

Endisch, Christian

Bewertung des Energieverbrauchs beim Schweißen von  
Kupfer

# **Bachelorarbeit**

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Mathematik-Naturwissenschaften-  
Informatik

Mittweida, 2010

Endisch, Christian

Bewertung des Energieverbrauchs beim Schweißen von  
Kupfer

eingereicht als

# **Bachelorarbeit**

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fachbereich Mathematik-Naturwissenschaften-  
Informatik

Chemnitz, 2010

Erstprüfer: Prof. H. Exner / J. Drechsel

Zweitprüfer: Dr. K. Herold / P. Leipe

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 05.01.2011

## **Betriebliches Thema einer Bachelorarbeit**

**für Christian Endisch**

### **Thema:**

Bewertung des Energieverbrauchs beim Schweißen Kupfer

### **Problemstellung:**

Ausgehend von den Ergebnissen des Praktikums Bachelor sollen die Untersuchungen zum Energieverbrauch beim Schweißen von Kupfer vertiefend untersucht werden. Die Machbarkeitsuntersuchungen zeigten, dass insbesondere bei der Herstellung von Aluminium auf Grund der Materialkennwerte eine qualitativ hochwertige Schweißnaht schwierig herzustellen ist. Kupfer lässt sich ähnlich schlecht schweißen. In dieser Arbeit soll der Einfluss von Laserparametern auf die Schweißqualität und den Energieverbrauch nachgewiesen werden. Dabei sollen Abweichungen von optischen Materialeigenschaften berücksichtigt werden.

### **Aufgabenstellung:**

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Schweißen von Kupfer gegliedert nach:

1. Entwicklung eines Untersuchungsdesigns
  - Auswahl von Laserquellen
  - Definition und Auswahl laserspezifischer, energierelevanter und technischer Parameter (Gasverbrauch, Pumpleistung, Kühlleistung, Laserleistung, tatsächliche Wirkleistung an der Bearbeitungsstelle, Strahlqualität, Wirkungsgrad, Gaszufuhr)
  - Entwicklung eines Messkonzeptes
2. Durchführung experimenteller Untersuchungen (Qualität Schweißnaht, Energieverbrauch)
3. Erfassung von Betriebskosten (Anlage, Laser, Kühlung)
4. Auswertung und graphische Darstellung der Ergebnisse

Einzelne Teilaufgaben der Arbeit werden in Abstimmung mit den Betreuern im Verlauf der Arbeit konkretisiert.

Betreuer: Frau Dr. K. Herold, Herr P. Leipe / SITEC Industrietechnologie GmbH  
Herr J. Drechsel / Laserinstitut Mittelsachsen e.V.

## **Bibliographische Beschreibung:**

Endisch, Christian:

Bewertung des Energieverbrauchs beim Schweißen von Kupfer.

Mittweida,

– 2010. -83 S., 34 Abb., 16 Tab., 19 Lit., 3 Anl.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH),

Fachbereich Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik,

Bachelorarbeit, 2010

Referat:

In der vorliegenden Arbeit geht es um das Laserschweißen von Kupfer. Dabei wird besonders auf die Nahtqualität geachtet und der Energieverbrauch registriert. Durch die speziellen Materialeigenschaften gestaltet sich das Schweißen dieses Materials sehr schwierig deshalb ist es auch notwendig durch grundlegende Untersuchungen geeignete Prozessparameter zu finden.

In dieser Arbeit werden die speziellen Eigenschaften von Kupfer hinsichtlich des Laserschweißens erläutert, geeignete Laserparameter abgeleitet und die Schweißnahtqualität bewertet. Wesentlich sind noch die Durchführung von Schweißversuchen, die Bewertung des Energieverbrauchs und die Bewertung der optischen Eigenschaften der Kupferoberfläche. Anschließend werden die Ergebnisse ausgewertet.

## **Inhaltsverzeichnis:**

Abbildungsverzeichnis.....	6
Tabellenverzeichnis / Abkürzungsverzeichnis.....	8
Verwendete Formelzeichen .....	9
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>10</b>
1.1 Problemstellung und Ausgangssituation.....	10
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	10
1.3 Aufbau der Arbeit.....	12
<b>2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik.....</b>	<b>12</b>
2.1 Das Material Kupfer .....	13
2.2 Laserschweißen von dem Material Kupfer.....	16
2.2.1 Auswahl der Laserquellen.....	17
2.2.2 Laserschweißverfahren.....	19
2.2.3 Energetische Betrachtung beim Schweißen von Kupfer.....	21
2.2.4 Schutzgas.....	28
2.3 Qualitätssicherung.....	29
2.4 Einfluss der Energiekosten auf die Stückkosten.....	30
<b>3 Versuchstechnik.....</b>	<b>31</b>
3.1 Vorgehensweise.....	31
3.2 untersuchte Lasergeräte mit ihren Komponenten.....	33
3.3 Probengeometrie, Werkstoffe und Spanntechnik.....	36
3.4 Versuchsdurchführung, Versuchsparameter, Versuchsauswertung.....	38
<b>4 Ergebnisse.....</b>	<b>41</b>
4.1 Optische Eigenschaften der Kupferoberfläche.....	41
4.1.1 Reflexionsmessung.....	44
4.1.2 Absorptionsmessung.....	46
4.1.3 Ergebnisse der Absorptions- und Reflexionsmessung.....	48
4.2 Schweißbarkeit von Kupfer.....	49
4.2.1 Machbarkeitsversuche mit den ausgewählten Lasersystemen....	49
4.2.2 Nahtqualität.....	51
4.2.3 Bauteilgeometrie.....	53
4.3 Energieverbrauch.....	54
4.3.1 Allgemeiner Energieverbrauch/Wirkungsgrade der Lasergeräte.	55
4.3.2 Parametervariation.....	57

4.3.3 Einfluss der Anlauffarben.....	64
4.3.4 Messung des Energieverbrauchs der Kühlung.....	65
<b>5 Zusammenfassung.....</b>	<b>69</b>
<b>6 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>72</b>
<b>7 Anhang.....</b>	<b>75</b>
7.1 Kalkulation der Betriebskosten.....	75
7.2 Strahlvermessung Scheibenlaser HLD4002.....	77
7.3 Messprotokolle der Rauheitsmessung.....	78

### **Abbildungsverzeichnis:**

- Abbildung 1: Temperaturverläufe beim Schweißen von Kupfer und Stahl [MS]
- Abbildung 2: Absorption verschiedener Metalle in Abhängigkeit der Wellenlänge [PWS]
- Abbildung 3: Einordnung der Bearbeitungsart nach Leistungsdichte und Pulslänge [EICHLER]
- Abbildung 4: Typische Pulsform [POPR]
- Abbildung 5: Absorption in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Kupfer mit  $\lambda = 1,065\mu\text{m}$  [BIAS]
- Abbildung 6: Einkoppelgrad in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses (Tiefe/Fokusbereich) der Dampfkapillare
- Abbildung 7: Abhängigkeit des Einkoppelgrades vom Aspektverhältnis für Aluminium und Eisen für eine kegelförmige Kapillare bei der Wellenlänge  $1,06\mu\text{m}$  [DAUS]
- Abbildung 8: Absorptionsgrade von Kupfer bei verschiedenen Wellenlängen In Abhängigkeit vom Einfallswinkel bei Raumtemperatur [DAUS] ( $0^\circ$  entspricht senkrechtem Einfall)
- Abbildung 9: Erforderliche absorbierte Intensität in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer für das Verdampfen im Strahlzentrum bei verschiedenen Materialien und Strahldurchmessern und  $\lambda = 1,06\mu\text{m}$  [HÜGEL]
- Abbildung 10: Schweißnaht mit Schutzgas [SITEC]
- Abbildung 11: Schweißnaht ohne Schutzgas [SITEC]
- Abbildung 12: Zusammensetzung der Teilkosten [WOP]

- Abbildung 13: Spannvorrichtung mit Kupferplatte
- Abbildung 14: Spannvorrichtung mit Kupferblech
- Abbildung 15: Skala der verschiedenen Anlauffarben von Kupfer [KU]
- Abbildung 16: Proben mit Nummerierung
- Abbildung 17: Absorption in Abhängigkeit der Rauigkeit  $R_z$   $\lambda=$ bei 808 nm, geschliffener Oberfläche, senkrechten Einfall und Raumtemperatur [HÜGEL]
- Abbildung 18: Faserlaser im Messaufbau
- Abbildung 19: Prinzipskizze des Messaufbaus der Reflexionsmessung
- Abbildung 20: Ulbrichtkugel im Messaufbau
- Abbildung 21: Schema des Versuchsaufbaus der Absorptionsmessung
- Abbildung 22: Absorptionsgrad der Proben mit 2 verschiedenen Messverfahren
- Abbildung 23: Schweißnaht mit CO<sub>2</sub>-Laser:  $P=3,75\text{kW}$ ,  $f=50\text{Hz}$ ,  $v=150\text{mm/min}$
- Abbildung 24: CW - Schweißnaht
- Abbildung 25: PW - Schweißnaht
- Abbildung 26: Schweißnähte mit Scheibenlaser,  $P=3\text{kW}$ , von links  $v=1, 2, 3, 4, 5\text{ m/min}$ , 5 mm Nahtabstand, 6 mm Materialdicke
- Abbildung 27: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Laserleistung bei den verschiedenen Lasergeräten
- Abbildung 28: Energieverbrauch der Lasergeräte im CW - Betrieb in Abhängigkeit von der Laserleistung
- Abbildung 29 Energieverbrauch der Lasergeräte im PW - Betrieb in Abhängigkeit von der Laserleistung beim Plattenmaterial
- Abbildung 30: Wirkleistungsaufnahme des Kühlers PC05G von RIEDEL bei 300 W mittlerer Laserleistung des Nd:YAG PulsLasers JK701
- Abbildung 31: Verhältnis der Kühlleistung zur el. Leistungsaufnahme des Kühlers in Abhängigkeit der Kühlleistung
- Abbildung 32: Stückkosten in Abhängigkeit der Zeit
- Abbildung 33: Strahlprofil bei 300 W Laserleistung
- Abbildung 34: Strahlprofil bei 1500 W Laserleistung

### **Tabellenverzeichnis:**

- Tabelle 1: physikalische Eigenschaften von reinem Kupfer [KI] [HE]
- Tabelle 2: Optische Parameter der verwendeten CW- Laser
- Tabelle 3: Optische Parameter der verwendeten Puls laser
- Tabelle 4: Laser mit zugehöriger Anlagentechnik
- Tabelle 5: verwendete Kupferwerkstoffe nach DIN 1708 ISO (EN13599)
- Tabelle 6: Rauigkeitsmessung
- Tabelle 7: Werte Scheibenlaser – TRUDISK4002 im CW- Betrieb
- Tabelle 8: Werte Scheibenlaser - TRUDISK4002 mit modulierten Rechteckpulsen
- Tabelle 9: Werte Faserlaser YLR1500 im CW- Betrieb
- Tabelle 10: Werte Faserlaser YLR1500 mit modulierten Rechteckpulsen
- Tabelle 11: Werte gepulster Nd:YAG Laser - JK701 (LUMONICS)
- Tabelle 12: Einfluss der Anlaufzeiten auf die Parameter
- Tabelle 13: Zuordnung der Kühler/Laser
- Tabelle 14: Kühler KKT KRAUS mit 39 kW Kälteleistung in Verbindung mit Scheibenlaser TRUDISK4002
- Tabelle 15: Kühler PC05G von RIEDEL mit 23,5 kW Kälteleistung in Verbindung mit Lampengepumpten Nd:YAG Puls laser JK701
- Tabelle 16: Kostenrechnung der verwendeten Lasergeräte

### **Abkürzungsverzeichnis:**

- CW            continuous wave (kontinuierlicher Betrieb)
- PW            pulsed wave (gepulster Betrieb)
- Nd:YAG       mit Neodym dotierter Ytterbium-Aluminium-Granat-Kristall



### Verwendete Formelzeichen:

A	Absorptionsgrad
F	Vorschub
M	Masse
P	Laserleistung
$P_{av}$	mittlere Laserleistung
$T_h$	Pulsdauer
$T_v$	Verdampfungstemperatur
W	Pulsenergie
a, b	Konstanten
c	spezifische Wärmekapazität
$d_f$	Fokusbildungsdurchmesser
$d_{\text{faser}}$	Faserkerndurchmesser
$d_l$	Durchmesser vor der Linse
f	Brennweite der Linse
$f_{\text{fok}}$	Brennweite der Fokussierlinse
$f_{\text{kol}}$	Brennweite der Kollimatorlinse
$f_p$	Pulsfrequenz
s	Tiefe
t	Zeit
$w_p$	Strahlradius vor der Linse bzw. nach dem Kollimator
$w_o$	Strahlradius
$\eta_A$	Einkoppelgrad
$\lambda$	Wellenlänge
$\lambda_{\text{th}}$	Wärmeleitfähigkeit

# **1 Einleitung**

## **1.1 Ausgangssituation und Problemstellung**

Die Ergebnisse des Praktikums zeigten, dass der Energieverbrauch bei der Materialbearbeitung mittels Laserschweißen nicht ausschließlich vom Wirkungsgrad der Lasergeräte abhängig ist. Die Abweichungen des tatsächlichen Energieverbrauchs vom Wirkungsgradverlauf sind auf laserseitige und materialseitige Einflüsse zurückzuführen. Ausgehend von diesen Ergebnissen soll der Energieverbrauch beim Schweißen von Kupfer vertiefend untersucht werden. Es hat sich gezeigt, dass es schwierig ist bei Aluminium qualitativ hochwertige Nähte herzustellen. Der Grund dafür sind die spezifischen Materialkennwerte. Beim Schweißen von Kupfer treten ähnliche Probleme auf. In dieser Arbeit soll der Einfluss von Laserparametern auf die Schweißnahtqualität und den Energieverbrauch bei Kupfer nachgewiesen werden. Die Auswirkungen von optisch unterschiedlichen Kupferoberflächen, welche durch Wärmebehandlung entstehen, sind ebenfalls zu berücksichtigen.

## **1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Es sind folgende konkretisierte theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Schweißen von Kupfer durchzuführen, die sich aus der gestellten Aufgabe ableiten. Es soll eine Vorgehensweise entwickelt werden, die auf einer zu treffenden Auswahl von geeigneten Laserquellen und laserspezifischen, energierelevanten und technischen Parametern für das Schweißen von Kupfer basiert.

Eines der Hauptanwendungsgebiete von Kupfer ist die Elektrotechnik. Hier wird das Material zum Beispiel durch das Aufbringen einer Zinnschicht (Auflöten) an bestimmten Bauteilbereichen erwärmt. Durch diese Wärmebehandlung des Kupfermaterials bei Produktionsschritten vor dem Laserschweißen entstehen Anlauffarben auf der Kupferoberfläche, die die Absorptionseigenschaften verändern können. Demzufolge sind Möglichkeiten zur Erfassung dieser

veränderten Eigenschaften zu finden und die Auswirkungen auf den Energieverbrauch durch experimentelle Untersuchungen zu dokumentieren.

Das Schweißen von Kupfer gestaltet sich durch die speziellen Materialeigenschaften schwierig. Es ist notwendig durch experimentelle Untersuchungen festzustellen, ob ein Laserschweißen von Kupfer mit den ausgewählten Laserquellen möglich ist. Dabei ist nachzuweisen in welchen Bereichen der ausgewählten Parameter eine Schweißnaht mit einer akzeptablen Qualität zu erreichen ist.

Bei einer Laseranlage gibt es verschiedene Prozesse, die im Betrieb Kosten verursachen und damit Anteil an den gesamten Betriebskosten haben. Die genaue Höhe der Kosten ist aber stark von der konkreten Bearbeitungsaufgabe abhängig. Den Hauptanteil bildet jedoch der Energieverbrauch in Form von elektrischer Leistung und der wird beim Schweißen von Kupfer hauptsächlich vom eingesetzten Lasergerät bestimmt (größter Verbraucher). Für die Bewertung des Energieverbrauchs sollen daher die Stromverbraucher Lasergerät und Kühler in Betracht gezogen werden. Der Verbrauch entsprechend den ausgewählten und experimentell untersuchten Laserquellen und Laserparametern ist dazu aufzunehmen um den Energieverbrauch zu bestimmen. Diese Werte sind zu vergleichen und auszuwerten. Energieverbrauchsangaben für die gesamte Laseranlage werden nicht betrachtet, weil dafür eine konkrete Bearbeitungsaufgabe fehlt.

Für den Vergleich der auszuwählenden Laserquellen, auf die sich die Bewertung des Energieverbrauchs bezieht, ist der technologische Stand als nicht relevant zu betrachten. Veralterte Lasergeräte, die schon in einem Unternehmen vorhanden sein können, werden somit in die Betrachtungen mit einbezogen. Ebenso werden diese in modernisierter Form, aber durchaus mit den alten Modellen vergleichbar, auf dem Markt zu günstigen Preisen noch angeboten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es möglichst genaue Angaben zu dem Energieverbrauch beim Schweißen von Kupfer zu machen.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Ausgehend von der Aufgabenstellung und der Zielsetzung leitet sich das Vorgehen und der Aufbau dieser Arbeit ab. Im 2. Kapitel wird auf den Stand der Technik und die Grundlagen für das Laserschweißen von Kupfer eingegangen. Die Versuchstechnik mit Vorgehensweise, Laserquellen, Werkstoff und Messeinrichtungen und Parameterauswahl für die Untersuchungen werden im Kapitel 3 beschrieben. Die Ergebnisse der Energiemessungen werden im 4. Kapitel dargestellt. Dabei werden die Lasergeräte und Parametereinstellungen hinsichtlich des Energieverbrauchs direkt verglichen. Als Voraussetzung dafür, gemäß der Aufgabenstellung, werden dort auch die Schweißbarkeit und der Einfluss der optischen Oberflächeneigenschaften untersucht. Hier wird auch die Qualität als wichtiger Aspekt aufgeführt. Unter Kapitel 5 werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und auf weitere Untersuchungsmöglichkeiten eingegangen.

