie die Farbeindringprüfung lassen sich dabei eigenständig durchführen und betriebsintern mit Hilfe des entsprechenden Fachpersonals bewerten. Die Durchstrahlungsprüfung führt eine externe Fachkraft durch.

Im Vorfeld wird der Auftrag erteilt, die Prüfstücke explizit auf Poren zu untersuchen. Nach Abschluss der zerstörungsfreien Prüfungen können die zerstörenden Makroschliffe angefertigt werden.

## 7 Versuchsauswertung

### 7.1 Auswertung der Prüfverfahren

#### 7.1.1 Sichtprüfung

Bei Betrachtung der Schweißnähte fällt auf, dass diese sich hinsichtlich ihrer Geometrie unterscheiden. Die Pfeile in Abbildung 7.1 bis 7.3 deuten dabei auf die Schweißnahtüberhöhung hin.

Bei der auf dem folgenden Bild dargestellten Schweißnaht handelt es sich um jene, die mit 100 % Ar (Schutzgas 1) geschweißt wurde. Sie ist schmaler als die mit anteilig He geschweißten Nähte und hat eine größere Nahtüberhöhung.

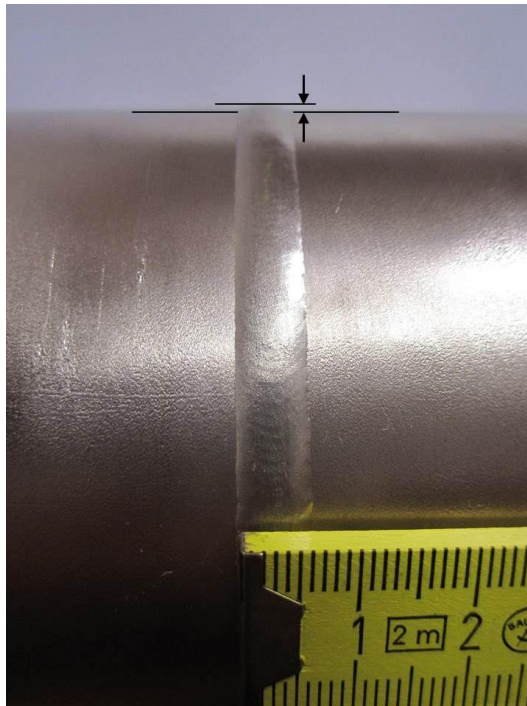


Abbildung 7.1: Schutzgas 1 (0 % He)

Mit dem zunehmenden Anteil des He im Schutzgas wird die Naht breiter und die Überhöhung kleiner. Demnach ist die Naht bei dem Schutzgas mit dem größten He-Anteil (Schutzgas 3) am breitesten.

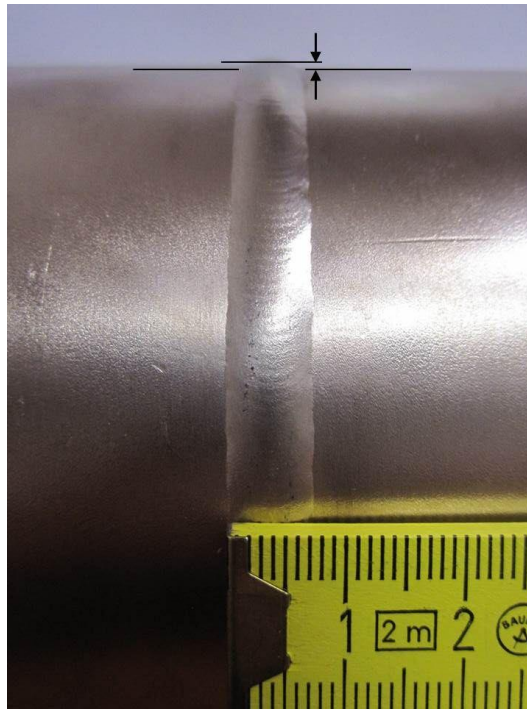


Abbildung 7.2: Schutzgas 2 (50 % He)

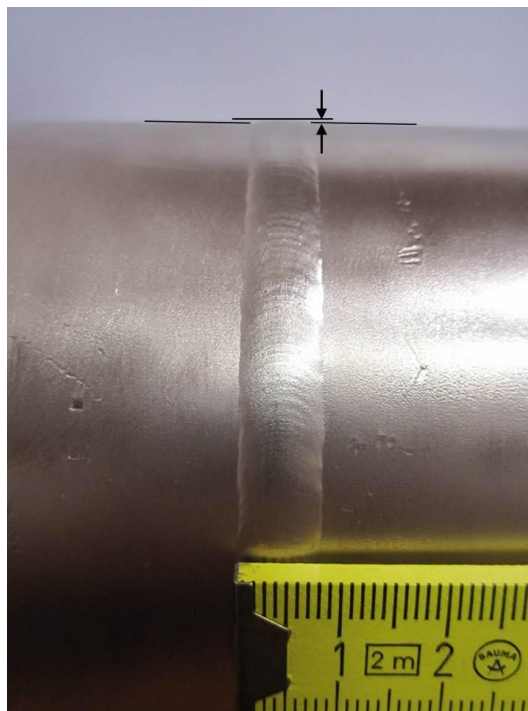


Abbildung 7.3: Schutzgas 3 (70 % He)

Risse oder Poren in der Schweißnaht lassen sich durch die Sichtprüfung mit bloßem Auge in keinem Fall erkennen. Lediglich die oben genannten Unterschiede in der Schweißnahtgeometrie sind hier festzustellen.



### 7.1.2 Farbeindringprüfung

Da durch die Sichtprüfung keine Aussage bezüglich der Poren-/ Rissbildung an der Nahtoberfläche getroffen werden kann, wird anschließend eine Farbeindringprüfung durchgeführt. Die folgenden Bilder zeigen Teilabschnitte der jeweiligen Schweißnähte, die mit den verschiedenen Gasen geschweißt wurden. Die Pfeile zeigen Stellen, an denen die offenen Schweißfehler (Risse, Poren) das rote Eindringmittel aufgenommen haben. Demnach befinden sich überall dort, wo eine rote Färbung zu sehen ist, Oberflächenfehler in der Schweißnaht.

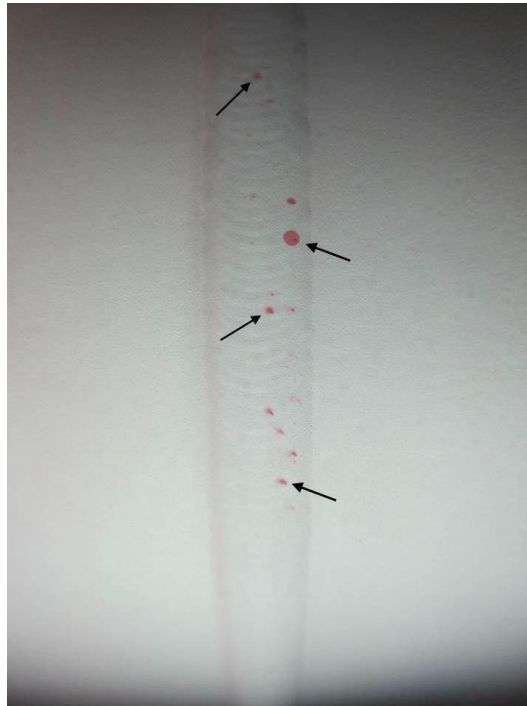


Abbildung 7.4: Farbeindringprüfung Schutzgas 1 (0 % He)