## **2 Theoretische Grundlagen und Stand der Technik**

### **Einfluss von Laserparametern beim Aluminiumschweißen**

Der Werkstoff Aluminium hat in dem Wellenlängenbereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  einen ähnlichen Absorptionsgrad wie Kupfer. In diesem Bereich arbeiten die Hochleistungslaser, die für das Laserschweißen relevant sind. Weiterhin sind die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität (auf das Volumen bezogen) nur wenig geringer. Aufgrund dieser Kennwerte ist das Laserschweißen von Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen gut mit dem Laserschweißen von Kupfer vergleichbar.

Durch den Einsatz von einem Doppelfokus werden Nahtfehler reduziert, gleichzeitig erhöht sich die Stabilität des Schweißprozesses. Für CO<sub>2</sub>-Laser wurde festgestellt, dass eine höhere Strahlqualität und eine höhere Schweißgeschwindigkeit die Porenbildung verringert. Beim Laserschweißen mit Nd:YAG -Lasern wird bei gleich bleibender Laserleistung pro Zeit mit kleineren Fokusburchmessern eine bessere Schweißqualität erzielt. Weiter stabilisiert

eine höhere Laserleistung den Schweißprozess bei einem gegebenen Fokusbereich [GREF]. Schutzgas wird bei Aluminium eingesetzt.

In dieser Arbeit besteht demzufolge die Aufgabe, durch experimentelle Untersuchungen zu zeigen, welchen Einfluss diese genannten und andere Parameter auf die Nahtqualität und den Energieverbrauch beim Laserschweißen vom Material Kupfer haben.

## **2.1 Das Material Kupfer**

### **Der Werkstoff Kupfer**

Kupfer kommt in der Natur nur selten in reiner Form vor. Kupfererz hat in der Regel nur einen reinen Kupferanteil von 0,5 - 7,5%. Das Herstellen von Rohkupfer mit einem Reinheitsgrad von 96 - 98% erfolgt über mehrere Prozessschritte. Kupfer mit einem Reinheitsgrad von 99,95% wird elektrolytisch hergestellt [WSK]. Diese aufwendige und durch den elektrolytischen Prozess langwierige Herstellung ist auch ein Grund für die relativ hohen Anschaffungskosten.

Der Werkstoff Kupfer hat einen breiten Anwendungsbereich aufgrund der speziellen Eigenschaften und wird in der Industrie sehr oft eingesetzt. Er ist auch in fast allen Bereichen des modernen Lebens zu finden. Kupfer wird zum Beispiel in der Elektrotechnik/Elektronik sehr häufig eingesetzt. Weitere Einsatzbereiche für Kupfer sind der Apparatebau, Automobilbau, Baubranche und Bereiche in der die antibakterielle Wirkung ausgenutzt wird.

Oft werden auch verschiedene Kupferlegierungen eingesetzt die bestimmte Eigenschaften verändern. Die bekanntesten Legierungen sind Messing, Bronze, Neusilber und Aluminiumbronze.

## Materialspezifische Eigenschaften

Kupfer hat nach Silber die zweithöchste elektrische Leitfähigkeit und die damit verbundene zweithöchste Wärmeleitfähigkeit von allen Materialien. Für Anwendungen die sich auf diese Eigenschaften beziehen wird aber trotzdem bevorzugt Kupfer verwendet, weil der Unterschied zwischen Kupfer und Silber nur relativ klein ist (7%) und Kupfer eine geringere Dichte und einen geringeren Anschaffungspreis hat. Weiterhin bildet Kupfer Korrosion verhindernde Oxidschichten, was zu einer langen Haltbarkeit gegenüber der Atmosphäre führt. Weitere Eigenschaften sind Schlagzähigkeit, gute Umformbarkeit, Lötbarkeit und Schweißbarkeit. Die Festigkeit von den unlegierten Kupfersorten ist eher gering. Sie kann aber durch Legieren erheblich gesteigert werden. [WSK] Weiterhin kann durch Legieren auch eine bessere Korrosionsbeständigkeit und höhere Warmfestigkeit erreicht werden [MS]. Durch das Legieren werden aber die elektrische und thermische Leitfähigkeit je nach Legierungselement und Legierungsanteil unterschiedlich stark reduziert. Aus diesem Grund werden für Anwendungen, bei denen diese Eigenschaften eine hohe Bedeutung haben, nur technisch reine Kupfersorten verwendet (z.B. Elektrotechnik). Es existieren auch Kupferlegierungen, die aushärtbar sind und somit auch eine höhere Härte erzielt werden kann. Der Längenausdehnungskoeffizient von Kupfer mit  $16,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  ist etwas niedriger als der von Aluminium mit  $23,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ . Damit ist er auch deutlich größer als der von Eisen mit  $12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  aber ähnlich dem von V2A (Edelstahl) mit  $16 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ .

Die in dieser Arbeit verwendeten Kupferwerkstoffe OF-Cu und Se-Cu bestehen aus über 99,9% Kupfer und können daher physikalisch als reines Kupfer betrachtet werden.

<b>Eigenschaft</b>	<b>Kupfer</b>
Dichte	8,96g/cm <sup>3</sup>
spez. Wärmekapazität	0,38 J/g*K (20-400°C)
Schmelztemperatur	1083,4°C
Schmelzwärme	214 J/g
Siedetemperatur	2567°C
Wärmeleitfähigkeit (20°C)	395 W/m*K
Absorptionsgrad bei $\lambda=1,06 \mu\text{m}$	5%
Absorptionsgrad bei $\lambda=10,6 \mu\text{m}$	0,015%

**Tabelle 1: physikalische Eigenschaften von reinem Kupfer [KI] [HE]**

### **Schweißbeignung von Kupfer, Anforderungen**

Die Schweißbeignung von Kupfer ist im Wesentlichen abhängig von Sauerstoffgehalt, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeausdehnung und der Neigung zur Gasaufnahme. Bei sauerstoffhaltigem Kupfer lagert sich  $\text{Cu}_2\text{O}$  an den Korngrenzen ab und bewirkt eine Versprödung. Ebenso kann auch durch Eindringen von Wasserstoff sich Wasserdampf an den Korngrenzen bilden und das Gefüge sprengen. Diese Effekte lassen sich mit sauerstofffreien Kupfer vermeiden. Mit Phosphor desoxidiertes Kupfer verhindert zusätzlich die Aufnahme von Sauerstoff. Durch die hohe Wärmeleitung von Kupfer beim Schweißen ist eine Wärmequelle mit kleiner Angriffsfläche, wie bei einem Elektronenstrahl oder einem Laserstrahl von Vorteil. Bei Verfahren mit einer großen Angriffsfläche der Wärmequelle ist ein Vorwärmen des Materials auf mehrere 100 °C notwendig, um die Wärmeableitung zu verringern. Die Wärmeleitfähigkeit steigt aber auch mit zunehmender Temperatur an. Legierungselemente setzen schon in geringen Mengen die Wärmeleitung herab, so dass eine bessere Schweißbeignung entsteht. Die hohe Wärmeausdehnung erfordert besondere Maßnahmen bei der Positionierung [MS]. Kupfer kann bei hohen Temperaturen große Mengen an Gasen lösen, die beim Erstarren wieder ausgeschieden werden. Sauerstoff aus der Luft kann dabei auch im Kupfer in Form von Oxid verbleiben, was zur Versprödung der Naht führt [PWS]. Bei unlegiertem Kupfer ist die Schmelze sehr dünnflüssig und kann bei ungünstigen Schweißpositionen schnell weglaufen. Der Übergang vom festen Aggregatzustand zum flüssigen Aggregatzustand erfolgt sehr schnell.

Messinglegierungen lassen sich schlecht schweißen da das Zink verdampft bevor das Kupfer flüssig wird. Damit geht das Zink aus und es bilden sich poröse Schweißnähte. In der Abbildung 1 ist der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer im Vergleich zu Stahl beim konventionellen Schweißen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Breite (b) der Zone mit Gefügeänderung bzw. Kornwachstum bei Kupfer durch die hohe Wärmeleitung deutlich größer ist als bei Stahl.

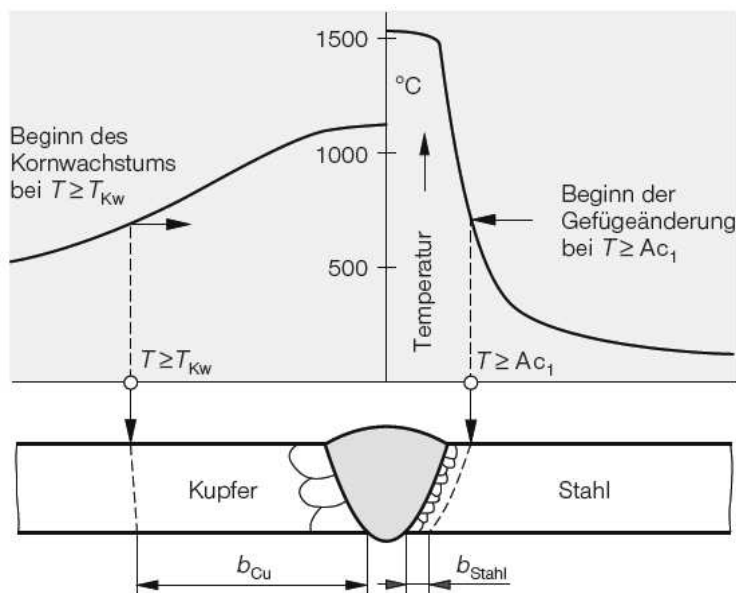


Abbildung 1: Temperaturverläufe beim Schweißen von Kupfer und Stahl [MS]

## 2.2 Laserschweißen von dem Material Kupfer

Für die Industrie bietet das Laserschweißen von Kupfer viele Vorteile. Diese sind zum Beispiel die hohe Schweißgeschwindigkeit, die schmalen Nähte und der geringe Verzug. Trotz dieser Vorteile ist es durch die spezifischen Materialeigenschaften von Kupfer schwierig eine hochwertige Schweißnaht herzustellen. Das liegt neben anderen Materialkennwerten vor allem an der schlechten Absorption von Kupfer in dem Wellenlängenbereich der verfügbaren Hochleistungslaser. Dadurch ist der Prozess sehr anfällig auf Schwankungen der Prozessparameter. Die hohe Reflexion stellt auch eine Gefahr für den Laser dar, der dadurch beschädigt werden kann. Um das zu unterbinden können



spezielle Optiken eingesetzt werden, die die Rückreflexion abfangen oder abschwächen. Eine Möglichkeit wäre ein optischer Isolator der aus 2 Polarisatoren und einem Element, welches den Faradayeffekt aufweist, besteht. Dieser lässt die Laserstrahlung in eine Richtung durch, ist aber nur für eine Wellenlänge wirksam. Ein optischer Isolator kann auch aus einem Polarisator und einer  $\lambda/4$  Platte bestehen. Dabei ist aber die Wirkung bei hohen Leistungen eher gering. Um die Wirkung zu erhöhen müssen mehrere Polarisatoren hintereinander eingesetzt werden [EICHLER]. Weitere Möglichkeiten den Laser nicht zu gefährden ist die leicht schräge Einstrahlung des Laserstrahls, so dass der reflektierte Strahl an der Optik vorbei geht und der Einsatz von Sensoren, die bei zu hohen Reflexionen den Laser abschalten. Diese Sensoren müssen aber schnell genug sein um eine Gefährdung des Lasers auszuschließen. Große Gefahr besteht vor allem bei fasergeführten Lasern mit kleinen Faserkerndurchmessern.

### **2.2.1 Auswahl der Laserquellen**

Für das Schweißen von Kupfer kommen nur Laser mit genügend hohen Intensitäten, die für das Lasertiefschweißen benötigt werden, zum Einsatz. Beim Schweißen mit Laserpulsen sind Pulslängen im Millisekundenbereich erforderlich. Gleichzeitig ist die Wellenlänge im Bezug auf die Absorption von Bedeutung.

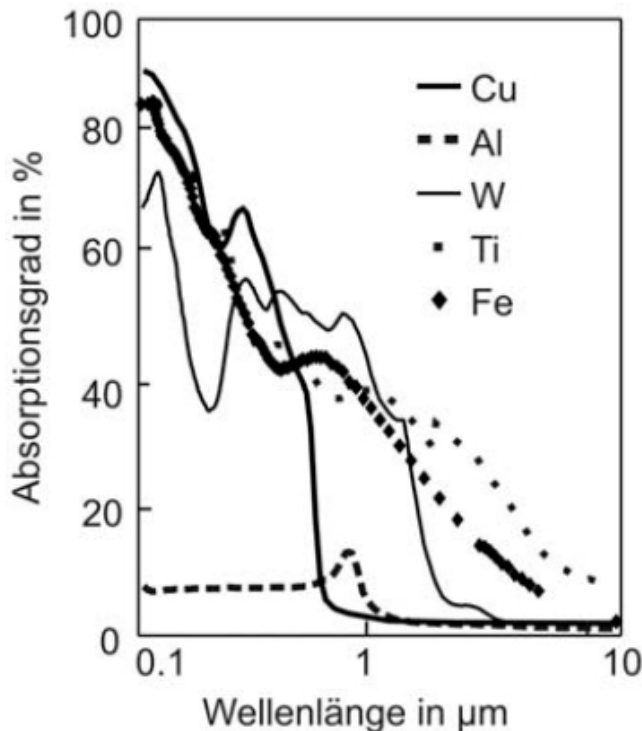


Abbildung 2: Absorption verschiedener Metalle in Abhängigkeit der Wellenlänge [HÜGEL]

Der CO<sub>2</sub>-Laser ist für das Schweißen von Kupfer nur bedingt geeignet wegen der geringen Absorption (1,5%) bei einer Wellenlänge von 10,6 µm. Laser im Bereich der Wellenlänge von 1,064 µm (Festkörperlaser z.B. Nd:YAG-Laser) sind dagegen besser geeignet, weil die Absorption etwas größer ist (ca. 5%). Dennoch sind hohe Intensitäten erforderlich, die z.B. von Faserlasern, Scheibenlasern oder gepulsten Lasern bereitgestellt werden können. Diodenlaser im Bereich von 800 nm wären aufgrund der Wellenlänge noch besser geeignet, können aber durch die schlechte Strahlqualität nur schwer die erforderlichen Intensitäten erreichen. Eine Alternative sind noch frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 0,532 µm. Diese haben eine ausreichend gute Strahlqualität sind aber nur mit relativ geringen Laserleistungen verfügbar. Damit können nur dünne Bleche, Drähte oder Folien geschweißt werden. Für die experimentellen Untersuchungen wurden daher Faserlaser, Scheibenlaser, Puls laser und CO<sub>2</sub>-Laser mit Laserleistungen im Kilowattbereich ausgewählt.

## 2.2.2 Laserschweißverfahren

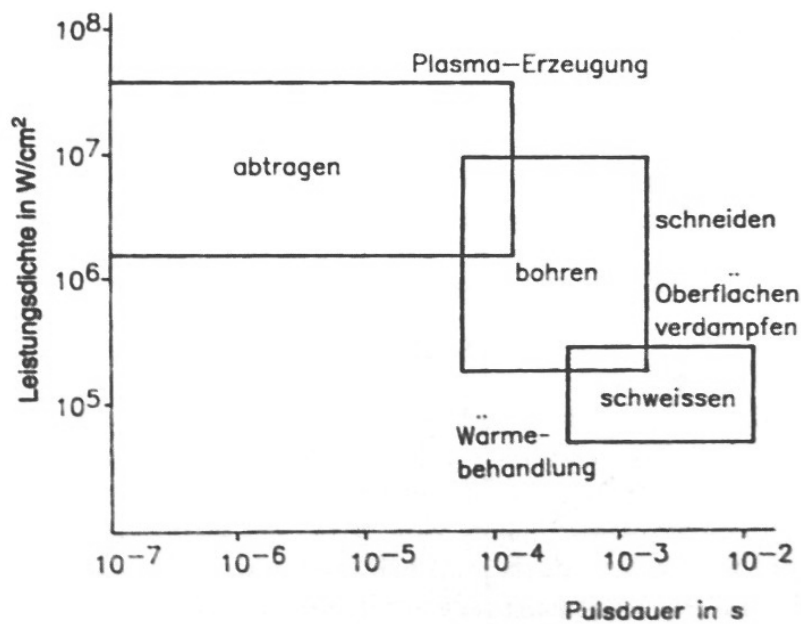


Abbildung 3: Einordnung der Bearbeitungsart nach Leistungsdichte und Pulslänge [EICHLER]

Die Abbildung 3 zeigt die Einordnung des Laserschweißens nach typischer Leistungsdichte und Pulsdauer. Die Grenzen der Bereiche sind nicht genau festlegbar, weil der Schweißprozess stark vom Material und dem speziellen Laser abhängig ist. [EICHLER]

Mögliche Verfahren sind das Punktschweißen, Pulsnahtschweißen, Punktnahtschweißen, Nahtschweißen und die SHADOW - Technik (Stepless High Speed Accurate and Discrete One Puls Welding). Für die experimentellen Untersuchungen beim Kupferschweißen, wurden von den Schweißverfahren das Pulsnahtschweißen und das Nahtschweißen als laserspezifische Parameter ausgewählt weil diese hinsichtlich der Anwendung gut vergleichbar sind. Die Defokussierung und der Einsatz von Schutzgas wurden noch als weitere Parameter ausgewählt.

### Pulsnahtschweißen

Beim Pulsnahtschweißen ist eine Pulsüberlappung von 60% üblich, die sich aus der Pulsfolgefrequenz, dem Vorschub und dem Strahldurchmesser ergibt. Dabei wird eine durchgängige Schweißnaht erzeugt. Das Punktnahtschweißen ist dagegen eine Folge von Einzelpulsen, mit denen die Skalierung der Naht

beliebig ist. Bei der SHADOW –Technik wird eine kurze Schweißnaht mit nur einem langen Puls erzeugt. [POPR]

Die Pulslänge beträgt beim Schweißen in der Regel 1 ms bis 20 ms. Am Anfang des Pulses ist eine hohe Intensität erforderlich, um Oxidschichten aufzubrechen bzw. die Materialoberfläche zu verflüssigen und für den Tiefschweißeffekt die Dampfkapillare zu erzeugen. Weil die Absorption durch die Dampfkapillare ansteigt ist für den weiteren Schweißprozess nur eine geringere Intensität notwendig. Dieser Effekt wird von der höheren Absorption der Schmelze gegenüber dem festen Material noch verstärkt.

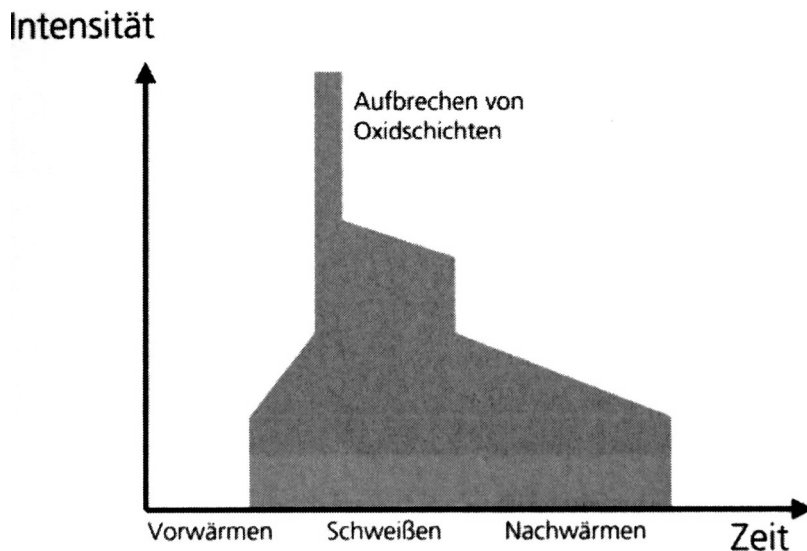


Abbildung 4: Typische Pulsform [POPR]

In der Abbildung 4 ist eine typische Pulsform dargestellt. Das Vor- und Nachwärmen ist vom jeweiligen Werkstoff abhängig und wird daher an diesen angepasst.

Beim Pulsschweißen von Kupfer besteht der Vorteil, gegenüber dem Nahtschweißen, dass für jeden Puls die gleichen Bedingungen vorliegen. Somit wird die Schweißnaht gleichmäßiger und es ist eine hohe Prozesssicherheit gegeben. Gleichzeitig können durch die kurze Einstrahlzeit und gute Wiederholgenauigkeit sehr schmale und gleichmäßige Schweißnähte erzeugt werden. Deshalb wird das Pulsschweißen in diesem Zusammenhang auch als Feinschweißen bezeichnet. Die Pulse können durch eine gepulste Anregung (Pulslaser) oder durch Güteschaltung (gepulst) des Lasers erzeugt werden.

Typische Parameter:

$W=0,1 - 100 \text{ J}$ ,  $f_p=1 - 200 \text{ Hz}$ ,  $T_h=1 - 20 \text{ ms}$ ,  $P_{av} \leq 1000 \text{ W}$

Für die Schweißversuche wurden bei diesem Verfahren die Variation der Parameter Pulsenergie und Pulslänge ausgewählt, weil diese für das Pulsnahtschweißen entscheidend sind.

### **Nahtschweißen**

Nahtschweißen ist das Schweißen einer Naht mit kontinuierlicher Laserstrahlung. Puls laser mit einer hohen Pulswiederhol frequenz können auch zum Nahtschweißen verwendet werden und als kontinuierlich angesehen werden. Bei Nahtschweißen herrscht auch eine höhere Schmelzbaddynamik. Durch das ständige Vorhandensein von Schmelze wird der Dampfkanal von flüssiger Schmelze umspült und es entstehen Schmelzbadströmungen. Mit zunehmender Nahtlänge steigt die Temperatur der unmittelbaren Umgebung des Dampfkanals durch die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer deutlich an. Dagegen hat kann beim Pulsnahtschweißen die unmittelbare Umgebung der einzelnen Pulse in der Zeit zwischen den Pulsen etwas abkühlen. Beim Nahtschweißen wurden für die Versuche die Parameter Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit zum variieren ausgewählt, da diese hier wesentlich sind.

### **2.2.3 Energetischer Betrachtung beim Schweißen von Kupfer**

Der einfallende Laserstrahl trifft zuerst auf die kalte Materialoberfläche und wird bei Kupfer etwa zu 5% absorbiert. Dies geschieht so lange bis im Zentrum des Laserstrahls durch die Erwärmung Metaldampf entsteht (Tiefschweißeffekt) und sich eine Vertiefung bildet. In der kegelförmigen Vertiefung steigt die Absorption durch flache Einfallswinkel, Mehrfachreflexionen und höhere Temperaturen sprunghaft an. Somit wird mit zunehmender Tiefe der Dampfkapillare immer mehr Strahlung absorbiert. Während des gesamten Schweißprozesses geht die Wärme durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion in der Luft und der Schmelze verloren. Bei Kupfer ist der Verlust

durch die extrem dünnflüssige Schmelze [MS] (hohe Konvektion) und die sehr hohe Wärmeleitung besonders groß.

### **Einkoppelgrad**

Der Einkoppelgrad beim Tiefschweißen kann nach dem Modell der Hohlraumabsorption von Gouffé für eine kegelförmige Geometrie der Dampfkapillare mit folgender Formel berechnet werden [DAUS]:

$$\eta_A = A \frac{1 + (1 - A) \cdot \left( \frac{d_f}{2 \cdot s} - \left( \frac{d_f}{2 \cdot s} \right)^2 \right)}{A \cdot \left( 1 - \frac{d_f}{2 \cdot s} \right) + \frac{d_f}{2 \cdot s}} \quad (1).$$

Die Berechnung erfolgt mit dem Absorptionsgrad  $A=5\%$  von Kupfer bei senkrechtem Einfall. Die Abhängigkeit des Absorptionsgrades vom Einfallswinkel, der Polarisation und der Temperatur wird nicht berücksichtigt. In der Abbildung 5 ist die Temperaturabhängigkeit des Absorptionsgrades bei Kupfer dargestellt. Daraus kann abgeschätzt werden, dass die Absorption bei ca. 20% liegt, wenn für die Oberflächentemperatur, wie sie an den Wänden der Dampfkapillare herrscht, ein Wert nahe der Siedetemperatur von Kupfer (2567°C) angenommen wird. Die berechneten Einkoppelgrade mit und ohne Berücksichtigung der Temperatur sind in Abbildung 6 dargestellt.

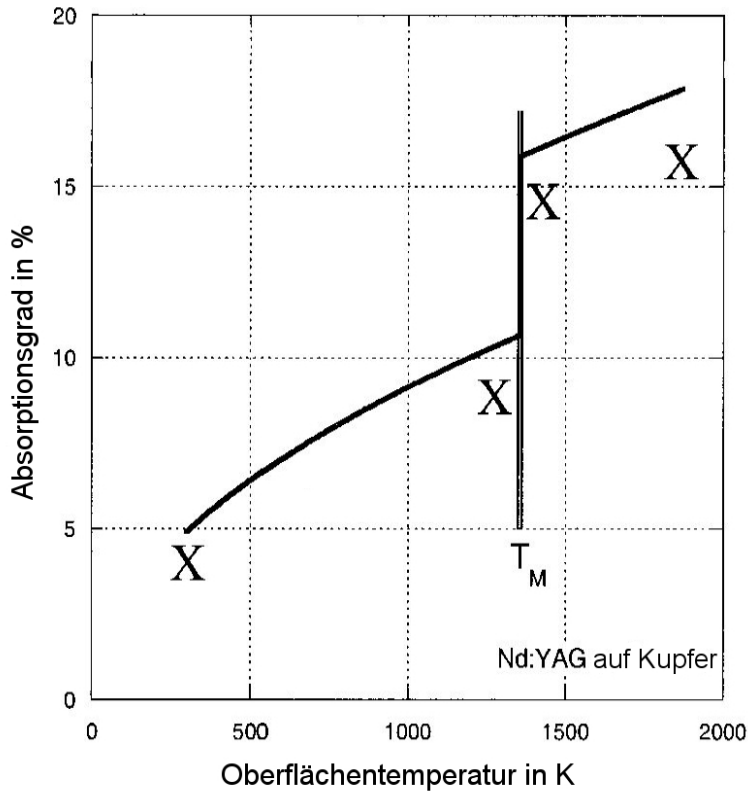


Abbildung 5: Absorption in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur bei Kupfer mit  $\lambda = 1,065\mu\text{m}$  [BIAS]

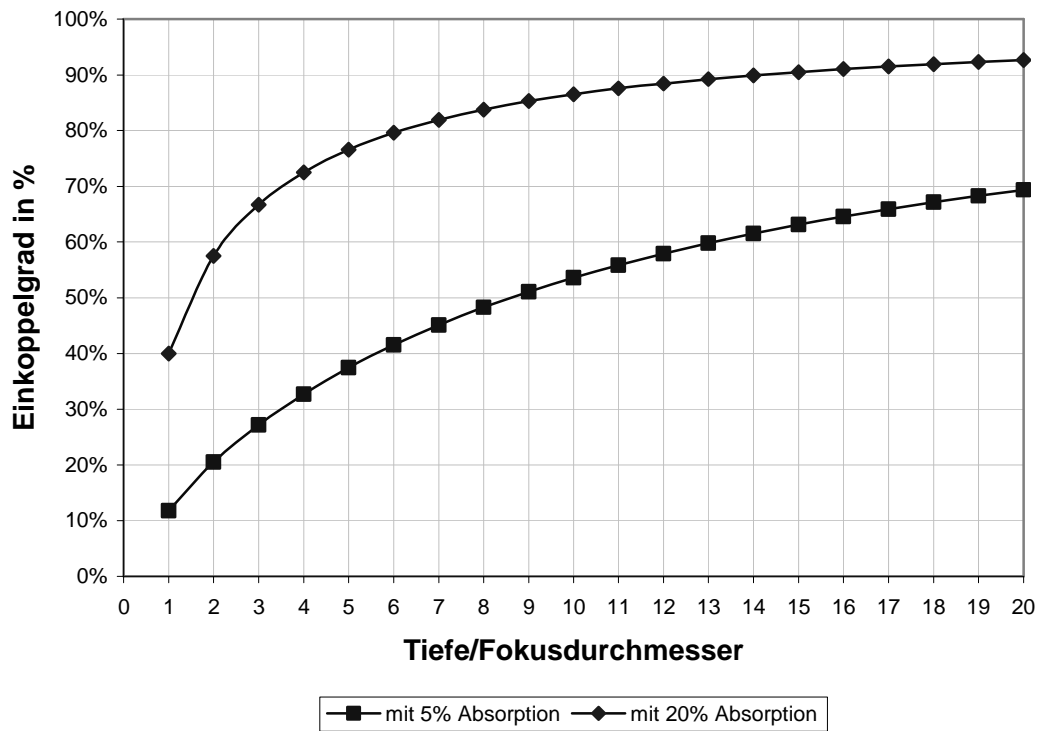


Abbildung 6: Einkoppelgrad in Abhängigkeit des Aspektverhältnisses (Tiefe/Fokusbereich) der Dampfkapillare

Je schmaler und tiefer die Dampfkapillare ist, desto höher wird der Einkoppelgrad und gleichzeitig steigt die Energieeffizienz des Prozesses. Zum Vergleich ist in der Abbildung 7 der Einkoppelgrad von Eisen und Aluminium dargestellt.

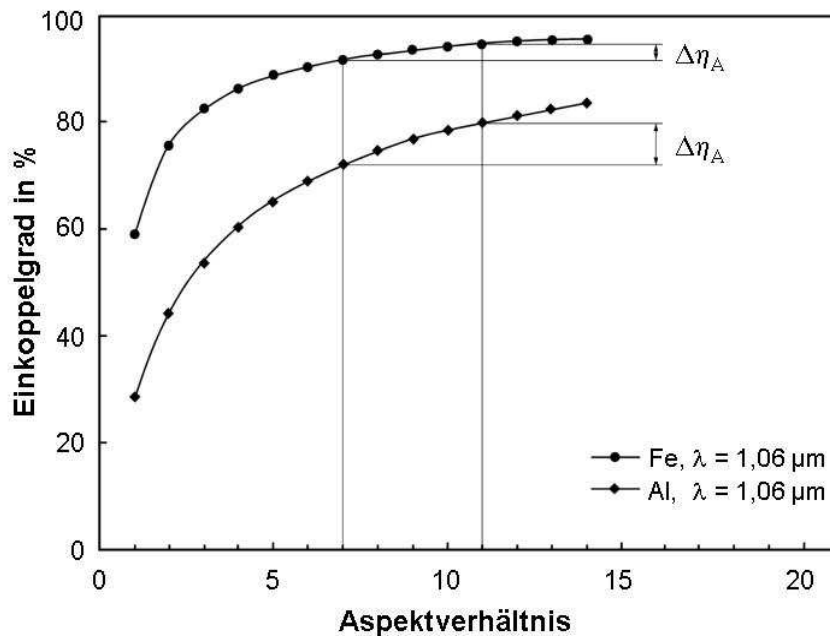


Abbildung 7: Abhängigkeit des Einkoppelgrades vom Aspektverhältnis für Aluminium und Eisen für eine kegelförmige Kapillare bei der Wellenlänge 1,06  $\mu\text{m}$  [DAUS]

In der Abbildung 8 ist zu sehen, dass auch bei flacheren Einfallswinkeln mit der Wellenlänge 1,06  $\mu\text{m}$  der Absorptionsgrad nicht wesentlich ansteigt. Damit kann abgeschätzt werden, dass der gemittelte Absorptionsgrad über alle Einfallswinkel sich nicht wesentlich von dem bei senkrechtem Einfall unterscheidet (bei Raumtemperatur).



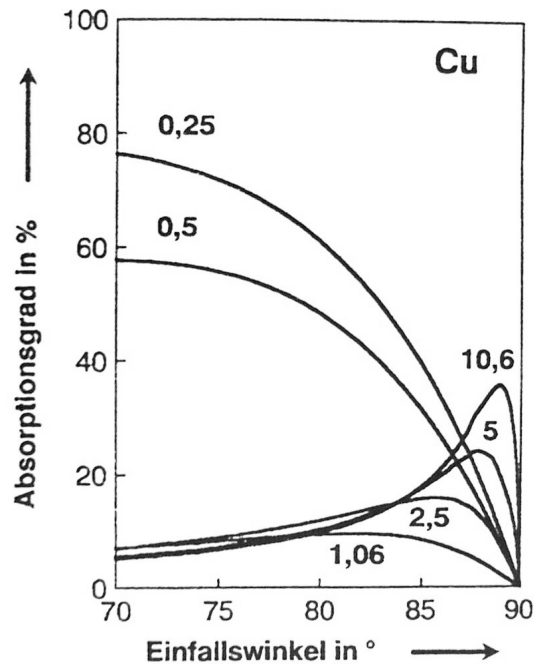


Abbildung 8:: Absorptionsgrade von Kupfer bei verschiedenen Wellenlängen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel bei Raumtemperatur [DAUS] (0° entspricht senkrechtem Einfall)

### Erforderliche Intensität für das Tiefschweißen

Für Strahldurchmesser kleiner 500 µm und Vorschubgeschwindigkeiten kleiner 10 m/min kann die Schwelle zum Tiefschweißen durch

$$\frac{A \cdot P}{d_f} \approx T_v \cdot \lambda_{th} \quad (2)$$

abgeschätzt werden [HÜGEL]. Speziell auf das Lasersystem bezogen gilt die näherungsweise Verknüpfung

$$\frac{P}{\lambda \cdot M^2} \geq \frac{T_v \cdot \lambda_{th}}{A(\lambda)} \cdot \frac{f}{d_l} \quad (3)$$

bei geringen Schweißgeschwindigkeiten [HÜGEL]. Der Strahlradius  $w_0$  errechnet sich nach der Formel

$$w_0 = \frac{M^2 \cdot \lambda \cdot f_{fok}}{\pi \cdot w_p} \quad (4).$$

Ersetzt man in dieser Formel den Strahlradius vor der Linse ( $w_p$ ) mit der Hälfte des Strahldurchmessers vor der Linse ( $d_l/2$ ) und den Strahlradius im Fokus ( $w_0$ ) mit der Hälfte des Strahldurchmessers im Fokus ( $d_f/2$ ), wobei der Strahldurchmesser im Fokus ( $d_f$ ) mit der Formel

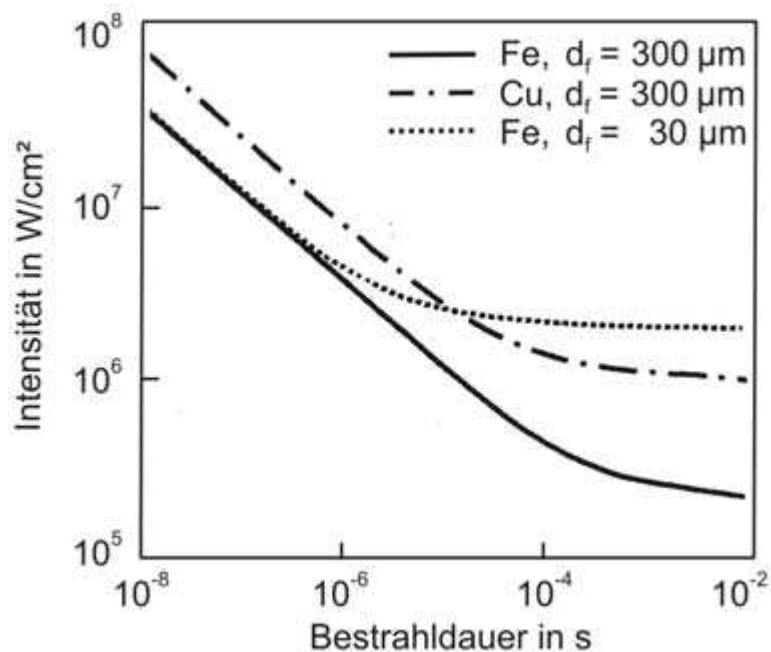
$$d_f = \frac{f_{fok}}{f_{kol}} \cdot d_{faser} \quad (5),$$

die für fasergeführte Systeme gilt, ersetzt wird. Stellt man das Ergebnis nach dem Strahldurchmesser vor der Linse ( $d_l$ ) um, ergibt sich

$$d_l = \frac{4 \cdot M^2 \cdot \lambda \cdot f_{Kol}}{\pi \cdot d_{faser}} \quad (6).$$

Setzt man dieses Ergebnis in (3) ein und stellt die Formel nach der Laserleistung um, erhält man die für einen fasergeführten Laser mindestens erforderliche Laserleistung (mit  $f_{fok}=f$ )

$$P \geq \frac{T_v \cdot \lambda_{th} \cdot f_{fok} \cdot \pi \cdot d_{faser}}{4 \cdot f_{kol} \cdot A(\lambda)} \quad (7).$$



**Abbildung 9: Erforderliche absorbierte Intensität für das Verdampfen im Strahlzentrum in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer bei verschiedenen Materialien und Strahldurchmessern [HÜGEL]**

In Abbildung 9 ist die erforderliche absorbierte Intensität für das Verdampfen von Kupfer und Eisen in Abhängigkeit der Bestrahlungsdauer dargestellt, was

die Voraussetzung für das Laserstrahl-tiefschweißen ist. Der Fokusbereich  $d_f$  von 300  $\mu\text{m}$  entspricht dem des verwendeten Scheibenlasers. Weiterhin ist erkennbar, dass bei kleinen Strahldurchmessern höhere Intensitäten erforderlich sind als bei großen. Ab einer bestimmten Bestrahlungsdauer bleibt die erforderliche Intensität konstant.