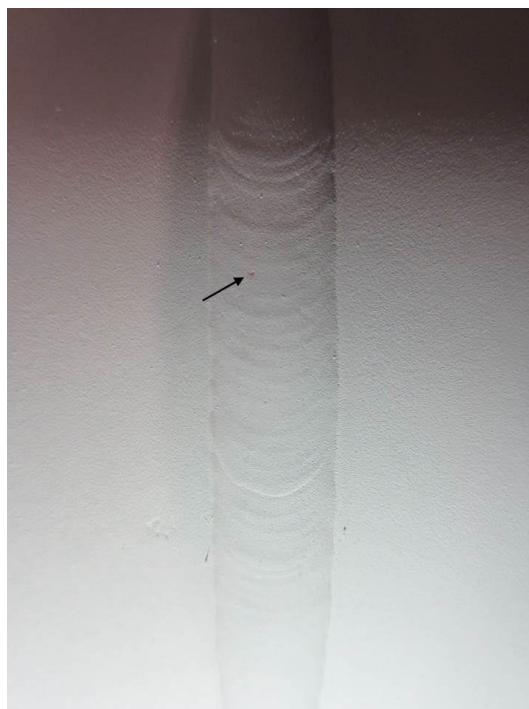


Abbildung 7.5: Farbeindringprüfung Schutzgas 2 (50 % He)



Abbildung 7.6: Farbeindringprüfung Schutzgas 3 (70 % He)

Vergleicht man die drei Bilder (Abb. 7.4 - 7.6), fällt auf, dass bei den mit 100 % Ar bzw. 0 % He geschweißten Nähten (Abb. 7.4) am häufigsten die Bildung von Poren an der Oberfläche auftritt. Die Pfeile markieren einige Stellen an denen Fehler durch das rote Eindringmittel sichtbar gemacht werden (vgl. 4.3.3). Bei der mit 50 % He in Ar geschweißten Naht lassen sich nur vereinzelt kleinere rotgefärbte Stellen erkennen, die auf einen Oberflächenfehler hindeuten. Noch schwieriger wird es bei einem Anteil von 70 % He, solche Färbungen auszumachen.

Es ist eindeutig festzustellen, dass schon durch einen He-Anteil von 50 % im Schweißschutzgas die Fehlerbildung an der Oberfläche der Schweißnaht um ein vielfaches reduziert wird.

### **7.1.3 Durchstrahlungsprüfung**

Die Durchstrahlungsprüfung wird jeweils für die gesamte Schweißnaht (360 °) durchgeführt. Die folgenden drei Abbildungen (7.7 – 7.9) zeigen Ausschnitte der jeweiligen Röntgenaufnahmen, die von den einzelnen Schweißnähten gemacht wurden. Dabei werden die Nähte durch eine helle Färbung angezeigt und Hohlräume/ Poren in dieser als dunkle, punktförmige Flecken. Die Pfeile innerhalb der Abbildungen weisen dabei auf die vorhandenen Poren hin, sofern sich diese auf den digitalisierten Bildern erkennen lassen.

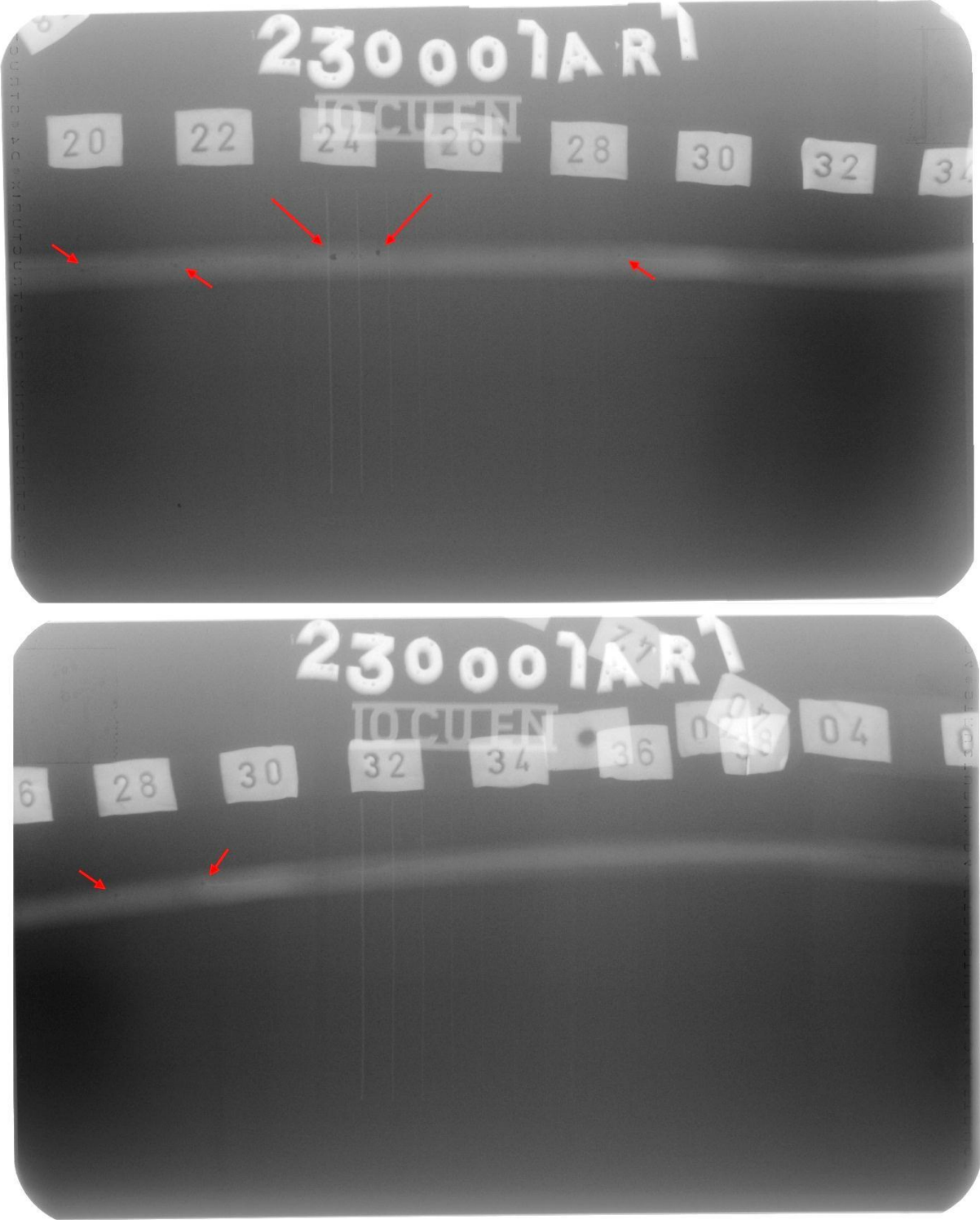


Abbildung 7.7: Röntgenaufnahme Schutzgas 1 (0 % He)