Einfluss auf die Bestrahlungsdauer haben die Parameter Vorschub bzw. Pulsdauer. Die Intensität wird durch die Variation der Parameter Laserleistung, Defokussierung und Pulsenergie bestimmt.

### **Berechnung der Erwärmung des Materials nach dem Schweißen an einem Beispiel:**

Die Materialmaße sind 60 mm x 80 mm x 6 mm (entspricht dem später verwendeten Plattenmaterial). Die Naht ist 50 mm lang und es wird mit 3,8 kW Laserleistung im CW – Betrieb geschweißt. Der Vorschub beträgt 4m/min. Die Absorption wird mit 50% angenommen, da er beim Tiefschweißen durch Mehrfachreflexion in der Dampfkapillare gegenüber der ebenen Oberfläche wesentlich ansteigt. Der Wärmeverlust durch abgetragenen Kupferdampf, Wärmestrahlung, Konvektion und Wärmeableitung in die Spannvorrichtung wird vernachlässigt.

Volumen:

$$V = l \cdot b \cdot h = 60\text{mm} \cdot 80\text{mm} \cdot 6\text{mm} = 28,8\text{cm}^3$$

$$W = P \cdot t = P \cdot \frac{s}{v} = 1900\text{W} \cdot \frac{0,05\text{m}}{0,0667\text{m/s}} = 1424\text{Ws}$$

$$\rho = 8,96\text{g/cm}^3$$

$$c = 0,38 \text{ J/g}\cdot\text{K}$$

$$m = V \cdot \rho = 28,8\text{cm}^3 \cdot 8,96\text{g/cm}^3 = 258,048\text{g}$$

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c} = \frac{1424\text{J}}{258,048\text{g} \cdot 0,38\text{J/g}\cdot\text{K}} = 14,5\text{K}$$

Die Temperatursteigerung des Werkstücks beträgt 14,5°C und hat somit keinen Einfluss auf die Einkoppelbedingungen während des Schweißprozesses. Bei Kupferwerkstücken mit wesentlich geringerer Masse und geringeren

Schweißgeschwindigkeiten kann der Einfluss relevant werden. Im Bereich der Schweißnaht ist die Temperatursteigerung durch Wärmestau (vorausende Wärmefront) höher, wodurch sich die Absorption bei Kupfer etwas erhöht. Das hängt auch von der Schweißgeschwindigkeit und der Bauteilgeometrie ab.

### **Anwendungsgebiete Laserschweißen von Kupfer**

Das Anwendungsgebiet des Schweißens von Kupfer liegt vor allem im Bereich des Lasermikroschweißens mit gepulsten Festkörperlasern [POPR]. Weitere Anwendungsbereiche sind Elektrotechnische Bauelemente im Anlagenbau und Rohrverbindungen. Es ist auch schon gelungen Kupfer mit anderen Werkstoffen (z.B. mit Edelstahl) durch Laserschweißen zu verbinden, was bei Rohrverbindungen Anwendung finden kann.

### **2.2.4 Schutzgas**

Für die Untersuchung der Wirkung von Schutzgas beim Kupferschweißen wurden von der SITEC Industrietechnologie GmbH Versuche mit dem gepulsten Nd:YAG Laser von LASAG mit Kurzbezeichnung „FLS“ bei der Firma LASAG durchgeführt. Die Bearbeitungsaufgabe war das Anschweißen von Pins aus Kupfer von unten auf 0,5 mm dickes Kupferblech. Es wurde Argon mit einem Volumenstrom von 10 l/min und seitlicher Zuführung gearbeitet. Verwendete Parameter waren  $P_{av}=512$  W,  $T_{th}=12$  ms,  $f=6$  Hz,  $W=58,5$  J und  $P_{max}=4,9$  kW. Die Pulsüberhöhung am Pulsanfang betrug 135%.



**Abbildung 10: Schweißnaht mit Schutzgas [SITEC]**

Zum Vergleich wurde die gleiche Schweißaufgabe ohne die Verwendung von Schutzgas durchgeführt. Die Parameter waren  $P_{av}=325$  W,  $T_{th}=7$  ms,  $f=10$  Hz,  $W=40,6$  J und  $P_{max}=6,7$  kW. Die Pulsüberhöhung am Pulsanfang betrug 120%.



Abbildung 11: Schweißnaht ohne Schutzgas [SITEC]

Mit Verwendung von Schutzgas war eine schlechte Reproduzierbarkeit gegeben. Wie in der Abbildung 10 zu erkennen ist, erfolgte eine unterschiedliche Einkopplung der Pulse und eine unterschiedliche Schmelzbadausbildung. Ursachen können die ungleichmäßige Abkühlung des Kupferbleches durch die hohe Wärmeleitung und schwankende Einkoppelbedingungen durch das Schutzgas sein. Auf Grund dieser Ergebnisse ist der Schweißprozess von Kupfer mit Schutzgas nicht zu beherrschen bzw. es ist keine Prozesssicherheit gegeben.

## 2.3 Qualitätssicherung

### Qualität der Schweißnähte

Die Qualität der Schweißnähte kann durch den optischen Eindruck recht gut beschrieben werden. Nur Eigenschaften wie Festigkeit, Härte, Korngröße und innere Fehler müssen mit einem geeigneten Messverfahren untersucht werden, was zusätzliche Kosten verursacht. Der Aufwand für die Prüfung der Qualität hängt wiederum stark von den Anforderungen an die Schweißnaht ab. Anforderungen sind z.B. Dichtheit, elektrische Verbindung, spezifische mechanische Beanspruchung und eine bestimmte Oberflächenbeschaffenheit der Schweißnaht.

### Entstehung von Rissen und anderen Fehlern

Risse können durch hohe Schrumpfspannungen, die von der Größe des Schmelzbadvolumens abhängen, entstehen. So steigen mit zunehmender Größe des Volumens der Schmelze auch die Schrumpfspannungen. Auch große Phasengebiete bei Legierungen, wo gleichzeitig feste und flüssige

Bestandteile enthalten sind, neigen zur Bildung von Heißrissen [KNISSEL]. Bindefehler entstehen durch Plasmaabschirmung oder eine ungenaue Strahlführung. Unsaubere Schweißnähte, Nahtdurchhang und Randkerben entstehen durch eine unzureichende Spaltfüllung.

## **Standartprüfverfahren**

### Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Das einfachste zerstörungsfreie Prüfverfahren ist die Sichtprüfung, falls diese für die Anforderungen ausreicht. Gegebenenfalls ist an wichtigen Stellen mehr Prüfaufwand erforderlich. Ein weiteres Prüfverfahren ist die Durchstrahlungsprüfung mit Röntgen- oder Gammastrahlen. Die dafür erforderliche Strahlungsenergie ist von der Materialdicke und der Materialart abhängig. Bei Laserschweißnähten ist wegen der kleinen Ausdehnung eine hohe Auflösung erforderlich, was durch Mikrofokusröntgen erreicht werden kann. Ultraschallprüfverfahren sind auch möglich. Ein spezielles Ultraschallprüfverfahren ist die „Synthetische Apertur Fokus Technik“ (SAFT). Dieses Verfahren ist 2d oder 3d Ultraschall, bei dem durch Rekonstruktion aus Einzelwerten eine Vermessung des Fehlers möglich ist. [KNISSEL]

### Mechanische Prüfung

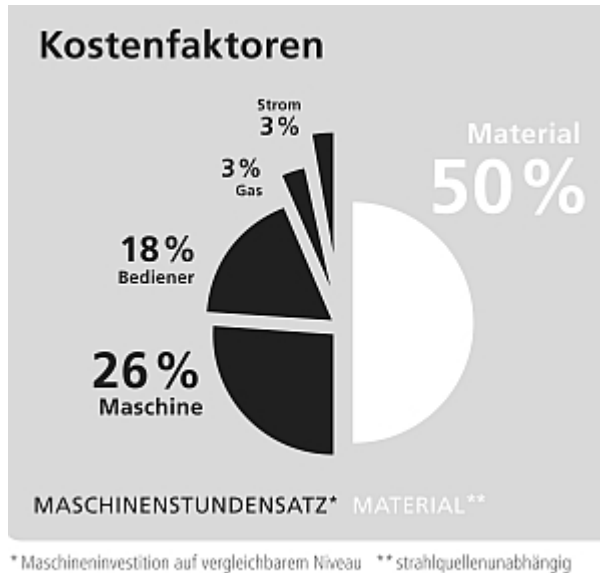
Mechanische Prüfverfahren sind Querkzugversuche, Dreipunktbiegeversuche (Bruchmechanikversuche), Bruchzähigkeitsprüfung und Mikrohärtemessung (Vickershärte). Für diese Verfahren ist es zum Teil erforderlich aus den geschweißten Werkstücken spezielle Proben herzustellen, wie z.B. ein Querschliff für die Härtmessung.

In dieser Arbeit wird die Beurteilung der Schweißnahtqualität über die Sichtprüfung der Nahtoberfläche und des Querschliffs durchgeführt. Andere Prüfverfahren wurden nicht angewendet, weil keine speziellen Anforderungen gestellt wurden.

## **2.4 Einfluss der Energiekosten auf die Stückkosten**

Laut einer Studie von Trumpf über 2d Laserschneiden, beeinflussen die Energiekosten die Stückkosten und damit die Wirtschaftlichkeit nur gering. Die

Produktivität hat dagegen den entscheidenden Einfluss auf die Stückkosten. Somit ist die Bearbeitungsaufgabe für die Laserauswahl ausschlaggebend. Es sollte auch darauf geachtet werden dass die Dynamik der Maschine für den Laser ausreichend ist. [WOP]



**Abbildung 12: Zusammensetzung der Teilekosten [WOP]**

In der Abbildung 12 ist dargestellt wie sich beim Laserschneiden im Zweischichtbetrieb mit durchschnittlicher Auslastung und Produktivität die Stückkosten für einen Materialmix zusammensetzen.

### 3 Versuchstechnik und Versuchsdurchführung

#### 3.1 Vorgehensweise

Für die Bewertung der Oberfläche im Bezug auf die Aufgabenstellung sind Kupferbleche mit verschiedenen Anlauffarben bereitgestellt worden. Die optischen Eigenschaften der Oberfläche setzen sich aus Reflexion, Absorption, Transmission und Streuung zusammen. Dabei gilt:  $\text{Absorptionsgrad} + \text{Reflexionsgrad} + \text{Transmissionsgrad} = 1$ . Die Streuung ist im Reflexionsgrad mit enthalten. Die Absorption ist allein der entscheidende Prozess für die Bearbeitung bzw. das Laserschweißen, da sie für den Wärmeeintrag verantwortlich ist. Der Transmissionsgrad wird durch das Material festgelegt

und ist bei Metallen nicht vorhanden bzw. gleich null, weil die Strahlung nur weniger als 1  $\mu\text{m}$  eindringt. Einfluss auf die Absorption haben somit die Oberflächenstruktur und die Zusammensetzung des Materials an der Oberfläche. Der Absorptionsgrad wird für die Bewertung über den Reflexionsgrad mit der Ulbrichtkugel und zum Vergleich über die Laserkalorimetrie gemessen. Die Wellenlänge, mit der gemessen wird, entspricht der von unter 2.2.1 als geeignet befundenen Festkörperlasern. Dafür werden verschiedene Proben mit unterschiedlicher Anlauffarbe vermessen. Die Rauigkeit der Proben wird auch gemessen.

Mit den ausgewählten Lasersystemen werden Vorversuche durchgeführt, in denen festgestellt wird ob ein Laserschweißen von Kupfer möglich ist. Dabei wird auch darauf geachtet, dass eine ausreichend gute Nahtqualität erzeugt werden kann.

Für die unter Punkt 2.2.2 erläuterten Schweißverfahren Nahtschweißen mit kontinuierlicher Laserstrahlung und Pulsschweißen mit Laserpulsen werden nun, je nach Möglichkeit, mit den unter Punkt 3.4 dokumentierten Parametern Versuche durchgeführt. Das erfolgt mit den Lasersystemen, die sich bei den Machbarkeitsversuchen für das Kupferschweißen unter Punkt 4.2.1 als verwendbar herausstellten.

Die Messung des Energieverbrauches der Lasergeräte erfolgt nicht zeitgleich mit den Versuchen, da die Messgeräte eine zu geringe Zeitauflösung haben und es technisch bzw. vom Zeitaufwand her günstiger ist. Es würden sonst damit auch die Fehlversuche mit gemessen werden. Gemessen wird über eine längere Zeit bei den Einstellungen, mit denen die Versuche erfolgreich waren und weiteren ausgewählten, die für die Bestimmung des Wirkungsgradverlaufes der Lasergeräte notwendig sind. Der jeweilige Energieverbrauch wird dann über die Vorschubgeschwindigkeit daraus berechnet. Den restlichen zu messenden Energieverbrauch verursacht der Kühler. Da der Kühler durch den Wasserkreislauf ein träges System bildet, muss auch über einen längeren Zeitraum gemessen werden. Weil dafür der zeitliche Aufwand groß ist wird nur bei wenigen wichtigen Leistungseinstellungen der Lasergeräte gemessen. Es



werden auch nur Kühler für die Messung verwendet, die das Kühlwasser direkt gegen Luft kühlen, wie es bei einer einzelnen Anlage der Fall ist. Der Energieverbrauch wird dann in den Ergebnissen hinsichtlich der Lasergeräte, der Betriebsart (Laserschweißen oder Pulsnahtschweißen) und den weiteren variierten Parametern verglichen.

### 3.2 Untersuchte Lasergeräte

Folgende Lasergeräte wurden für die Machbarkeitsversuche aus den zur Verfügung stehenden Geräten ausgewählt. Dabei handelt es sich um vier verschiedene Festkörperlaser und einen CO<sub>2</sub> –Gaslaser. Unter 2.2.1 wurden diese geeignet bzw. bedingt geeignet bewertet.

<u>Laserart:</u>	<u>Bezeichnung:</u>	<u>Hersteller:</u>
CO <sub>2</sub> -Slab-Laser	DC 040W	ROFIN
YAG Scheibenlaser	TRUDISK4002	TRUMPF
Faserlaser (Multimode)	YLR1500	IPG
gepulster YAG Laser	JK704	LUMONICS
gepulster YAG Laser	KLS246	LASAG

In den folgenden Tabellen 2 und 3 sind die wichtigsten technischen und optischen Daten der ausgewählten Lasersysteme dargestellt. Die Komponenten der Optik waren nur teilweise variierbar, je nach Vorhandensein der Komponenten. Wo mehrere Komponenten zur Auswahl standen konnte aber nur eine Variante verwendet werden, weil bei den anderen die notwendige Intensität für das Schweißen von Kupfer nur sehr schwer bzw. nicht erreicht werden kann.

## CW- Laser

Laserg�r�t	DC 040W	TRUDISK4002	YLR 1500
max. Laserleistung	4 kW	4 kW	1,5 kW
Wellenl�nge	10,6 �m	1,064 �m	1,07 �m
Faserkerndurchmesser	/	400 �m	200�m
Brennweite des Kollimators	/	200 mm	150 mm
Brennweite Linse/Parabolspiegel	200 mm	150 mm	150 mm
Abbildungsverh�ltnis	/	1:0,75	1:1
Fokusbereich	120 �m	300 �m	200 �m
max. Frequenz	100Hz	CW	CW

Tabelle 2: Optische Parameter der verwendeten CW- Laser

Der Fokusbereich des CO<sub>2</sub>-Lasers wurde nach der Formel

$$w_0 = \frac{M^2 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot w_p}$$
 berechnet und ist damit ein theoretischer bzw. idealer Wert.

Diese Formel ist nur für kleine Strahldivergenzen gültig. Die weiteren Fokusbereich wurden durch das Abbildungsverhältnis bestimmt und sind damit auch ideal. Der Fokusbereich ist bei 86% der Laserleistung angegeben.