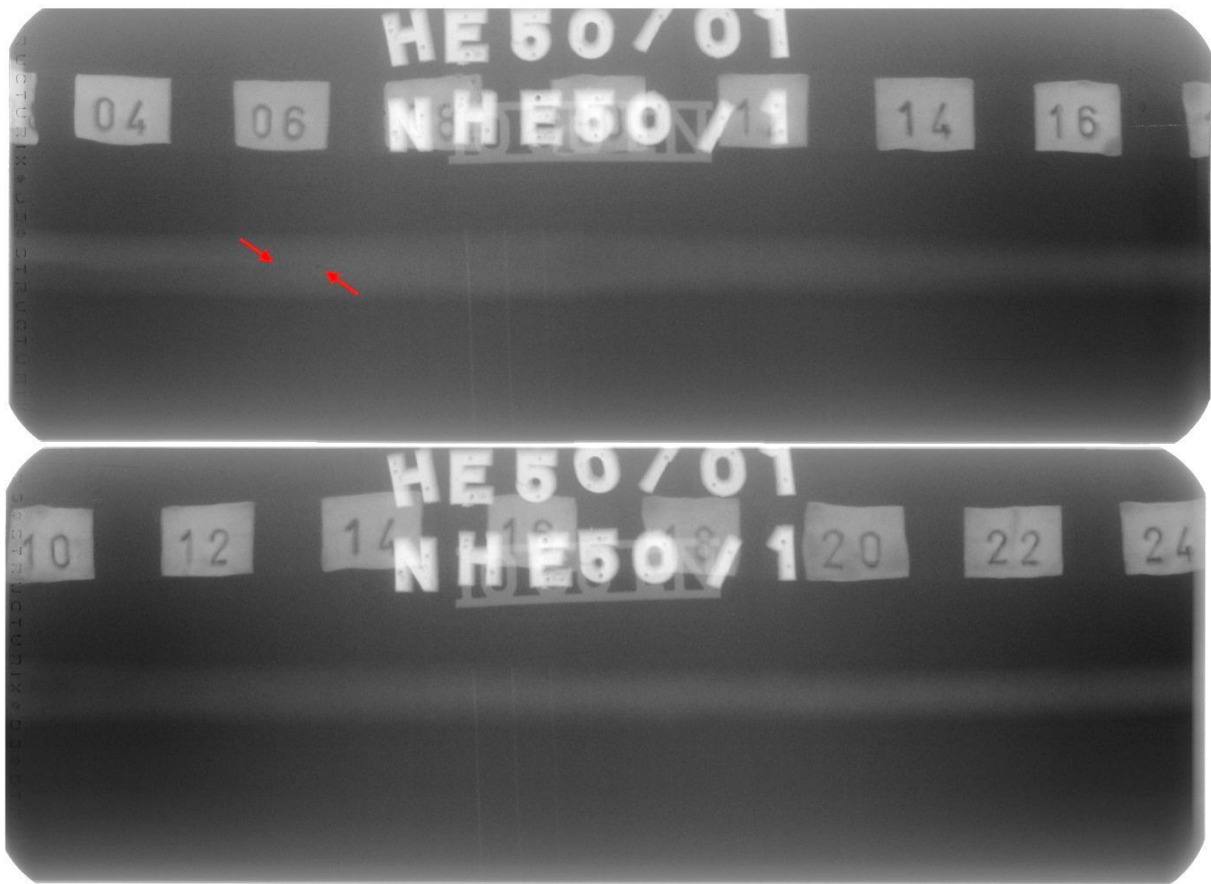


Abbildung 7.8: Röntgenaufnahme Schutzgas 2 (50 % He)



Abbildung 7.9: Röntgenaufnahme Schutzgas 3 (70 % He)

Bei der Auswertung der Röntgenbilder zeigt sich, dass auch hier das Ergebnis hinsichtlich der Porenbildung ähnlich dem der Farbeindringprüfung variiert. Mit zunehmendem He-Anteil wird die Porenanzahl geringer.

Eine vergleichende Zählung der absoluten Porenanzahl, die diese Aussage bestätigt, zeigt die folgende Tabelle.

**Tabelle 7.1: Absolute Porenanzahl**

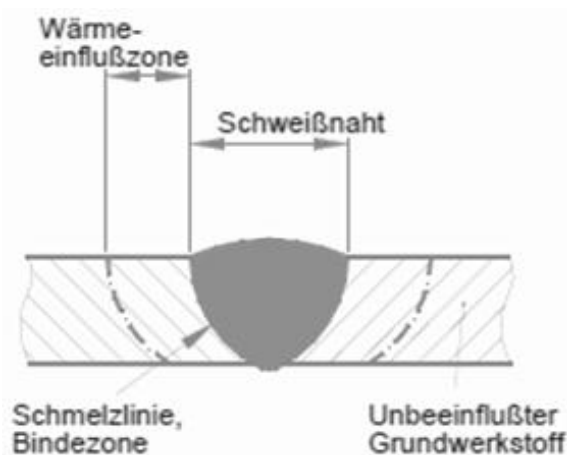
	<b>Schutzgas 1 (0 % He)</b>	<b>Schutzgas 2 (50 % He)</b>	<b>Schutzgas 3 (70 % He)</b>
<b>Absolute Anzahl der Poren pro Schweißnaht (360 °)</b>	34	5	4

Laut Norm (vgl. Tab. 4.5) wäre die Anzahl der Poren bei der hier mit 0 % He geschweißten Naht unzulässig hoch. Anzumerken ist, dass die Größe und die Verteilung der Poren hier ebenfalls eine Rolle spielt. Bei den anderen Nähten wäre die Anzahl unter der zulässigen Porigkeit.

### 7.1.3 Makroschliffe

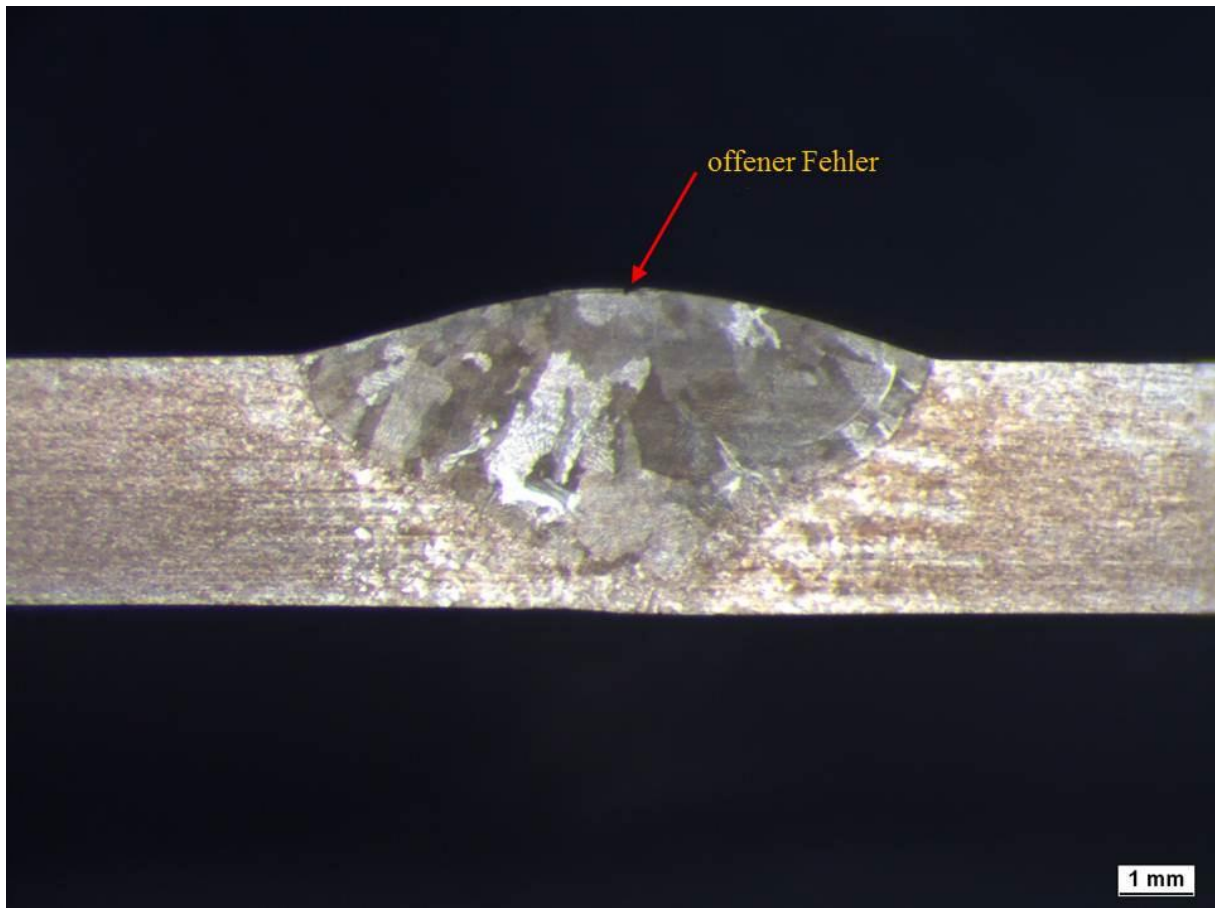
Der sich auf den folgenden drei Abbildungen (7.11 - 7.13) in der Mitte befindliche Bereich des Makroschliffs der jeweiligen Schweißnaht zeigt den Einbrand und die veränderte Gefügestruktur, die durch das Schweißen hervorgerufen wird. Ebenso lassen sich Fehler in Form von Hohlräumen im Inneren erkennen.

Die schematische Darstellung in Abbildung 7.10 veranschaulicht, wie sich die verschiedenen Bereiche der Naht bei einer optimalen Schmelzschweißverbindung von Kupfer aufteilen.



**Abbildung 7.10: Schematischer Aufbau einer Schweißverbindung [4]**

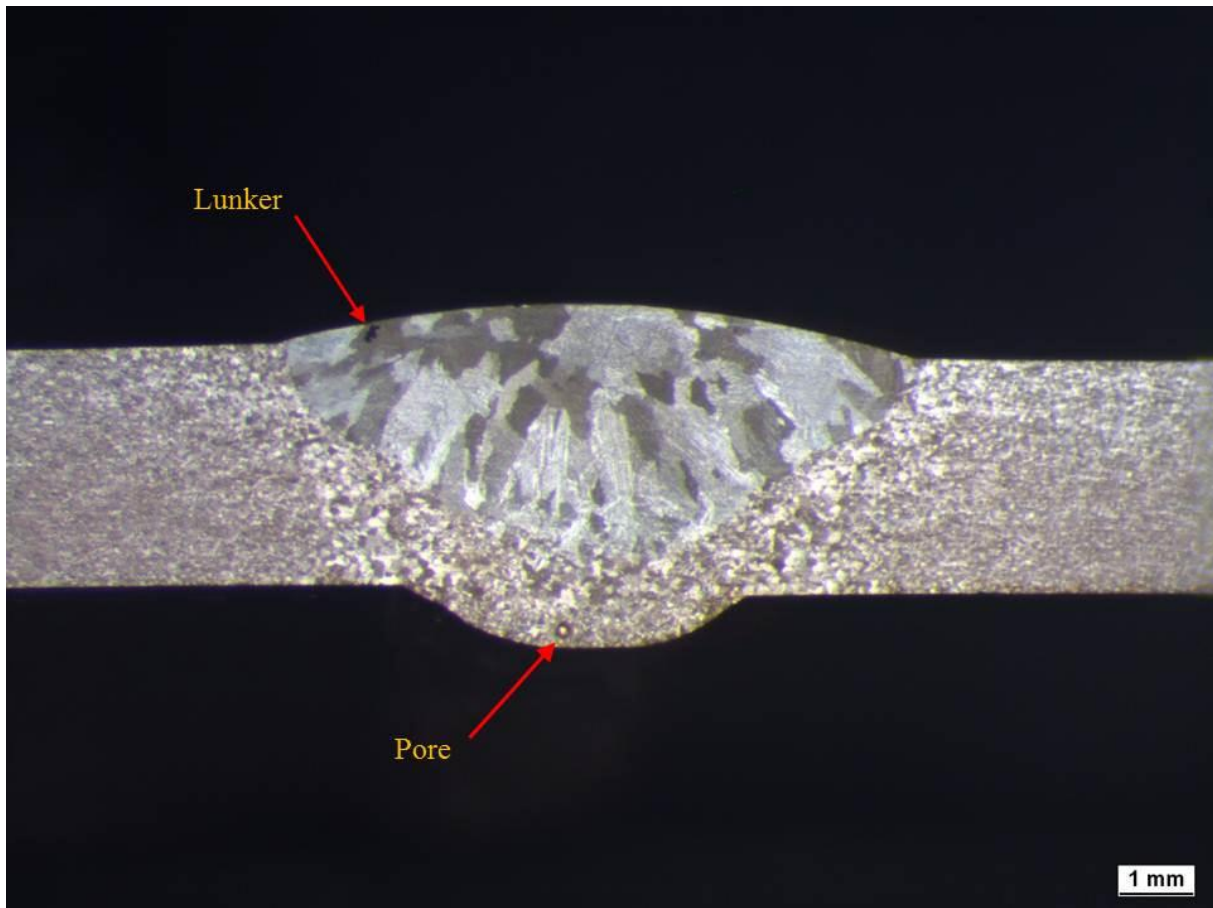
Das Gefüge des unbeeinflussten Grundwerkstoffs, welches außerhalb der Wärmeinflusszone (WEZ) liegt, ist dabei feinkörnig geblieben. In der WEZ wird das Gefüge jedoch typischerweise grobkörniger. In der eigentlichen Schweißnaht befindet sich ein grobkörniges/ gussartiges Gefüge.



**Abbildung 7.11: Makroschliff Schutzgas 1 (0 % He)**

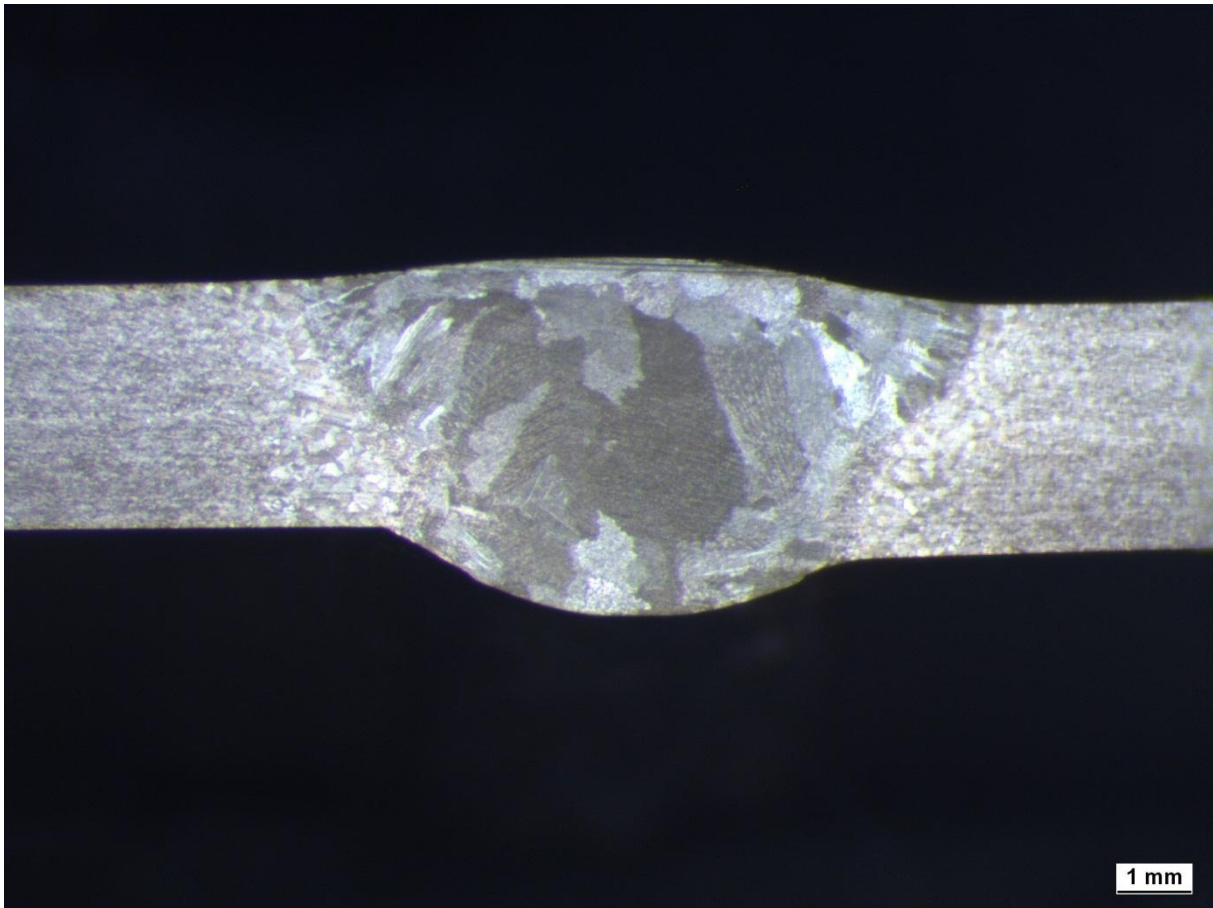
Der Schliff der mit 100 % Argon geschweißten Naht (Abb. 7.11) zeigt einen nur geringen Einbrand und keinen Durchhang der Wurzel. Die Abgrenzung zur WEZ und der in ihr stattgefundenen Kornvergrößerung lässt sich dennoch auch im unteren Bereich gut erkennen. Ein offener Fehler an der Nahtoberseite ist deutlich sichtbar.