Weil der Scheibenlaser TRUDISK4002 erst kurz vor dem Ende der Bearbeitungszeit dieser Arbeit zur Verfügung stand, wurden die Schweißversuche des Scheibenlasers mit dem Vorgängermodell HLD4002 durchgeführt. Für die Bewertung des Energieverbrauchs sind deshalb die Werte von dem Scheibenlaser TRUDISK4002 aufgenommen worden, da dieser Laser effizienter als sein Vorgängermodell HLD4002 ist und auch das aktuelle Modell auf dem Markt ist. Weil die Laserstrahleigenschaften beider Scheibenlaser gleich sind (die Leitfaser bestimmt die Strahleigenschaften), wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse der Schweißversuche auch gleich sind. Bei der Lohnfertigung der SITEC mit dem TRUDISK4002 wurde auch kein merklicher Unterschied zum HLD4002 festgestellt. Es bestand jedoch bei der gleichen eingestellten Laserleistung (3 kW und 4 kW) der beiden Scheibenlaser eine Abweichung der gemessenen Laserleistung von ca. 50 W, was nur ca. 1,5% der Laserleistung ist und somit vernachlässigt werden konnte. Der

Scheibenlaser wird aus diesen Gründen in dieser Arbeit immer als TRUDISK4002 bezeichnet. Mit dem Scheibenlaser HLD4002 wurde zusätzlich eine Strahlvermessung durchgeführt, die im Anhang unter Punkt 7.2 aufgeführt ist. Die Messung des Energieverbrauchs der Kühlung erfolgte mit dem Scheibenlaser TRUDISK4002.

### **Gepulste Laser**

Lasengerät	JK704	KLS246
Wellenlänge	1,064 $\mu\text{m}$	1,064 $\mu\text{m}$
max. mittlere Leistung	400 W	250 W
max. Pulsenergie	50 J	50 J
Brennweite Linse	100 mm	150 mm
Fokusbildungsdurchmesser	$\leq 250 \mu\text{m}$	$\leq 120 \mu\text{m}$
max. Frequenz	200 Hz	1000 Hz

**Tabelle 3: Optische Parameter der verwendeten Puls laser**

Mit dem Symbol „ $\leq$ “ gekennzeichnete Werte sind die Lochdurchmesser, die mit einem Puls des Lasers erzeugt wurden. Da die Vermessung oder Berechnung sehr schwierig und aufwendig sind können diese Werte als näherungsweise angenommen werden. Bei diesen gepulsten Lasern war es möglich die Resonatorlänge zu verändern um auf die Strahlqualität Einfluss zu nehmen. Es wurden die Längen eingestellt die für das Schweißen vorgesehen sind. Das entspricht der kürzesten Resonatorlänge, wodurch auch deutlich divergente Strahlanteile (höhere Moden) im Resonator verbleiben und für die Bearbeitung genutzt werden. Schließlich steigt dadurch die Leistungsfähigkeit und die Strahlqualität sinkt, was einen größeren Fokusbildungsdurchmesser verursacht. Zur Energiemessung haben diese Laser ein integriertes fotoelektrisches Messsystem.

## Strahlführung, Bearbeitungsoptik und Führungsmaschinen

Lasergesät	Strahlführung	Bearbeitungsoptik	Führungsmaschine
CO <sub>2</sub> -Laser DC 040W	Spiegel	Hohlspiegel aus Kupfer	SITEC: LWS-P Tisch: Y-Achse
Scheibenlaser TRUDISK 4002	Faser Kerndurchmesser 400 µm	Kollimation- und Linsenoptik	Optik: Y- und Z- Achse Linearantrieb
Faserlaser YLR 1500	Faser Kerndurchmesser 200 µm	Kollimations- und Linsenoptik	SITEC: LWS-C Tisch: Y-Achse Optik: Y- und Z- Umlaufspindelantrieb
gepulster Nd:YAG- Laser JK704	freie Strahlführung	Binokularoptik	5-Achs- Koordinatentisch, Umlaufspindelantrieb
Gepulster Nd:YAG- Laser KLS246	freie Strahlführung mit Spiegel	Linsenoptik	SITEC: LWS-H 3-Achs- Koordinatentisch, Umlaufspindelantrieb

Tabelle 4: Lasergesäte mit zugehöriger Anlagentechnik

### 3.3 Probengeometrie, Werkstoff, Spannvorrichtungen

Für diese Arbeit wurde Kupfermaterial im Bezug auf die Aufgabenstellung in Form von Blechbauteilen bereitgestellt, die für eine elektrotechnische Anwendung vorgesehen sind. Aus diesen Bauteilen wurden die Bleche durch Abtrennen von bestimmten Elementen hergestellt, so dass ein flaches Blech entstand (Abb.14). Ergänzend wurde noch Plattenmaterial für die Versuche ausgewählt, bei denen durch die größere Materialdicke der Einfluss der Dicke auf die Wärmeableitung von der Bearbeitungsstelle vernachlässigbar gering wird. Für den Werkstoff der Platten wurde aus Verfügbarkeitsgründen eine ähnliche Kupfersorte gewählt.

## Verwendete Kupferwerkstoffe

Bezeichnung	Werkstoffnummer	Cu-Gehalt	Herstellung
OF-Cu R240 (hht) [Platten]	CW008A	99,95%	sauerstofffrei, im Vakuum erschmolzen
SE-Cu 58 K14 R240 [Blech]	CW020A	99,9%	sauerstofffrei, mit Phosphor desoxidiert

Tabelle 5: verwendete Kupferwerkstoffe nach DIN 1708 ISO (EN13599)

Zum Befestigen des Materials in den Laseranlagen wurde für die Bleche und die Platten eine feste, gleichbleibende Befestigung ausgewählt, um eine konstante Wärmeableitung und eine einfache Montage zu ermöglichen.

## Kupferplatten

Die Abmessungen sind 80 mm x 60 mm x 6 mm. Sie bestehen aus dem Werkstoff OF-Cu und haben eine blanke glatte Oberfläche (Rauigkeit siehe Tabelle 6). Die Fixierung in den jeweiligen Laseranlagen erfolgte durch das Einspannen in einen Maschinenschraubstock wie in Abbildung 13 dargestellt.

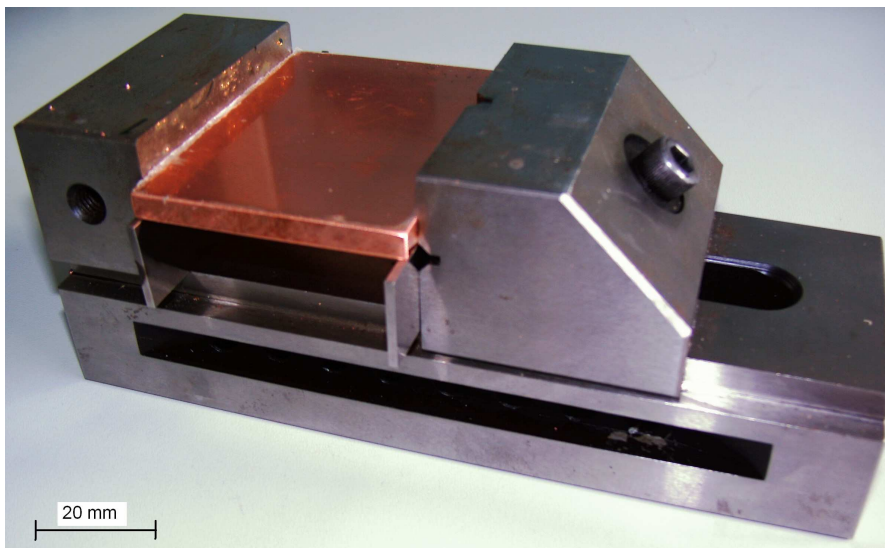


Abbildung 13: Spannvorrichtung mit Kupferplatte

## Kupferblech

Das Blech besteht aus dem Material SE-CU und hat eine Dicke von 0,5 mm. Die Abmaße sind ca. 170mm x 100 mm. Diese Bleche haben durch eine Wärmebehandlung Anlauffarben gebildet. Auf zwei verschiedenen Bauformen sind neben verschiedenen Färbungen hauptsächlich rötliche und gelbliche Färbungen vorhanden. Nur Bleche mit diesen zwei Färbungen werden für die

Schweißversuche verwendet. Die Fixierung in den jeweiligen Laseranlagen erfolgte durch das Spannen auf Aluminium Profilen wie in folgender Abbildung 14 dargestellt.

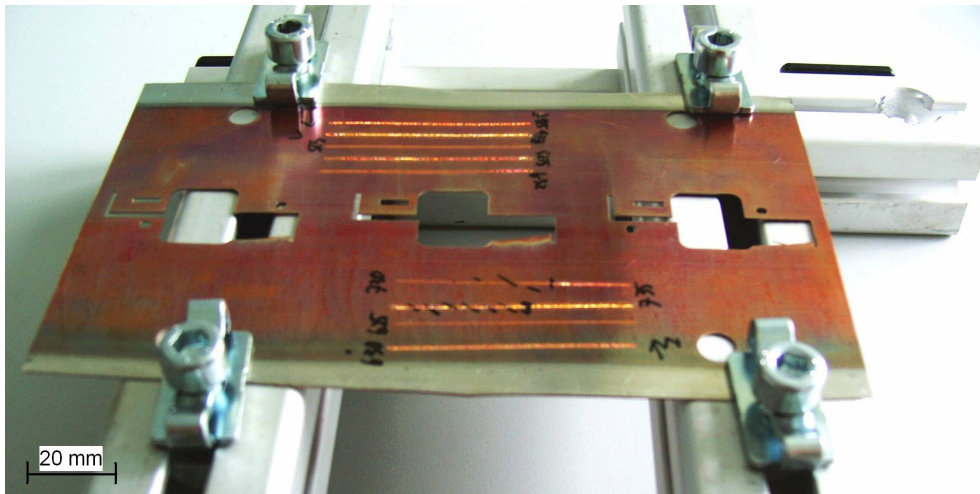


Abbildung 14: Spannvorrichtung mit Kupferblech

### 3.4 Versuchsdurchführung, Versuchsparameter, Versuchsauswertung

#### Feste Parameter:

Als Schweißversuche werden Blindnähte in Form von Linien auf dem Material erzeugt. Die Nahtlänge soll möglichst 50 mm betragen und der Nahtabstand 5mm. Es wird mit senkrechtem Strahleinfall gearbeitet. Nur bei hoher Empfindlichkeit auf Rückreflexion wird unter einem Einfallswinkel von 10-15° zur Senkrechten gearbeitet. Als Bearbeitungsziel und Vergleichskriterium wird eine Einschweißtiefe von 0,5 mm bei dem Plattenmaterial mit 6 mm Dicke und eine sichere Durchschweißung der 0,5 mm dicken Bleche festgelegt. Dieses Ziel soll im CW- und Pulsbetrieb auf den Kupferplatten und den Kupferblechen erreicht werden. Weiterhin soll dabei eine gute Nahtqualität erzielt werden, die kurz beschrieben wird, da keine Güteklassen für Kupferschweißnähte verfügbar sind. Beim Pulsschweißen wird eine Pulsüberlappung von 60% angestrebt. Der Fokussdurchmesser und die Strahlqualität werden bei dem jeweiligen Lasersystem nicht verändert. Wegen unvermeidbaren Schwankungen der Einschweißtiefe wird bei den Platten eine Toleranz von +0,1 mm für die

Schweißnähte im CW –Betrieb und  $\pm 0,2$  mm für die Schweißnähte im PW -Betrieb zugelassen. In der Praxis werden für die Toleranz auch Mindestschweißtiefen verwendet, die überschritten aber nicht unterschritten werden dürfen. Der Scheibenlaser und der Faserlaser können durch eine Modulation der Pumpdioden für das Pulsnahtschweißen gepulst betrieben werden. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu den rein gepulsten Nd:YAG –Lasern mit Gaußähnlichen Intensitätsverläufen zu erreichen wird dafür ein Rechteckpuls eingesetzt. Schutzgas wird nicht verwendet sondern unter normaler Atmosphäre gearbeitet. Der Grund dafür wird unter Punkt 4.2.2 erläutert.

### **Variierte Parameter**

Bei den rein gepulsten Lasern wurde die Pulsfrequenz, Pulslänge und Pulsenergie variiert. Bei den CW –Lasern, die durch Modulation auch gepulst betrieben werden können, wurden Pulslänge, Frequenz und Laserleistung variiert. Der Vorschub beim Pulsnahtschweißen wurde durch die Frequenz und den erzeugten Durchmesser der Schweißpulse im Material festgelegt. Beim Nahtschweißen mit kontinuierlicher Strahlung wurden dagegen Vorschub und Laserleistung variiert.

### **Durchführung**

Bei der Variation der Parameter wird die Einschweißtiefe als Vergleichskriterium immer eingehalten. In der Praxis ist die Einschweißtiefe auch der wichtigste Wert. Die Nahtbreite spielt dabei eine untergeordnete aber nicht unwichtige Rolle. Die Versuche wurden hauptsächlich mit Fokus auf der Materialoberfläche durchgeführt und wo es möglich und sinnvoll war auch defokussiert.

Für das Nahtschweißen mit kontinuierlicher Laserstrahlung wurden Leistungsstufen festgelegt und bei diesen Stufen der Vorschub variiert bis die geforderte Einschweißtiefe erreicht war. Im gepulsten Betrieb dieser Lasergeräte wurde anstelle des Vorschubs die Pulslänge variiert. Beim Pulsnahtschweißen mit den rein gepulsten Lasern hingegen wurde die Pulslänge in Schritten von ganzen Millisekunden verändert und dazu jeweils die Pulsenergie angepasst, damit die geforderte Einschweißtiefe eingehalten wird.

Zusätzlich wurde die Frequenz in Stufen und über einen sinnvollen Bereich verändert. Die Qualität wird durch eine Sichtprüfung beurteilt. Es wurden nur Schweißnähte in die Auswertung einbezogen, wo eine ausreichend gute Nahtqualität erzeugt wurde.

Zur Messung der Leistungsaufnahme wurde je nach elektrischem Anschluss des zu messenden Geräts, das universelle Messgerät für elektrische Größen „ENDAV -Mobile“ von der Firma FEITEC oder das Messgerät „FLUKE Power Logger 1735“ eingesetzt. Beim „ENDAV –Mobile“ erfolgt der Anschluss über einen Stromwandler der mittels Steckverbindung in die Versorgungsleitung eingebracht wird und beim „FLUKE Power Logger 1735“ über Stromzangen und Kontaktierung der Spannung. Gemessen wurde die Wirkleistung, die die tatsächliche verbrauchte Leistung ist. Aus dieser wurde der Energieverbrauch berechnet. Für alle Angaben der Laserleistung der CW- Laser wurde die am Ort der Bearbeitung gemessene verwendet. Für die Pulsenergie der gepulsten Laser wurde der Wert der internen Messung verwendet, weil die Messung am Ort der Bearbeitung schwierig und aufwendig ist.

Die Laserleistungen des Scheibenlasers wurden mit dem Messgerät „Laser Power Probe“, Model P-10kY, der Firma Macken Instruments Inc. gemessen. Die Laserleistungen des Faserlasers wurden mit dem Leistungsmessgerät „Laser Power/Energy Meter“, Model: „Plus“, vom Hersteller „LaserPoint“ in Verbindung mit dem wassergekühlten Absorberkopf „W1500“ gemessen.

Zur Analyse der Schweißnahttiefen wurden die Platten mit einem Trennschleifgerät getrennt und anschließend geschliffen, geätzt und mittels Auflichtmikroskop mit Kamera ausgemessen. Für jede Naht wurden zwei Schliffbilder gemacht um Nahtbreite und Nahttiefe auszumessen.



## 4 Ergebnisse

### 4.1 Optische Eigenschaften der Kupferoberfläche

Bei bestimmten Fertigungsschritten bei der Herstellung von Kupferbauteilen können Temperaturen auftreten, so dass sich das Kupfer verfärbt, wie zum Beispiel beim Beschichten mit Zinn bei ca. 230°C. Es bilden sich zwischen 125°C und 250°C verschiedene Anlauffarben aus, die aus dünnen Oxidschichten ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) bestehen. Über 250°C beginnt die Zunderung (schwarze  $\text{CuO}$  Schicht) [K12]. Diese Anlauffarben haben offensichtlich auch Einfluss auf die Absorptionseigenschaften, wenn ein Fertigungsschritt Laserschweißen erfolgen soll. Um die optisch unterschiedlichen Kupferoberflächen, die durch die Auswirkungen einer Erwärmung bei der Herstellung bzw. Bearbeitung entstanden sind, zu berücksichtigen, wird der jeweilige Absorptionsgrad mit zwei verschiedenen Verfahren bei 10 unterschiedlichen Verfärbungen, die mit dem Auge erkennbar waren, bestimmt. Das eine Verfahren ist die Absorptionsmessung über die Erwärmung einer definierten Probe (Laserkalorimetrie) und das Zweite ist die Reflexionsmessung mit der Ulbrichtkugel, bei der auch die Streuung erfasst wird. Der Absorptionsgrad wird dann aus den erfassten Messdaten berechnet. Die Messung wurde jeweils mit der Wellenlänge 1,065  $\mu\text{m}$  durchgeführt, mit der auch die Schweißversuche gemacht wurden. Unter Punkt 4.3 werden diese Messergebnisse noch mit den Ergebnissen der praktischen Schweißversuche verglichen und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Parameterwahl getroffen, um ein gleichbleibendes Bearbeitungsergebnis zu erzielen. Es besteht auch die Möglichkeit die Verfärbungen mit verdünnter Salz- und Salpetersäure wieder zu entfernen. Der Prozess ist jedoch sehr aufwendig und teuer. Deshalb ist es günstiger die Laserparameter auf diese Bedingungen anzupassen. Es sind auch schon Lasersysteme in der Entwicklung, die die Absorptionseigenschaften des Materials während der Schweißbearbeitung über die reflektierte und gestreute Laserstrahlung bestimmen und in Echtzeit die Laserparameter an die sich ständig ändernde Absorption anpassen. Mit diesem System kann eine hohe Prozesssicherheit erreicht werden.