**Abbildung 7.12: Makroschliff Schutzgas 2 (50 % He)**

Die mit 50 % He geschweißte Naht (Abb. 7.12) hat einen minimal tieferen Einbrand und einen gut erkennbaren Wurzeldurchhang. Andererseits ist die Nahtüberhöhung flacher und die WEZ im oberen Bereich etwas größer, d.h. der Bereich, in dem die Kornvergrößerung stattgefunden hat, ist breiter. Im unteren Bereich ist eine kleine Pore (ca. 0,2 mm) zu erkennen, die beim Schleifen offengelegt wurde. Ein weiterer Fehler in Form eines Lunkers ist auf der Abbildung oben links zu erkennen.



**Abbildung 7.13: Makroschliff Schutzgas 3 (70 % He)**

Bei der Naht, die mit dem größten He-Anteil erzeugt wurde (Abb. 7.13), ist der Einbrand am größten. Der Wurzeldurchhang ist ebenfalls recht groß und die Nahtüberhöhung entsprechend gering. Die Kornvergrößerung in der WEZ ist noch größer als bei einem He-Anteil von 50 %.

Trotz der immer niedrigeren Stromstärke, die mit steigendem He-Anteil eingestellt werden musste um ein Durchbrennen zu verhindern, ist der Einbrand tiefer und voluminöser als bei Nähten, die mit reinem Ar geschweißt wurden.

Da mit einem Schliff hier nur ein sehr kleiner Bereich der Naht untersucht wird, ist dies keine Methode um eine Aussage über die Porigkeit der Naht zu treffen. Poren können hier nur mehr oder weniger zufällig oder durch gezieltes Suchen anhand von Röntgenaufnahmen mit genauer Positionsbeschreibung gefunden werden.

## **7.2 Einflussfaktoren auf das Schweißergebnis**

### **7.2.1 Nahtvorbereitung/ Reinigung der Fügestelle**

Da die Nahtvorbereitung beim Verarbeiten von Kupferwerkstoffen einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Schweißnahtqualität bzw. auf die Porenbildung hat, ist es umso wichtiger, dass diese wie in 6.2.2 beschrieben vor jedem Schweißvorgang gleich ausgeführt wird. So kann der Einflussfaktor der Nahtvorbereitung auf ein Minimum reduziert werden ohne ihn dabei komplett auszuschließen.

### **7.2.2 Parameter (Strom, Geschwindigkeit)**

Bei der Festlegung bzw. dem Einstellen der verschiedenen Schweißparameter kommt es auf Grund der unterschiedlichen Gasgemische zu Differenzen im Schweißstrom (vgl. Tab. 6.2). Durch den höheren Strom wird mehr Energie in das Schmelzbad eingebracht. Es kommt nicht nur zu einer höheren Wärmeentwicklung, sondern auch zu höheren Abbrandverlusten der Legierungselemente. So wird die Güte der Schweißverbindung gemindert.

Der Effekt der Geschwindigkeitsveränderung ist ähnlich dem des Stroms. Wird die Geschwindigkeit verringert, kommt es durch die längeren Verweilzeiten zu einer verstärkten Wärmeentwicklung im Schmelzbad und dem angrenzenden Werkstoff. Bei einer Erhöhung der Geschwindigkeit ist die Verweilzeit kürzer und die Energie wird zum Aufheizen des größeren überfahrenen Bereichs genutzt.

Hierbei ist zu beachten, dass diese Werte nur den Strom und nicht den Energieinhalt des Gases berücksichtigen.

### **7.2.3 Schutzgas**

Das folgende Diagramm (Abb. 7.14) zeigt die unterschiedlichen Hochpulsstromwerte beim Rohrstumpfschweißen mit den verschiedenen Schutzgasen, die in den einzelnen Sektoren (1 - 4) im jeweiligen Schweißprogramm eingestellt wurden, um ein vernünftiges Schweißergebnis zu erzielen (siehe Tab. 6.2).

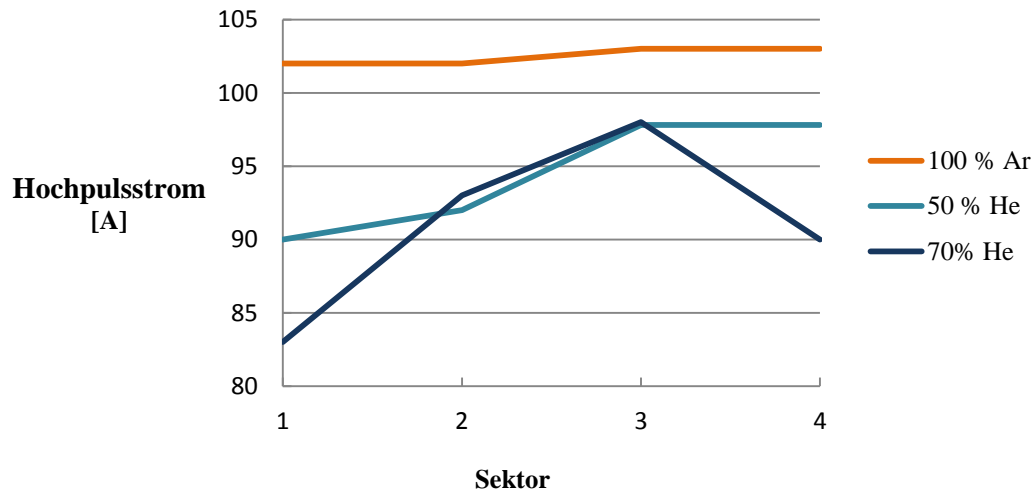


Abbildung 7.14: Auswirkung der Schutzgaszusammensetzung auf den Schweißstrom

Erkennen lässt sich dabei der Trend, dass mit zunehmendem He-Anteil im Schutzgas die Werte für den Strom verringert werden müssen um die höhere Energieeinbringung, die durch das He entsteht, auszugleichen. Bei Ar mit 50 % He müssen die Stromwerte um rund 10 A gegenüber den Werten für reines Ar gesenkt werden, damit der Einbrand in etwa gleich bleibt und sich die Naht gut ausbildet.

Durch die kleineren Stromwerte kommt es in Folge dessen zu geringeren Abbrandverlusten der Legierungselemente. Dies wiederum wirkt sich positiv auf die Nahtqualität aus, da die verbessernden Eigenschaften, die durch bestimmte Elemente hervorgerufen werden, bestehen bleiben.

#### 7.2.4 Temperatur

Bei der Temperaturmessung, die unmittelbar vor dem Starten des Schweißvorganges durchgeführt wurde, konnte eine leichte Erwärmung des Rohres gegenüber der gemessenen Raumtemperatur festgestellt werden.