125°C

250°C

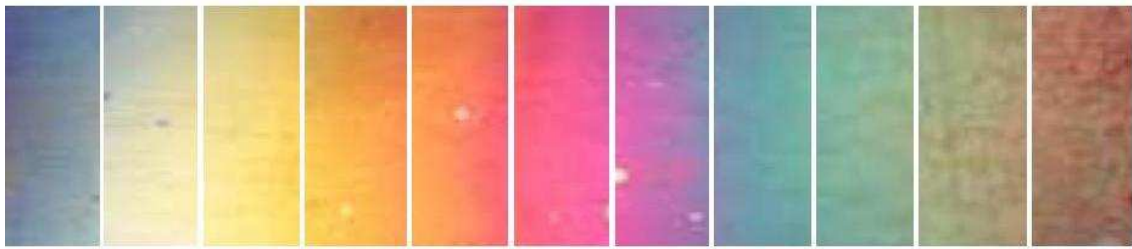


Abbildung 15: Skala der verschiedenen Anlauffarben von Kupfer [KU]

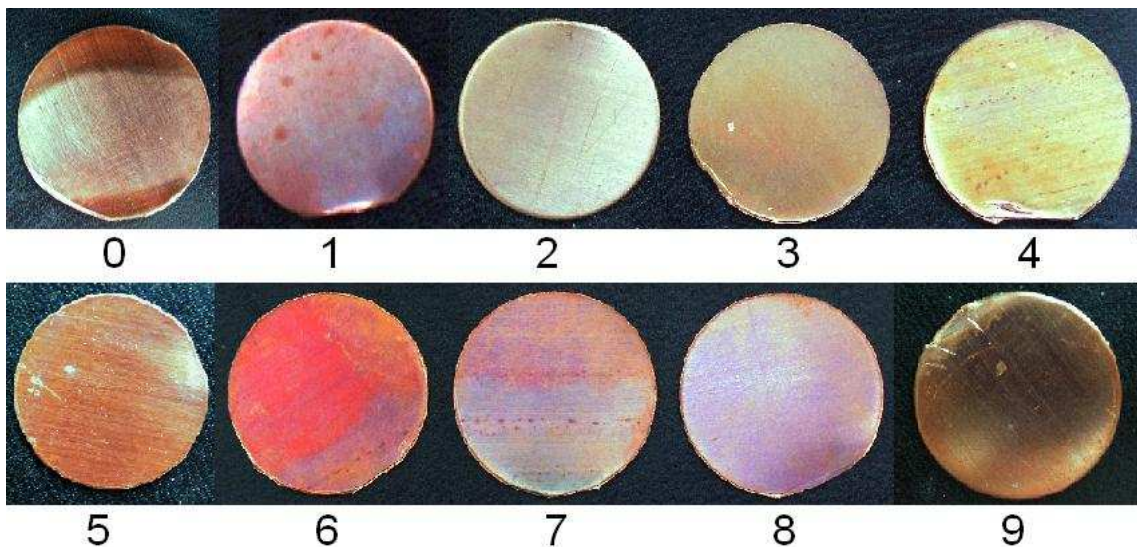


Abbildung 16: Proben mit Nummerierung

Für die Messung der Absorption wurden Kupferchips (Abbildung 16) aus Se-Cu mit 20 mm Durchmesser und 0,5 mm Dicke in den verfügbaren Anlauffarben verwendet. Zusätzlich wurde die Absorption der Platten, die mit einer Schutzfolie versehen waren, über die Reflexionsmessung gemessen. Die Schutzfolie wurde erst kurz vor der Messung entfernt. Durch die Fotografie der Proben ist die Farbe und Helligkeit leicht verfälscht abgebildet.

### Rauhigkeitsmessung

Es standen zwei verschiedene Arten von Blechbauteilen mit gleicher Dicke zur Verfügung (bezeichnet als „flach“ bzw. „Winkel“). Die ausgewählten Platten ohne Verfärbung wurden auch mit betrachtet. Die Oberflächen ähnelten geschliffenen Oberflächen und es waren Unterschiede zu erkennen. Da die Absorption auch in einem nicht zu vernachlässigbaren Maß von der Rauheit der Oberfläche abhängen kann wurde diese auch vermessen. Es wurde parallel und senkrecht zur Strukturrichtung/Walzrichtung gemessen.

	$R_z \perp$	$R_z \parallel$	$R_a \perp$	$R_a \parallel$
Proben 1,2,3,8 (flach)	1,111 $\mu\text{m}$	0,714 $\mu\text{m}$	0,181 $\mu\text{m}$	0,117 $\mu\text{m}$
Proben 0,4,5,6,7,9 (Winkel)	1,025 $\mu\text{m}$	0,443 $\mu\text{m}$	0,154 $\mu\text{m}$	0,069 $\mu\text{m}$
Platten (Block)	0,633 $\mu\text{m}$	0,426 $\mu\text{m}$	0,110 $\mu\text{m}$	0,07 $\mu\text{m}$

**Tabelle 6: Rauigkeitsmessung**

$\parallel$ .....parallel bzw. längs zur Maserung/Walzrichtung

$\perp$ .....senkrecht bzw. quer zur Maserung/Walzrichtung

Die Grafische Darstellung der Messung befindet sich im Anhang. Die Beobachtungen bei einer Bestrahlung der Oberflächen mit dem Pilotlaser ergaben, dass eine hohe Rauigkeit auch eine breitere Streuung bewirkt. Es war auch zu erkennen, dass die Streuung hauptsächlich senkrecht zur erkennbaren Struktur erfolgte.

In Abbildung 17 sind Absorptionsgrade von Aluminium und Stahl in Abhängigkeit von  $R_z$  dargestellt. Es ist ein deutlicher Anstieg des Absorptionsgrades ab einem  $R_z$  -Wert von 1,5  $\mu\text{m}$  zu erkennen. Unter diesem Wert ändert er sich bei Stahl minimal. Da der Absorptionsgrad auch stark von der Wellenlänge und dem Material abhängt können daraus keine direkten Schlussfolgerungen für Kupfer gezogen werden. Jedoch kann durch die Tendenz vermutet werden, dass im Bereich der gemessenen Rauigkeitswerte die Absorption sich kaum ändern wird.

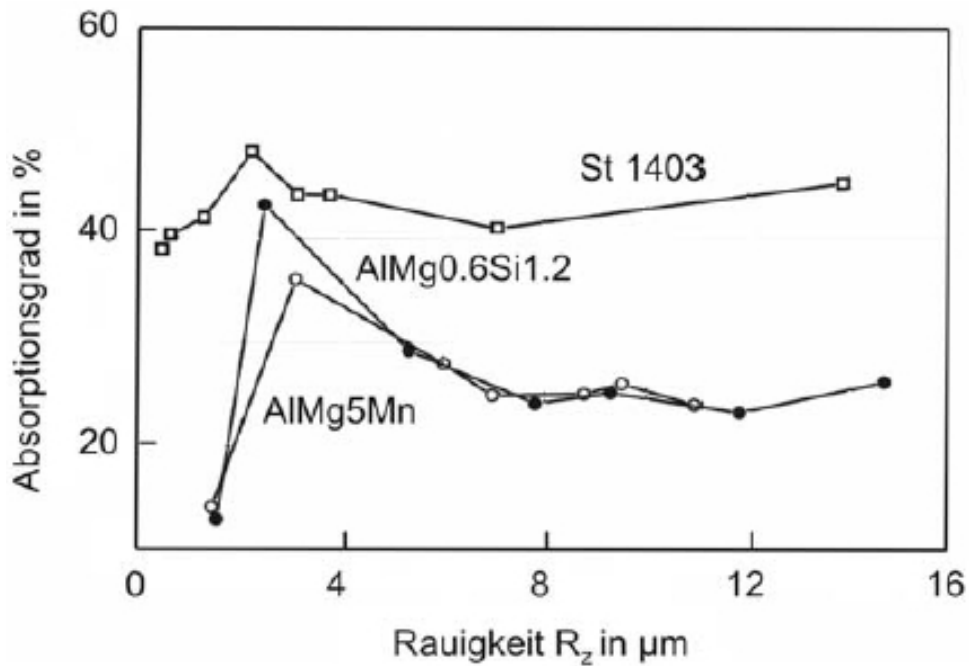


Abbildung 17: Absorption in Abhängigkeit der Rauigkeit  $R_z$ ,  $\lambda$ =bei 808 nm, geschliffener Oberfläche, senkrechten Einfall und Raumtemperatur [HÜGEL]

#### 4.1.1 Reflexionsmessung

Für die Reflexionsmessung wurde ein gepulster Faserlaser (Abb.18) mit den folgenden Parametern verwendet.

- $T_h=500 \mu\text{s}$
- $f_p=7 \text{ Hz}$
- $P=40 \text{ mW}$
- $\lambda=1,07 \mu\text{m}$

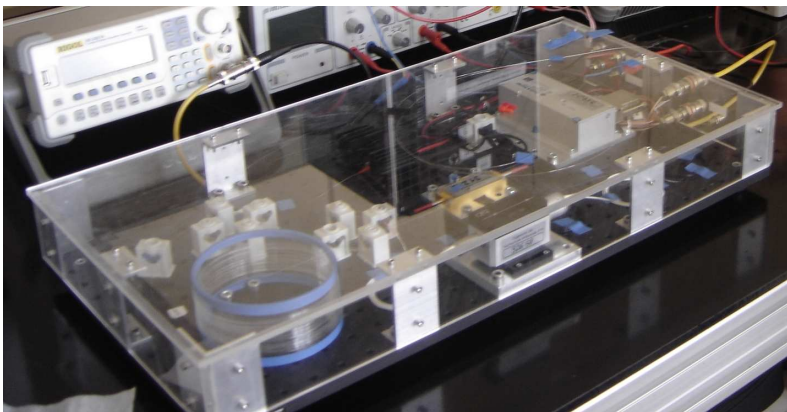
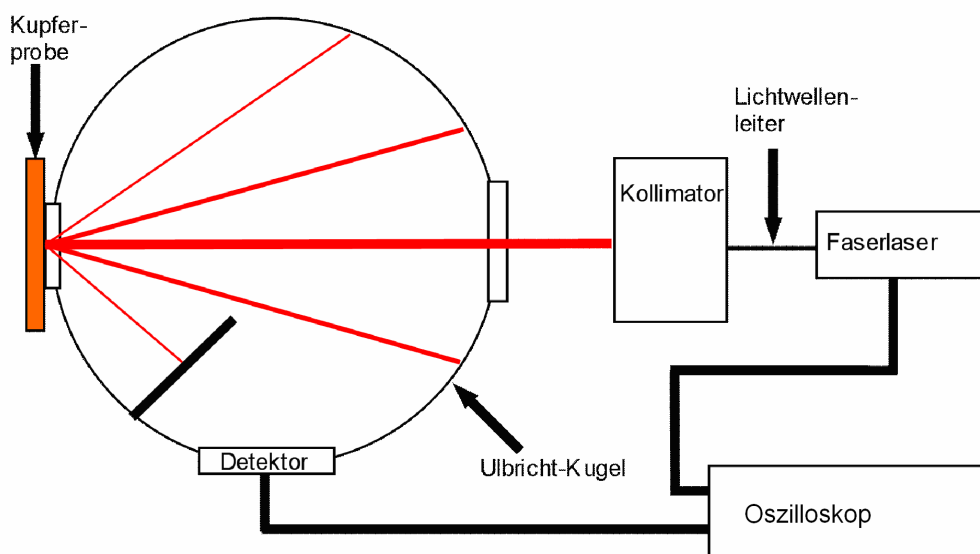
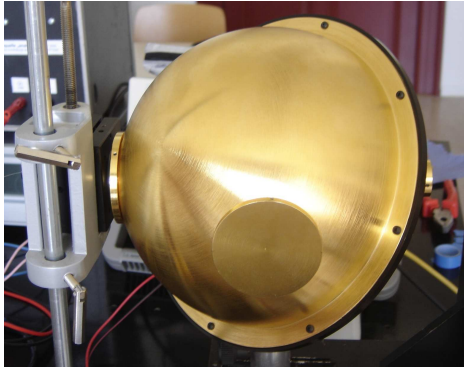


Abbildung 18: Faserlaser im Messaufbau

Die verwendete Ulbrichtkugel ist innen mit einer hoch reflektierenden Schicht versehen, die zusätzlich stark streut, so dass sich im Inneren ein homogenes Strahlungsfeld bilden kann. In der Kugel befinden sich mehrere Öffnungen verschiedener Größe für Proben, Strahlungsquellen und Detektor. Bei der Reflexionsmessung traf der kollimierte Laserstrahl durch eine Öffnung mit einem Durchmesser 20 mm in einen kleinen Winkel zum senkrechten Einfall auf die Probe. Die befand sich in einer Öffnung mit einem Durchmesser von 10 mm gegenüber. Der Laserstrahl auf der Probe hatte nur einen geringfügig kleineren Durchmesser als die Öffnung. Mittels des Detektors wurde die Spannung, die im Detektor von der Strahlung erzeugt wird, mit einem Oszilloskop gemessen. Der Detektor war durch eine ebenfalls beschichtete Platte vor direkter Einstrahlung geschützt. Für die Referenzmessung mit 100% Reflexion wurde anstelle der Probe ein wiederum beschichteter Deckel eingesetzt. Fehlerquellen können Speckle auf dem Detektor sein, was eine ungleichmäßige Ausleuchtung von diesem bewirkt und es könnte ein Teil der an der Probe gestreuten Strahlung durch die Eintrittsöffnung des Lasers wieder austreten ohne mit gemessen zu werden, was aber stark von der Streuung der Probe abhängt. Ebenso verfälscht das Umgebungslicht, welches durch die Eintrittsöffnung der Ulbrichtkugel eintritt, die Messung. Dieser Fehler ist aber nur sehr gering, weil dieses Licht immer mitgemessen wurde und weniger als 8% der Intensität vom Laser entsprach.



**Abbildung 19: Prinzipskizze des Messaufbaus der Reflexionsmessung**



**Abbildung 20: Ulbrichtkugel im Messaufbau**

Für die Berechnung des Reflexionsgrad wurde über fünf Messungen des maximalen Spannungswertes gemittelt und der Spannungswert, bei Verwendung der Referenzprobe mit der gleichen Beschichtung wie die Kugel, als 100% Reflexion angenommen. Der Absorptionsgrad ergibt sich dann aus 1 minus den Reflexionsgrad, da die Streuung durch die Ulbrichtkugel im Reflexionsgrad enthalten ist und keine Transmission existiert, wie unter 3.1 beschrieben wird.

#### **4.1.2 Absorptionsmessung**

Die Absorptionsmessung erfolgte über das Prinzip der Laserkalorimetrie. Dabei wird ein Laserstrahl auf ein kleines Stück Kupfer mit definierter Masse gerichtet und der Temperaturanstieg mittels eines Temperatursensors aufgezeichnet. Am Beginn des Temperaturanstiegs hat der Wärmeverlust durch Konvektion und Wärmeleitung einen vernachlässigbaren Einfluss auf diesen. Wärmestrahlung ist bei den niedrigen Temperaturen auch vernachlässigbar. Die Starttemperatur betrug 22,2 bis 22,4°C. Der Laser wurde 30 s lang eingeschaltet und hatte eine Leistung von 6,8 W auf der Probe. Es wurde für jede Probe nur eine Messung durchgeführt. Da der Strahlfleck deutlich kleiner als bei der Messung mit der Ulbrichtkugel war, haben lokale Unterschiede einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis. Dadurch wäre für eine genaue Messung ein Abrastern der Probe mit einem geeigneten Abstand notwendig. Weiterhin ist noch bei der Messung einer mit Fotolack besprühten Probe ein Absorptionsgrad von 22,2% errechnet worden. Dieser müsste aber 100% betragen. Damit existiert ein Fehler von ca. Faktor 4. Dieses Ergebnis wurde als Referenzwert für 100% Absorption verwendet. Also können die Ergebnisse nur als Vergleich eingebracht werden und nicht als genaue Messung.

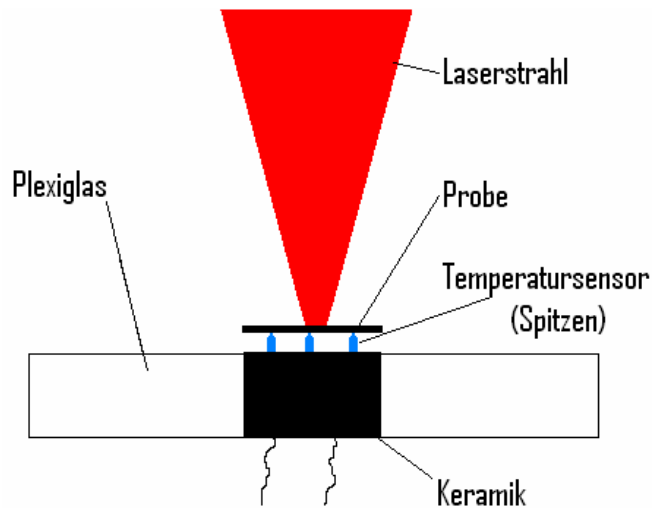


Abbildung 21: Schema des Versuchsaufbaus der Absorptionsmessung

### Berechnungsgrundlage

Wärmeeintrag durch Temperaturänderung:

$$dQ = m \cdot c \cdot dT$$

Gleichsetzen mit dem Wärmeeintrag des Laserstrahls:

$$A \cdot P \cdot dt = m \cdot c \cdot dT$$

Ergibt:

$$A = \frac{m \cdot c}{P} \cdot \frac{dT}{dt}$$

Funktion des Temperaturanstiegs:

$$T(t) = b \cdot (1 - e^{-a(t-t_0)}) + T_0$$

Ableitung nach der Zeit:

$$\frac{dT}{dt} = a \cdot b \cdot e^{-a(t-t_0)}$$

Ergebnis am beginn des Temperaturanstiegs:

$$\frac{dT}{dt}(t \rightarrow t_0) = a \cdot b$$

Ergebnis:

$$A = \frac{m \cdot c \cdot a \cdot b}{P}$$

Die Konstanten a und b wurden mit einem Solver ermittelt, der die theoretische Erwärmungskurve an die gemessene annähert.

### 4.1.3 Ergebnisse der Absorptions- und Reflexionsmessung

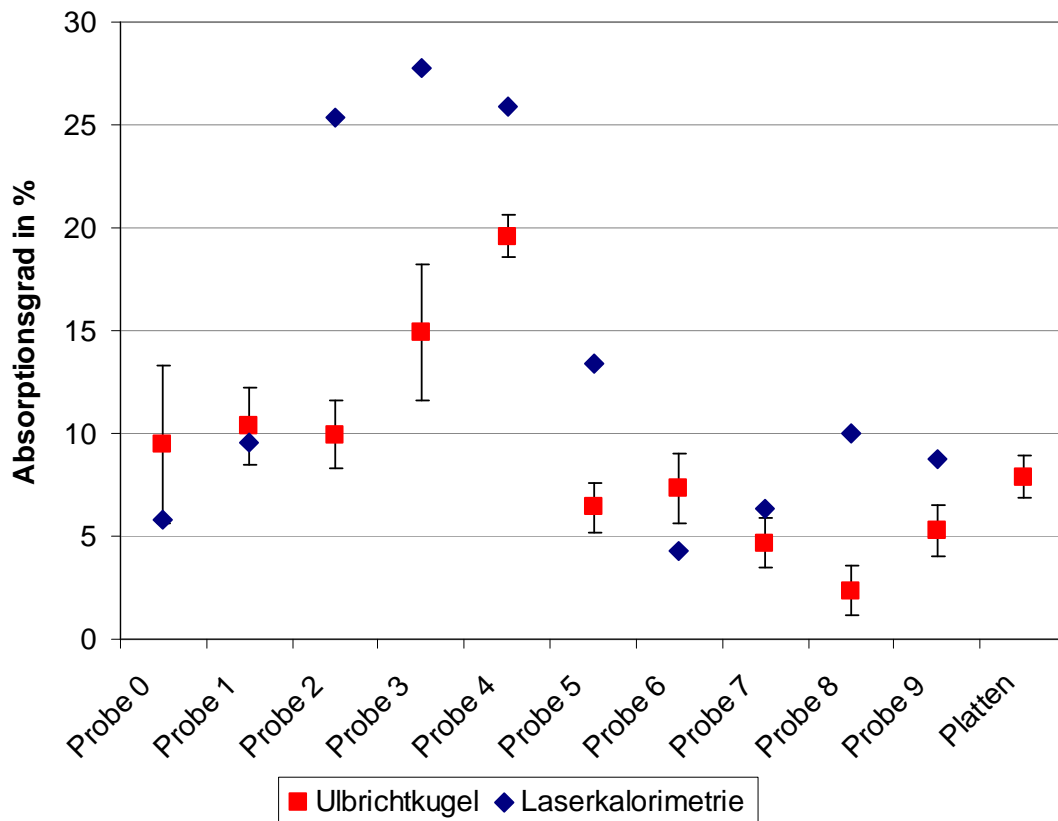


Abbildung 22: Absorptionsgrad der Proben mit 2 verschiedenen Messverfahren

In der Abbildung 22 sind die gemessenen Absorptionsgrade der einzelnen Proben mit den zwei verwendeten Messverfahren dargestellt. Bei der Messung mit der Ulbrichtkugel ist zusätzlich die Messung von dem Plattenmaterial mit nicht oxidierte Oberfläche dargestellt, mit dem die Schweißversuche gemacht wurden. Die Messung mittels der Laserkalorimetrie ist aufgrund der erheblichen Unsicherheit der Messung nur zum Vergleich eingefügt. Es ist erkennbar, dass zwischen den unterschiedlichen Anlauffarben der Absorptionsgrad erheblich variiert. Ab Probe 5 befindet sich der Absorptionsgrad aber im normalen Bereich für Kupfer. Hinsichtlich der Rauigkeit, die unter 4.1 betrachtet wurde, zeichnet sich keine erkennbare Tendenz zwischen den Proben 1, 2, 3, 8 und 0, 4, 5, 6, 7, 9 ab. Somit ist, wie vermutet der Einfluss der Rauigkeit viel kleiner als der der Anlauffarben.



## **4.2 Schweißbarkeit von Kupfer**

### **4.2.1 Machbarkeitsversuche mit den ausgewählten Lasersystemen**

#### **CO<sub>2</sub>-Slab-Laser von ROFIN (DC 040 W )**

Um die Kupferspiegel wegen der hohen zu erwartenden Rückreflexion nicht zu gefährden, wurde unter einem Winkel von 15° zur senkrechten Position eingestrahlt. Das geschah durch einen automatisch schwenkbaren Laserkopf. Ab einer Vorschubgeschwindigkeit von 150 mm/min hat der Tiefschweißeffect eingesetzt. Mit höheren Geschwindigkeiten war kein Einkoppeln des Laserstrahls zu erreichen. Die Nahttiefe hat zwischen 1 mm und 2 mm geschwankt. Gleichzeitig war die Nahtqualität durch Löcher und starke Oxidation sehr schlecht. Bei dem Einsatz von Schutzgas hat der Laserstrahl nicht mehr eingekoppelt. Da der Laser schon an seiner Leistungsgrenze betrieben wurde, war keine weitere Variation der Parameter möglich, weil dafür eine höhere Laserleistung erforderlich ist. Es erfolgte auch ein sehr hoher Wärmeeintrag, was auch die Oxidation und die Anlauffarben erkennbar machen. Damit konnte auch hier das Bearbeitungsziel nicht erreicht werden (Abb.21). Durch den Einsatz von höheren Intensitäten als bei der verwendeten Laseranordnung möglich sind, können somit auch größere Vorschübe erreicht werden. Das verbessert folglich die Nahtqualität durch eine kürzere Wechselwirkungszeit mit dem Material. Es ist aber fraglich ob damit auch geringe Einschweißiefen erzielt werden können, da durch den starken Anstieg der Absorption beim Einkoppeln des Laserstrahls die Einschweißtiefe schnell größer wird. Damit wird auch der Schweißprozess bei kleinen Tiefen anfällig auf kleine Schwankungen der Ausgangsbedingungen. Es ist dabei noch zu beachten, dass bei steigenden Intensitäten die Plasmaabsorption zunimmt, wodurch der Schweißprozess ab einem Grenzwert abbricht und Plasmaabschirmung eintritt. Dieser ist aber neben dem Material auch von der eventuellen Verwendung von Schutzgas abhängig.

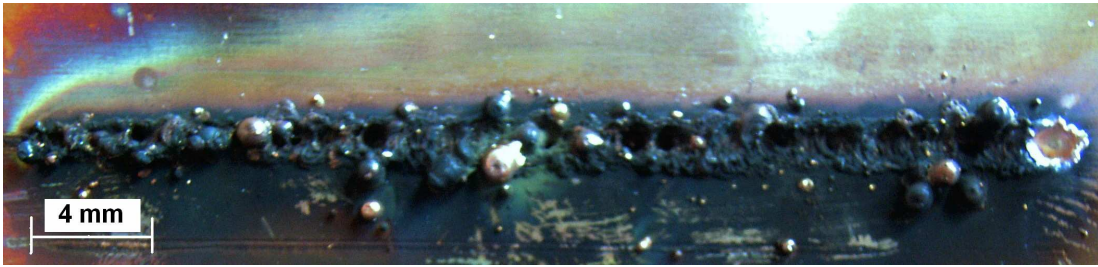


Abbildung 23: Schweißnaht mit CO<sub>2</sub>-Laser: P=3,75kW, f=50Hz, v=150mm/min

### **Scheibenlaser von TRUMPF (HLD4002)**

Oberhalb einer Laserleistung von 2,5 kW setzte der Tiefschweißeffekt ein bzw. der Laserstrahl koppelte ein. Jedoch wurde für die geforderte Einschweißtiefe erst ab 2,85 kW eine ausreichende Nahtqualität erzeugt. Durch die maximale Laserleistung von 3,8 kW konnten auch Versuche mit leichter Defokussierung durchgeführt werden. Der Einsatz einer Fokussierlinse mit 200 mm Brennweite war jedoch nur bei den Blechen mit einem Vorschub unter 2,5 m/min möglich.

### **Faserlaser von IPG (YLR1500)**

Hier wurde auch unter einem Winkel von 10° zur Senkrechten eingestrahlt um den Laser bzw. die Faser nicht zu gefährden. Das geschah durch den manuell schwenkbaren Laserkopf. Der geringe Winkel war durch den Crossjett mit Kupferblende möglich, die einen geringeren Durchmesser als die Fokussieroptik hatte. So verhinderte die Blende, dass der Strahl in die Linse reflektiert wird ohne den einfallenden Laserstrahl zu beeinflussen. Bei diesem Laser ist zu bemerken, dass bei der maximal einstellbaren Laserleistung von 1500 W eine Laserleistung von 1700 W emittiert wird. Das ist auf eine falsche Einstellung bei der Wartung des Lasergeräts zurückzuführen, wodurch die Lebensdauer sinken kann. Demzufolge muss bei einer Anwendung ein Lasergerät mit einer größeren maximalen Laserleistung in Betracht gezogen werden. Das Einkoppeln des Laserstrahls erfolgte nur bei voller Laserleistung und knapp darunter. Dabei wurde eine ausreichend gute Nahtqualität erzeugt. Die weiteren Versuche erfolgten demzufolge nur mit maximaler Laserleistung.

### **Gepulster Nd:YAG -Laser von LUMONICS (JK 701)**

Das Schweißen war in einem Bereich der Pulslänge von 3 ms bis 10 ms möglich, was der Leistungsgrenze entspricht. Unter 3 ms wurde mehr abgetragen als geschweißt. Die Frequenz richtete sich eher nach der Pulsenergie, da bei geringeren Frequenzen die Pulsenergie höher gewählt werden kann bis die Leistungsgrenze erreicht wird. Für die geforderte Einschweißtiefe war die Nahtqualität ausreichend. Bei der gleichen Pulsenergie und unterschiedlicher Pulsfrequenz (5Hz und 10 Hz) traten leicht unterschiedliche Ergebnisse auf. Die geringere Frequenz erzielte größere Einschweißtiefen. Eine Erklärung dafür ist vielleicht eine veränderte Pulsform bei unterschiedlichen Frequenzen, was aber nicht gemessen wurde.

### **Gepulster Nd:YAG -Laser von LASAG (KLS 246)**

Dieser Laser wird in der Regel zum Schneiden verwendet und konnte aber durch die Vergrößerung der Resonatorlänge auch zum Schweißen verwendet werden. Durch die freie Strahlführung mittels Spiegel ist der Laser auch relativ unempfindlich gegen Rückreflexion und hat eine relativ gute Strahlqualität. Die Pulsenergie durfte aber, aufgrund der eingesetzten Optik, 3 J nicht überschreiten. Dennoch war es aufgrund des kleinen Fokusbereichs möglich eine Schweißnaht zu erzeugen. Es wurde aber nur eine Einschweißtiefe von weniger als 100 µm bei einer Nahtbreite von 250 µm erreicht. Somit kann davon ausgegangen werden, dass nur eine Wärmeleitschweißung erfolgte. Das Bearbeitungsziel von 0,5 mm Einschweißtiefe konnte durch die geringe Pulsenergie nicht erreicht werden.

## **4.2.2 Nahtqualität**

Die Prüfung der Nahtqualität erfolgte nur optisch, da keine speziellen Anforderungen an die Naht gestellt wurden und der Aufwand zu groß ist. Die optische Nahtqualität der Schweißnähte bei den für die Auswertung verwendeten Parametern entsprach etwa den Abbildungen 22 und 23. Es wurde darauf geachtet dass keine Risse, Löcher, deutliche Nahteinfälle und schwarzes Oxidationen auftreten. Die Nahteinfälle waren dabei immer kleiner als 50 µm und die Aufwürfe kleiner als 150 µm.

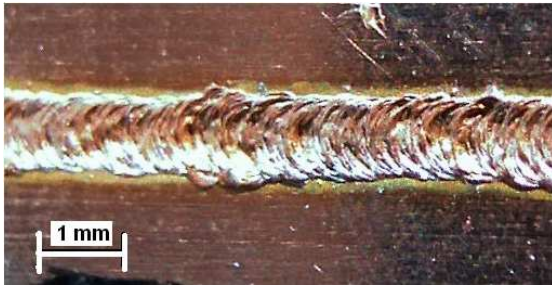


Abbildung 24: CW - Schweißnaht



Abbildung 25: PW -Schweißnaht

In den Abbildungen 24 und 25 beträgt die Nahtbreite ca. 1 mm. Bei den CW-Schweißnähten ist die Schweißnaht wesentlich ebener und gleichmäßiger als bei den Pulsnähten. Die typisch geriffelten Unebenheiten der Pulsnähte entstehen durch das Aneinanderreihen von Einzelpulsen. Die dennoch leicht wellige Nahtoberfläche bei den CW-Schweißnähten ist ein Resultat von Strömungen in der Schmelze.

Die Nahtqualität bei den Blechen war im Allgemeinen etwas besser als bei den Platten. Durch mindestens zwei verschiedene Querschliffe je Naht wurde festgestellt, dass die Einschweißtiefe um maximal 0,1 mm schwankt.

Für das CW - Schweißen von Kupfer wurde festgestellt, dass eine akzeptable Nahtqualität nur in einem bestimmten Bereich der Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden kann. Dieser Bereich wird mit zunehmender Leistung größer und bei zu geringer Leistung verschwindet er. In Abbildung 26 wird dies am Beispiel des Scheibenlasers deutlich. Hier wurde mit 3 kW Laserleistung, mit Vorschüben von 1, 2, 3, 4 und 5 m/min (von links) und mit 6mm dickem Material gearbeitet.



Abbildung 26: Schweißnähte mit Scheibenlaser,

Bei zu geringer Geschwindigkeit entstehen durch die relativ lange Verweildauer Löcher, Aufwürfe, Vertiefungen, Poren und schwarzes Oxid (Abb.26). Zu hohe

Geschwindigkeiten bewirken, dass der Laserstrahl später oder gar nicht einkoppelt. Mit einer kurzen Wartezeit am Nahtanfang kann das spätere Einkoppeln bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden. Unter 5m/min Vorschub steigt auch die Tiefe während des Schweißvorgangs merklich an. Das kann auch mit dem Laserhärten vom Stahl verglichen werden. Dort wird bei zu geringen Vorschubgeschwindigkeiten die erforderliche Härte nicht erreicht (zu geringer Wärmestau bzw. zu geringe Abkühlgeschwindigkeit) und bei zu hohen Vorschubgeschwindigkeiten nicht genügend erwärmt um über die Umwandlungstemperatur des Werkstoffs hinweg zu kommen.

Beim Pulsschweißen wird eine akzeptable Nahtqualität im Vergleich zum CW - Schweißen nur in einem bestimmten Bereich der Pulslänge erreicht. Der Bereich der Pulsspitzenleistung bzw. Pulsenergie mit akzeptabler Qualität verschiebt sich mit länger werdenden Pulsen zu höheren Werten und wird dabei auch größer.

### **4.2.3 Bauteilgeometrie**

#### Laserschweißen von Kupferblechen:

Durch Wärmestau auf der Unterseite und den geringen Materialquerschnitt, durch den die Wärme abgeleitet wird, heizt sich das Material stark auf. Das bewirkt eine höhere Absorption, da die Absorption mit steigender Temperatur auch ansteigt. Die Naht verbreitert sich durch geringere Wärmeableitung als beim vollen Material und Löcher können leichter durch Überhitzung der Schmelze auftreten. Es verlängert sich auch die Zeit, in der das Material flüssig ist, wodurch eine bessere Nahtqualität entstehen kann. Weiterhin kommt es leichter zur Verformung des Materials als bei stabileren Geometrien, was aber stark von der Nahtlänge und der Nahtposition abhängt. Leichte Verformungen können bei hohen Strahldivergenzen eine relevante Vergrößerung des Fokusedurchmessers durch Defokussierung hervorrufen, was Auswirkungen auf die Intensität des Laserstrahls hat. An den Rändern von Blechen tritt erhöhter Wärmestau auf und die Materialtemperatur nimmt stärker zu und beeinflusst dadurch den Schweißprozess erheblich.

### Laserschweißen von Kupferplatten:

Bei den Kupferplatten ist die Materialdicke viel größer als die Einschweißtiefe. Dadurch kühlt sich die Kupferschmelze schneller ab als bei den dünneren Blechen. Das führt beim Pulsschweißen zu einer etwas unebeneren Schweißnaht und erfordert größere Pulslängen. Eine größere Oberfläche der Schmelze im Verhältnis zu ihrem Volumen bei schmalen Schweißnähten bewirkt eine erheblich schnellere Abkühlung. Dieser Effekt wird bei den dickeren Platten durch eine bessere Wärmeableitung im Gegensatz zu den Blechen noch verstärkt.

## **4.3 Energieverbrauch**

Der Energieverbrauch der Lasergeräte und der Kühler wird getrennt betrachtet, weil die verwendeten Kühler für den Betrieb von gleichzeitig mehreren Lasergeräten ausgelegt sind. Damit ist es nicht möglich den Energieverbrauch für eine Anwendung mit einem Lasergerät mit dem zugehörigen Kühler genau zu bestimmen.