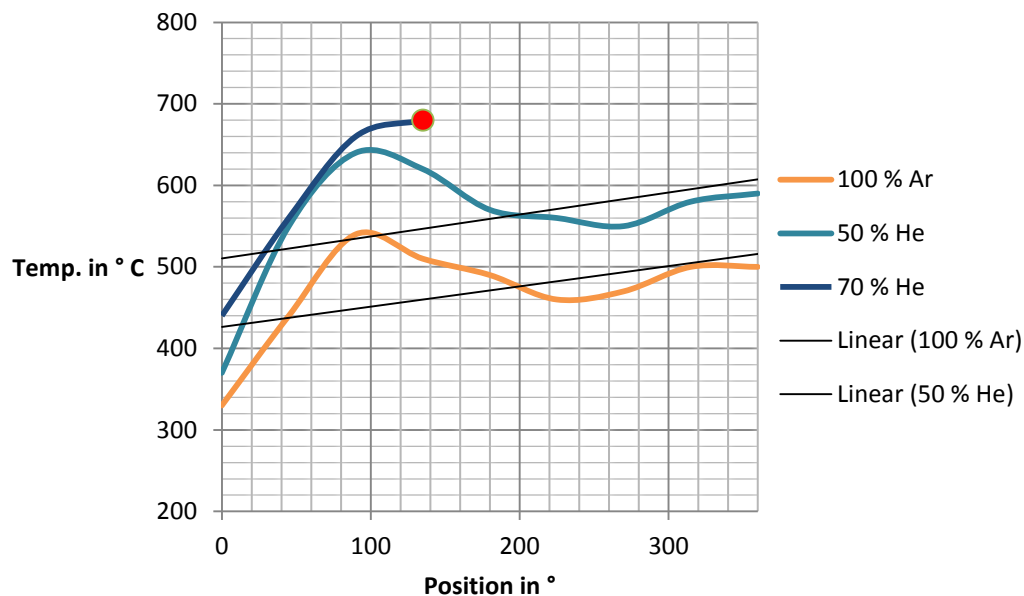
Tabelle 7.2: Raum und Rohrtemperatur

$T_{\text{Raum}}$	18 - 21 ° C
$T_{\text{Rohr}}$	40 - 45 ° C

Die erhöhte Rohrtemperatur, die meist rund 20 - 25 ° C über der Umgebungstemperatur lag (Tab. 7.2), lässt sich durch die mechanische Bearbeitung (Bürsten) während der Nahtvorbereitung erklären. Dabei wird nämlich ein Teil der mechanischen Energie in Wärme umgewandelt, die das Rohr erwärmen lässt. Da diese Temperatur jedoch mit 40 - 45 ° C weit unter der des erzeugten Schmelzbades liegt, kann hier ein Einfluss durch Vorwärmung des Werkstoffes ausgeschlossen werden.

Das folgende Diagramm zeigt zwei komplette Temperaturverläufe, die unmittelbar neben dem Schmelzbad (ca. 10mm) in der Wärmeeinflusszone durch einzelne Messungen ermittelt wurden, um

die Auswirkung des He-Anteils im Schutzgas auf die Temperaturentwicklung vergleichend darzustellen. Trotz gleicher Stromwerte bzw. dem gleichen Schweißprogramm wurde bei den beiden Versuchen mit 100 % Ar (Schutzgas 1) und 50 % Ar mit 50 % He (Schutzgas 2) geschweißt und dabei alle 45 ° die Temperatur gemessen und tabellarisch festgehalten. Bei dem Versuch, dies auch bei einem He-Anteil von 70 % (Schutzgas 3) durchzuführen, kam es auf Grund einer zu hohen Temperaturentwicklung zu einem Durchbrand des Rohres (vgl. Pkt. 7.2.2). Dabei riss der Lichtbogen ab und die Schweißanlage brach den Vorgang automatisch ab. Diese Stelle ist als roter Punkt im Diagramm (Abb. 7.15) markiert.



**Abbildung 7.15: Temperaturvergleichsmessung zwischen den Schutzgasen bei gleichen Stromwerten**

Durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des He kommt es mit größer werdendem He-Anteil im Schutzgas automatisch zu einem höheren Wärmeeintrag im Schmelzbad. Dadurch entsteht zudem ein größerer Einbrand. Um diesen Effekt zu kompensieren sollten die Stromwerte reduziert und/ oder die Schweißgeschwindigkeiten erhöht werden. Die Temperatur als solches steigt jedoch bei beiden Schutzgasen linear an, da sich der Werkstoff im Laufe des Schweißvorganges immer weiter aufheizt und die eingebrachte Wärme (auf Grund der geringeren Temperaturdifferenz) nicht mehr so schnell wie zu Anfang über das angrenzende Material abtransportiert werden kann.

### 8 Schlussbetrachtung

Ziel der Untersuchungen war, beim WIG-Orbitalschweißen von CuNi10Fe1,6Mn eine höhere Prozesssicherheit im Hinblick auf die Vermeidung von Poren durch richtige Wahl der Schweißparameter und Schutzgase zu bekommen.

Zunächst wurden Grund- und Zusatzwerkstoff charakterisiert und es wurde auf Vorgaben aus Regelwerken hingewiesen, die für die Untersuchung der Porosität von Schweißverbindungen relevant sind. Zudem wurden hier die wichtigsten Prozessparameter und Randbedingungen beschrieben, welche das Schweißergebnis beeinflussen können. Dabei wurde aufgezeigt, was bei den jeweiligen Parametern zu berücksichtigen ist bzw. wie diese einzustellen oder zu wählen sind. Dies sollte als Orientierung für die später tatsächlich gewählten Prozessparameter dienen.

Bei den in Kapitel 6 beschriebenen Schweißversuchen wurde die Vorgehensweise Schritt für Schritt dokumentiert. Nur so lässt sich später genau nachvollziehen, wie die Schweißungen durchgeführt wurden. Vorab wurden die meisten Schweißparameter einschließlich der Zusammensetzung des Schutzgases durch Schweißen einer Vielzahl von Blindraupen eingegrenzt. Insgesamt war dies ein zeitintensiver Vorgang. Die bei den Blindraupen gefundenen optimalen Parameter waren die Startwerte für die eigentlichen Rohrstumpfschweißungen. Sie wurden fortlaufend kontrolliert und gegebenenfalls neu angepasst.

Die Betrachtung der Ergebnisse aus der Farbeindring- und Durchstrahlungsprüfung zeigt deutlich, wie durch die Variation der Schutzgaskomponenten Ar und He die Porenbildung reduziert werden kann. Größere He-Anteile wirken sich vorteilhaft aus. Bei einer Menge von 50 % He im Schutzgas lässt sich bereits von einem fast porenfreiem Ergebnis sprechen. Eine weitere Erhöhung des He-Anteils auf 70 % verbessert das Schweißergebnis nur unmerklich. Festzuhalten ist, dass schon bei 50 % He zusammen mit 50 % Ar im Schutzgas die Vorgaben aus den geltenden Regelwerken zur Prüfung und Abnahme von Schweißverbindungen eingehalten werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Prozesssicherheit beim WIG-Orbitalschweißen von CuNi10Fe1,6Mn unter reinem Ar nicht gegeben ist, da hier die Porenbildung unzulässig hoch ist. Nur unter Zugabe von He lässt sich Prozesssicherheit erreichen. Es ist jedoch nicht nur auf das richtige Schutzgas zu achten, sondern es müssen auch eine Vielzahl weiterer Prozessparameter berücksichtigt werden, um unzulässige Porenbildung zu vermeiden. Von besonderer Wichtigkeit ist hier die Nahtvorbereitung.

Wünschenswert ist das Starten einer weiteren Versuchsreihe, bei der mit He-Anteilen zwischen 0 und 50 % geschweißt wird. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht wäre es von Interesse, die rund viermal so teure He-Komponente im Schutzgas so weit wie möglich zu reduzieren, ohne dabei die Prozesssicher-

heit zu beeinträchtigen. Das Schutzgas sollte so gewählt werden, dass sich statistisch abgesichert nicht mehr Poren als zulässig bilden. Erstrebenswert ist ebenfalls, diese Untersuchungen mit Hilfe einer moderneren Orbitalschweißanlage durchzuführen, die mit Hilfe einer eingebauten Schmelzbadüberwachung arbeitet und so Stromstärke und andere Prozessparameter während des Schweißprozesses regulieren kann. So könnte hier das Schweißen einer Vielzahl von Blindraupen zur empirischen Ermittlung der einzelnen Parameter überflüssig werden und ein schnelleres und materialsparenderes Arbeiten wäre möglich.

## Literatur

- [1] N.N.: „**Orbitalschweißanlage Orbimat 250 C**“, Orbimatic GmbH. Bedienungsanleitung. Buseck (Germany).
- [2] N.N.: „**Das Handbuch des Orbitalschweißens**“, Polysoude. Broschüre. Nantes (Frankreich), 2009.
- [3] Schulze, Günter: „**Die Metallurgie des Schweißens**“, 3. Auflage. Berlin, Springer Verlag, 1991.
- [4] Mayer, Grid: „**Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen**“, Deutsches Kupferinstitut Auskunfts- und Beratungsstelle für die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen, Informationsdruck i. 12. Düsseldorf, 2009.
- [5] Anik, Salâhaddin; Dorn, Lutz: „**Metallphysikalische Vorgänge beim Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen – Werkstoffliche Grundlagen**“, Zeitschrift: Schweißen und Schneiden Nr. 12, Jg. 39 (ISSN 00367192), Berlin, Verl. Technik, 1989.
- [6] Schulze, Günther: „**Die Metallurgie des Schweißens Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe**“, Heidelberg, Springer - Verlag, 2010.
- [7] R. Hojda: „**Nachhaltigkeit bei der Werkstoffentwicklung und Werkstoffherstellung**“, Metall, 10/ 2008.
- [8] N.N.: „**Fügetechnik Schweißtechnik**“, 5. Auflage. Düsseldorf, DVS Verlag, 1995.
- [9] N.N.: „**Praxis schlägt Lehrbuch. WIG schweißt Kupfer ohne Vorwärmung**“, Zeitschrift: Weld + Vision – Magazin für Schweißtechnik Nr. 17, 2007.
- [10] N.N.: „**DIN EN 439: 05/1995, Schweißzusätze - Schutzgase zum Lichtbogenschweißen und Schneiden**“, Deutsches Institut für Normen e. V., Informationsblatt. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1995.
- [11] Thomas Ammann: „**Schutzgasschweißen und Formieren von hochlegierten Werkstoffen**“, Linde Gas, Unterschleißheim. ERL Fachtagung, 3. März 2004.
- [12] N.N.: „**Schweißen verbindet, Schweiß-, Schneid- und Schutzgase**“, PanGas (Unternehmen der Linde-Gruppe), veröffentlicht als pdf-Datei im Internet (<http://www.sz-schweisstechnik.de/fachwissen/SchweissenVerbindet.pdf>) [gesehen: 14.12.2011].
- [13] N.N.: „**DIN 85004-4: 2002, Rohrleitungen aus Kupfer-Nickel-Legierungen Teil 4: Tech**



- nische Lieferbedingungen für Rohre**“, Deutsches Institut für Normen e. V., Informationsblatt. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [14] N.N.: **„UTP Schweißzusätze**“, UTP Schweissmaterial, Zweigniederlassung der Böhler Schweissttechnik Deutschland GmbH, Produktheft/ Buch. Bad Krozingen.
- [15] N.N.: **„DIN 85004-2: 2006, Rohrleitungen aus Kupfer-Nickel-Legierungen Teil 2: Grundlagen für Konstruktion und Fertigung, Prüfung**“, Deutsches Institut für Normen e. V., Informationsblatt. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2006.
- [16] N.N.: **„Richtlinie DVS 0912 Teil 2: Metall-Schutzgasschweißen von Stahl, Richtlinie zur Vermeidung von Poren**“, Deutscher Verband für Schweißtechnik e. V. Düsseldorf, DVS Verlag, Feb 1991.
- [17] N.N.: **„DIN EN 287-1: 2004 + A2: 2006 (D), Prüfung von Schweißern - Schmelzschweißen - Teil 1: Stähle**“, Deutsches Institut für Normen e. V., Informationsblatt. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 2004 + 2006.
- [18] N.N.: **„DIN EN 970: 1997, Zerstörungsfreie Prüfung von Schmelzschweißnähten – Sichtprüfung**“, Deutsches Institut für Normen e. V., Informationsblatt. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [19] N.N.: **„DIN EN 571-1: 1997, Zerstörungsfreie Prüfung – Farbeindringprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen**“, Deutsches Institut für Normen e. V., Informationsblatt. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [20] N.N.: **„Durchstrahlungsprüfung**“, SLV München: <http://www.slv-muenchen.de/index.php?id=2254> , [gesehen: 19.12.2011].
- [21] N.N.: **„DIN EN 1435, Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen - Durchstrahlungsprüfung von Schmelzschweißverbindungen**“, Deutsches Institut für Normen e. V., Informationsblatt. Berlin, Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [22] Christian Lorenz: **„WIG-Orbitalschweißen von Rohr/ Rohrverbindungen aus Aluminiumwerkstoffen**“, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und SLV München GmbH, Dissertation, 6. November 1996.
- [23] N.N.: **„Die richtige Wahl für Formierarbeiten**“, Messer Group GmbH, veröffentlicht als pdf-Datei im Internet ([http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Schweissen\\_und\\_Schneiden/Formieren.pdf](http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Schweissen_und_Schneiden/Formieren.pdf)) [gesehen: 18.12.2011].
- [24] N.N.: **„Orbitalschweißzangen**“, Orbimatic GmbH. Bedienungsanleitung. Buseck (Germany).

## **Anhang**

Anhang A: Abnahmeprüfzeugnis 3.1

Anhang B: TÜV Versuchsprotokoll

Anhang C: Beispiel eines Parameterausdruckes der Schweißanlage

Anhang D: Datenblätter der eingesetzten Schutzgase

**Abnahmeprüfzeugnis 3.1 / Inspection certification**  
**EN 10204**

Manfred J.C. Niemann Zentrale KG

Zertifikatsnr./Certificate No.: 515658

Auf dem Dreieck 6  
DE-28197 Bremen  
Deutschland

Auftragsnr./Order No.: 112410

Kundenbestellnr./Your Order No.: 45323035-21807

Prüfgegenstand/Description:Pos./item: 00001 Art.Nr./article no.: RORN10116800  
Menge/quantity: 822,00 KG  
Werkstoff/material: CuNi10Fe1,6Mn F30Artikel/article:  
Rohr DIN 86019  
RA 108x3,2 EUCARO10Mechanische Eigenschaften/mechanical properties

Menge quantity	Charge batch	Probe test no.	Zugfestigkeit tensile strength Rm N/mm <sup>2</sup>	Dehngrenze yield strength Rp0,2 N/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung elongation A5 (%)	Härte hardness HB10
822,00	7430		360	149	35	78

Wirbelstromprüfung/Eddy current test: OK

Chemische Eigenschaften in %/chemical properties in %


Charge/batch	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
7430	0,0084		0,7321	0,0011	0,0013		10,657
		Mo	Nb	Cu	Fe	Zn	Zr
				86,9564	1,6186	<0,05	0,0001
		Ti					
							Pb
							0,0033

Besichtigung und Ausmessung/inspection and measurement: OK

Kennzeichnung/marking: Werkstoff/Charge/Herstellerzeichen material/batch/manufacturers mark

Datum/date  
25.08.2011Ort/location  
Bremen

Werkssachverständiger/inspector

  
Mark Madarik

Zugelassen nach AD 2009-W0/TRD durch TÜV-Nord e.V. AZ 3537 WL 27640 und durch Germanischer Lloyd WZ 205 HH3



R. 229-1/1



Programm: 108CUM2  
Kommentar: Cunife/M115/Argon 4.6

## Vor- und Nachlauf Parameter:

Rohrdurchmesser : 108 mm  
Startposition : 0 Grad  
Gasvorströmzeit : 5 sec  
Gasnachströmzeit : 8 sec  
Zündstrom : 99.0 A  
Endstrom : 5.0 A  
Badbildezeit : 15.0 sec  
Absenkung : 10.0 sec  
Startverzögerung : 11.0 sec  
Stoppverzögerung : 2.0 sec  
Kaltdrahtrückzug : 2.0 sec

## Sektor: 1

Anfangswinkel : 0 Grad  
Endwinkel : 90 Grad  
Zeit : 84.82 sec  
Neigungszeit : 0.00 sec  
Hochpulsstrom : 120.0 A  
Tiefpulsstrom : 62.5 A  
Hochpulszeit : 0.60 sec  
Tiefpulszeit : 0.60 sec  
Hochpulsgeschw. : 60.00 mm/min  
Tiefpulsgeschw. : 60.00 mm/min  
Drahtgeschw. Hoch: 30.00 mm/min  
Drahtgeschw. Tief: 0.00 mm/min

## Sektor: 2

Anfangswinkel : 90 Grad  
Endwinkel : 180 Grad  
Zeit : 84.82 sec  
Neigungszeit : 2.00 sec  
Hochpulsstrom : 126.0 A  
Tiefpulsstrom : 66.0 A  
Hochpulszeit : 0.60 sec  
Tiefpulszeit : 0.60 sec  
Hochpulsgeschw. : 60.00 mm/min  
Tiefpulsgeschw. : 60.00 mm/min  
Drahtgeschw. Hoch: 28.00 mm/min  
Drahtgeschw. Tief: 0.00 mm/min

## Sektor: 3

Anfangswinkel : 180 Grad  
Endwinkel : 270 Grad  
Zeit : 78.30 sec  
Neigungszeit : 2.00 sec  
Hochpulsstrom : 122.0 A  
Tiefpulsstrom : 60.0 A  
Hochpulszeit : 0.60 sec  
Tiefpulszeit : 0.60 sec  
Hochpulsgeschw. : 65.00 mm/min  
Tiefpulsgeschw. : 65.00 mm/min  
Drahtgeschw. Hoch: 40.00 mm/min  
Drahtgeschw. Tief: 0.00 mm/min

## Sektor: 4

Anfangswinkel : 270 Grad  
Endwinkel : 360 Grad  
Zeit : 88.86 sec  
Neigungszeit : 2.00 sec  
Hochpulsstrom : 112.0 A  
Tiefpulsstrom : 55.0 A  
Hochpulszeit : 0.60 sec  
Tiefpulszeit : 0.60 sec  
Hochpulsgeschw. : 70.00 mm/min  
Tiefpulsgeschw. : 70.00 mm/min  
Drahtgeschw. Hoch: 40.00 mm/min  
Drahtgeschw. Tief: 0.00 mm/min

## Überwachungsgrenzen:

Parameter	Untergren.		Obergren.	
	Abb.	Al.	Al.	Abb.
Hochstrom	-10	-5	5	10 A
Tiefstrom	-10	-5	5	10 A
Spannung	0	0	15	20 V
Rotor HP	-10	-5	5	10 mm/min
Rotor TP	-10	-5	5	10 mm/min

## Randbedingungen:

Schweißkopftyp: M 115  
Rohrdurchmesser : 108.0 mm  
Startposition : 0 Grad  
Wanddicke : 3.00 mm  
Werkstoff Rohr : CuNi10Fe  
Plattendicke : 0.00 mm  
Werkstoff Platte : 0  
Schweißgas : Argon  
Gasmenge : 10 l  
Fremdgas : Argon  
Fremdgasmenge : 10 l  
Elektrodenart : 98 20  
Elektroden Durchmesser : 2.40 mm  
Anschliffwinkel : 20 Grad  
Elektrodenabstand : 2.5 mm  
Lagereihenanzahl : 1  
Zusatzdraht Durchmesser : 0.8 mm  
Werkstoff Zusatzdraht : 2.0387  
Kommentar: Heften unter FÜRMIERING  
Rohrwelle gebürstet mit Aceton entfettet

→ Datasheet



## Argon 4.6 (Erfüllt die Anforderungen der Norm DIN EN ISO 14175: I1 )

Reinheit, %:  $\geq 99,996$

Nebenbestandteile, ppm:	CO <sub>2</sub>	$\leq 1$
	N <sub>2</sub>	$\leq 10$
	O <sub>2</sub>	$\leq 4$
	H <sub>2</sub> O	$\leq 5$

Angaben sind als ideale Volumenanteile (= Molanteile) zu verstehen

Lieferarten: **Stahlflaschen**

Rauminhalt, [Liter]	Aussen-Ø ca. [mm]	Länge mit Kappe ca. [mm]	Gesamtgewicht mit Füllung ca. [kg]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m <sup>3</sup> ]
10	140	975	20	200	2,1
20	204	965	40	200	4,3
50	229	1655	80	200	10,7
50	229	1700	90	300	15,3

**Flaschenbündel**

Rauminhalt, [Liter]	Maße ca. (Höhe x Länge x Breite)[mm]	Gesamtgewicht mit Füllung ca. [kg]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m <sup>3</sup> ]
600	1900 x 980 x 770	1320	200	128
600	1900 x 980 x 770	1460	300	183,6

Weitere Lieferarten auf Anfrage.

Sicherheit: EG-Sicherheitsdatenblatt, Argon 4.6

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

→ Datasheet



## VARIGON® He 50 (Prozessgas nach DIN EN ISO 14175: I3 - ArHe - 50)

**Zusammensetzung:** Argon (Ar) 50%  
Helium (He) 50%  
Angaben sind als ideale Volumenanteile (= Molanteile) zu verstehen

### Lieferarten: Stahlflaschen

Rauminhalt, [Liter]	Aussen-Ø ca. [mm]	Länge mit Kappe ca. [mm]	Gesamtgewicht mit Füllung ca. [kg]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]
10	140	975	20	200	1,9
50	229	1655	80	200	9,4

### Flaschenbündel

Rauminhalt, [Liter]	Maße ca. (Höhe x Länge x Breite)[mm]	Gesamtgewicht mit Füllung ca. [kg]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]
600	1900 x 980 x 770	1320	200	113

Weitere Lieferarten auf Anfrage.

**Sicherheit:** EG-Sicherheitsdatenblatt, VARIGON® He 50

**Kennzeichnung:** Flaschenschulter: Leuchtendes Grün RAL 6018  
Aufkleber: VARIGON® He 50  
Ventilanschluss: W 21,80 x 1/14 (DIN 477 Nr. 6)

**Anwendungen:** Vielseitiges Schutzgas hauptsächlich für das MIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen, sowie für das WIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen und den meisten anderen Materialien. Sehr gutes Fließverhalten und Porensicherheit durch Heliumzugabe. Auch geeignet als Zentrumsgas beim Plasmaschweißen, zum Lichtbogenbolzenschweißen von Aluminiumwerkstoffen, sowie zum MSG-Löten mit CuAl-Löten.

**Andere Lieferformen:** VARIGON® H 10, VARIGON® H 2, VARIGON® H 5, VARIGON® H 6, VARIGON® H35, VARIGON® He 15, VARIGON® He 15 S, VARIGON® He 30, VARIGON® He 30 S, VARIGON® He 50 S, VARIGON® He 70, VARIGON® He 90, VARIGON® N 2 H 1, VARIGON® N2, VARIGON® N3

[→ Datasheet](#)

## VARIGON® He 70 (Prozessgas nach DIN EN ISO 14175: I3 - ArHe - 70)

**Zusammensetzung:** Argon (Ar) 30%  
Helium (He) 70%  
Angaben sind als ideale Volumenanteile (= Molanteile) zu verstehen

**Lieferarten:** **Stahlflaschen**

Rauminhalt [Liter]	Aussen-Ø ca. [mm]	Länge mit Kappe ca. [mm]	Gesamtgewicht mit Füllung ca. [kg]	Fülldruck, ca. [bar]	Füllmenge, ca. [m³]
50	229	1655	80	200	9,4

Weitere Lieferarten auf Anfrage.

**Sicherheit:** EG-Sicherheitsdatenblatt, VARIGON® He 70

**Kennzeichnung:** Flaschenschulter: Leuchtendes Grün RAL 6018  
Aufkleber: VARIGON® He 70  
Ventilanschluss: W 21,80 x 1/14 (DIN 477 Nr. 6)

**Anwendungen:** Vielseitiges Schutzgas hauptsächlich für das MIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen, sowie für das WIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen und den meisten anderen Materialien. Sehr gutes Fließverhalten und Porensicherheit durch Heliumzugabe. Auch geeignet als Zentrumsgas beim Plasmaschweißen, zum Lichtbogenbolzenschweißen von Aluminiumwerkstoffen, sowie zum MSG-Löten mit CuAl-Löten.

**Andere Lieferformen:** VARIGON® H 10, VARIGON® H 2, VARIGON® H 5, VARIGON® H 6, VARIGON® H35, VARIGON® He 15, VARIGON® He 15 S, VARIGON® He 30, VARIGON® He 30 S, VARIGON® He 50, VARIGON® He 50 S, VARIGON® He 90, VARIGON® N 2 H 1, VARIGON® N2, VARIGON® N3



## **Eidesstattliche Erklärung**

---

### **Eidesstattliche Erklärung**

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben.

Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangabe kenntlich gemacht.

Hamburg, 15.02.2012

Darg Ingber