In erster Linie werden hier die drei verschiedenen Lasergeräte betrachtet bei denen das Laserschweißen mit einer ausreichenden Nahtqualität möglich war. Diese werden hinsichtlich des Energieverbrauchs zuerst allgemein miteinander verglichen. Danach erfolgt der Vergleich der verschiedenen Parametervarianten jeweils bei den zwei verschiedenen Betriebsarten.

### 4.3.1 Allgemeiner Energieverbrauch / Wirkungsgrade der Lasergeräte

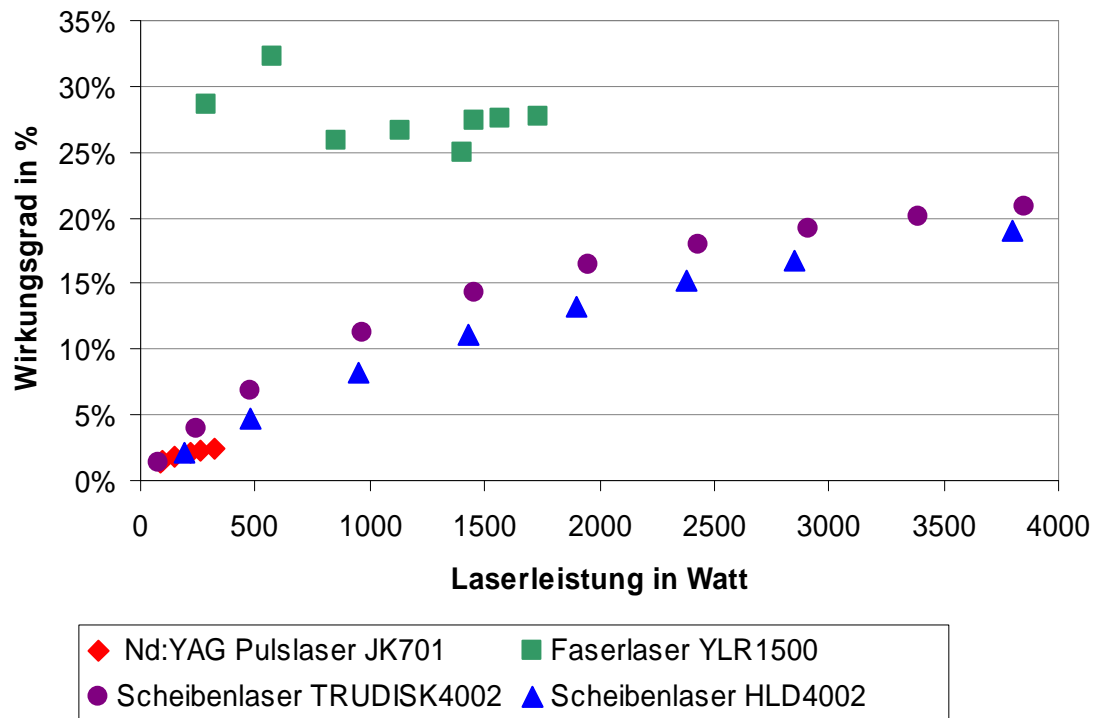


Abbildung 27: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Laserleistung bei den verschiedenen Lasergeräten

Für die Berechnung des Wirkungsgrades wurde der Quotient aus gemessener Laserleistung und aufgenommener elektrischer Leistung verwendet. Die Standardabweichung der einzelnen Messwerte ist geringer als 0,1%. Wie zu erkennen ist, haben die Scheibenlaser (HLD4002 und TRUDISK4002) und der gepulste Nd:YAG Laser (JK704) einen kontinuierlich ansteigenden Wirkungsgrad und sind damit bei voller Auslastung am effizientesten. Das neue und verbesserte Modell des Scheibenlasers TRUDISK4002 hat gegenüber dem Vorgängermodell HLD4002 einen leicht höheren Wirkungsgrad und einen steiler ansteigenden Verlauf des Wirkungsgrads. Der Multimode Laserlaser (YLR1500) hat über seinen gesamten Leistungsbereich einen relativ gleich bleibenden Wirkungsgrad. Die auftretenden Schwankungen sind schwer erklärbar, wurden aber auch bei früheren Messungen festgestellt. Da diese Schwankungen bei einem vergleichbaren Laser (z.B. YLR2000) nicht auftreten, ist die Ursache bei diesem speziellen Laser zu suchen. Eine Ursache kann das

Ersetzen von kaputten Pumpmodulen durch neue, effizientere sein, was bei diesem Laser schon geschehen ist.

### **Verbrauch im Bereitschaftsmodus**

<u>Lasengerät</u>	<u>Aufgenommene Wirkleistung</u>
Faserlaser YLR1500	0,15 kW
Scheibenlaser TRUDISK4002	5,01 kW
gepulster Nd:YAG-Laser JK704	Leistung während der Bearbeitung

Dieser Energieverbrauch ist neben dem Verbrauch im Bearbeitungsprozess nicht zu vernachlässigen. Er kommt vor allem bei längeren Positionierzeiten bzw. Zeiten zwischen den Schweißprozessen zum Tragen. Ebenso beim Pulsschweißen für die Zeit zwischen den Pulsen. Beim Faserlaser ist der Energieverbrauch besonders gering gegenüber dem Scheibenlaser. Ein Grund für diesen Unterschied ist der innere Kühlkreislauf des Scheibenlasers, der natürlich einen höheren Grundverbrauch erzeugt. Der Faserlaser hat keinen internen Kühlkreislauf, ist aber an einen zusätzlichen Wasser-Wasser-Kühler mit einem separaten Stromanschluss angeschlossen. Der ist wiederum an einen großen Kühlkreislauf mit einem Wasser-Luft-Kühler angeschlossen an den auch der Scheibenlaser angeschlossen ist. Der Wasser-Wasser-Kühler kann aber zum Beispiel bei Einbindung eines einzigen Lasers in einer Fertigungsanlage durch einen Wasser-Luft-Kühler ersetzt werden. Der gepulste Nd:YAG-Laser JK704 hat auch einen internen Kühlkreislauf aber die Laserpulse werden während Bearbeitungspausen in einem Absorber bzw. Shutter vernichtet.



### 4.3.2 Parametervariation

In den folgenden Tabellen 7 bis 11 sind die Leistungsaufnahme des Lasergerätes, der Energieverbrauch auf 1 Meter Nahtlänge und die Breite der Schweißnaht für die verschiedenen Varianten der Parameter (Punkt 3.4) und des Materials dargestellt (Punkt 3.3). Die Nahtbreite spielt hier eine untergeordnete Rolle, weil die Einschweißtiefe für die Fertigung wichtiger ist. Für Toleranzen des Fügespalts, die in dieser Arbeit aufgrund der Aufgabenstellung nicht betrachtet wurden, ist die Bedeutung größer. Beim Nahtschweißen im CW -Betrieb wurden die Laserleistung und die Vorschubgeschwindigkeit variiert. Bei dem Pulsnahtschweißen wurden Pulsenergie und Pulslänge variiert. Die Laserleistung ist beim Pulsnahtschweißen mit den CW -Lasern zusätzlich angegeben weil darüber die Pulsenergie der Rechteckpulse bestimmt wurde. Die variierten Parameter bilden jeweils eine feste Kombination, mit der das Vergleichskriterium 0,5 mm Einschweißtiefe bzw. eine Durchschweißung bei den Blechen erzielt wurde. Zu den Tabellen wurden noch Kommentare zur Nahtqualität und besonderen Gegebenheiten hinzugefügt. Es sind in den Tabellen jedoch nur die Parameterkombinationen dargestellt, bei denen auch eine ausreichende Nahtqualität im Bezug auf Punkt 4.2.2 erzielt wurde. Anschließend werden die Energieverbrauchswerte auf 1 Meter Nahtlänge hinsichtlich der Betriebsart und den verschiedenen Parametern miteinander verglichen.

#### Abkürzungen in den Tabellen:

B.....Nahtbreite  
E-1m.....Energieverbrauch auf 1m Nahtlänge  
P.....Laserleistung  
P-In.....Leistungsaufnahme des Lasers  
W.....Pulsenergie  
 $T_{th}$ .....Pulslänge  
 $f_p$ .....Pulsfrequenz  
v.....Vorschubgeschwindigkeit

## Scheibenlaser – TRUDISK4002 (TRUMPF)

### CW Betrieb:

Material	P in W	v in m/min	P-In in W	E-1m in kWh	B in mm
Platte	2850	7	15202	0,0362	0,9
	3800	11	18524	0,0281	0,9
Blech rot	2850	8	15202	0,0317	0,8
	3800	12	18524	0,0257	0,8
Blech gelb	2850	8,5	15202	0,0298	0,8
	3800	12,5	18524	0,0247	0,8
Blech rot *	3800	2	18524	0,1544	1,25
Blech gelb*	3800	2,5	18524	0,1235	1,2

**Tabelle 7: Werte Scheibenlaser – TRUDISK4002 im CW- Betrieb**

Die mit „\*“ gekennzeichneten Materialien wurden mit der Brennweite 200 mm bzw. mit einem Strahldurchmesser von 400 µm bearbeitet. Dort erwärmte sich das Blech stark, so dass die Naht im Verlauf leicht breiter wurde und das Blech sich deutlich verzog. Die Oberflächenbeschaffenheit der Nähte ist relativ glatt und annähernd eben. Damit der Laserstrahl am Beginn der Naht sicher einkoppelt, wurde eine nach Freigabe des Laserstrahls eine Verweildauer von ca. 10 ms eingefügt. Ohne diese Verweilzeit hat der Laserstrahl erst nach ca. 2mm Verfahrensweg eingekoppelt. Es wurde auch festgestellt, dass die Einschweißtiefe bei Vorschubgeschwindigkeiten unter ca. 5 m/min während des Schweißprozesses merklich ansteigt. Durch Rampen der Laserleistung kann dem entgegengewirkt werden.

### Rechteckpulse :

Material	P in W	T <sub>th</sub> in ms	f <sub>p</sub> in Hz	W in J	P-In in W	E-1m in kWh	B in mm
Platte	2375	13	20	30,88	6.929,12	0,3039	0,6
	2850	8	20	22,8	6.374,97	0,2656	0,7
	3800	4	20	15,2	5.849,54	0,2566	0,6
	3800	5	10	19	5.715,07	0,3810	0,7
Platte, 1,5mm defokussiert	3800	8	20	30,4	6.968,21	0,3056	0,8
Blech rot	2850	7	20	19,95	6.323,45	0,2773	0,7
	3800	3	20	11,4	5.763,22	0,2528	0,6
Blech gelb	2850	6	20	17,1	6.139,85	0,2693	0,7
	3800	3	20	11,4	5.758,28	0,2526	0,7

**Tabelle 8: Werte Scheibenlaser - TRUDISK4002 mit modulierten Rechteckpulsen**

Die Struktur der Nahtoberfläche bei der Platte ist rau aber eben, nur bei 4 ms Pulslänge traten leichte Wellen und Vertiefungen auf. Bei den Blechen ist die Oberfläche pulснаhttypisch wellig aber eben. An der Unterseite der Bleche trat teilweise eine leichte schwarze Oxidbildung auf.

Durch Defokussieren um 1 mm trat noch keine Änderung der Nahtgeometrie ein und über 1,5 mm war kein Tiefschweißprozess mehr möglich. Beim Einsatz von Schutzgas Helium bzw. Stickstoff mit 20 l/min erfolgte kein Einkoppeln des Laserstrahls mehr.

## Faserlaser - YLR 1500 (IPG)

Um die Faser durch hohe Rückreflexion nicht zu gefährden wurde auch hier unter einem Winkel von 10° zur Senkrechten eingestrahlt.

### CW –Betrieb:

Material	P in W	v in m/min	P-In in W	E-1m in kWh	B in mm
Platte	1.730	4,5	6.239,82	0,0231	0,6
Blech	1.730	9	6.239,82	0,0116	0,6

Tabelle 9: Werte Faserlaser YLR1500 im CW- Betrieb

### Rechteckpulse:

Material	P in W	v in m/min	T <sub>th</sub> in ms	f <sub>p</sub> in Hz	W in J	P-In in W	E-1m in kWh	B in mm
Platte	1.730	0,15	9	10	15,57	694,10	0,0771	0,4
gelbes Blech	1.730	0,3	5	20	10,38	876,93	0,0487	0,6
rotes Blech	1.730	0,3	6	20	12,11	998,82	0,0555	0,6

Tabelle 10: Werte Faserlaser YLR1500 mit modulierten Rechteckpulsen

Als Pulsform im gepulsten Betrieb wurden wie beim Scheibenlaser Rechteckpulse verwendet. Für die Rechteckpulse wurde die Leistungsaufnahme aus den Messungen im CW –Betrieb zusammengesetzt und berechnet. Zwischen der Messung und Berechnung der Leistungsaufnahme des Scheibenlasers (TRUDISK4002) im Pulsbetrieb mit Rechteckpulsen wurde nur eine Abweichung von maximal 4% ermittelt. Daher sind die berechneten Werte des Faserlasers (YLR1500) ausreichend genau.

### Qualität

Bei der Platte traten im CW- Betrieb leichter Nahteinfall und unregelmäßig kleine Löcher auf. Die gepulsten Schweißnähte auf der Platte sind relativ rau, aber eben. Weiterhin sind die CW- Schweißnähte auf den Blechen glatt und eben, wobei die gepulsten Schweißnähte wiederum rau aber eben sind. Bei der Verwendung von Helium als Schutzgas wurde eine Strahleinkopplung, mit einem Volumenstrom von 5 l/min erst mit einem Vorschub von weniger als 1 m/min erreicht. Die Nahtqualität war dadurch auch sehr schlecht.

## LUMONICS – JK701 (gepulster Nd:YAG Laser, lampengepumpt)

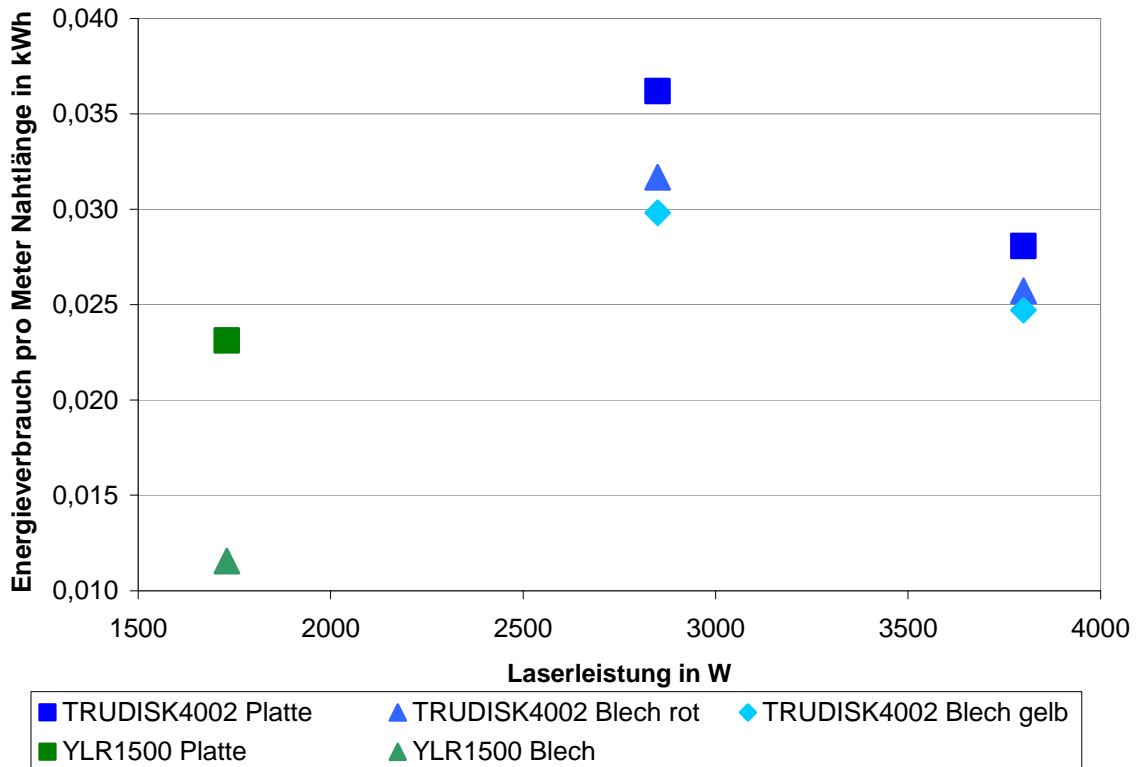
Material	Th in ms	W in J	f <sub>p</sub> in Hz	v in m/min	E_In in W	E 1m in kWh	B in mm
Platte	3	20	10	0,15	9.784	1,09	0,5
	4	25	10	0,15	11.203	1,24	0,5
	5	30	10	0,15	12.423	1,38	0,5
	6	27	5	0,075	7.500	1,67	0,7
	7	29	5	0,075	8.100	1,80	0,8
	8	38	5	0,075	10.037	2,23	1,0
Blech	2	15	10	0,15	8.287	0,92	0,9
	3	20	10	0,15	9.784	1,09	0,9
	4	27,5	10	0,15	11.794	1,31	0,9
	5	27,5	10	0,15	11.933	1,33	0,9
	6	30	5	0,075	8.093	1,80	1,1
	7	35	5	0,075	8.813	1,96	1

Tabelle 11: Werte gepulster Nd:YAG Laser - JK701 (LUMONICS)

Eine Pulsfrequenz von 20Hz und Pulsdauern im ms Bereich konnte durch die zu hohe erforderliche mittlere Leistung nicht erzeugt werden. Bei den Blechen wurden keine deutlichen Unterschiede zwischen rötlicher und gelblicher Anlaufarbe festgestellt. Die Nahtoberfläche der Platten ist rau, eben und ohne Löcher. Bei den Blechen entstanden eine der Pulsüberlappung entsprechende Riffelung, teilweises Durchhängen der Naht und leichte schwarze Oxidationserscheinungen an der Nahtunterseite.

### Vergleich des Energieverbrauchs im CW -Betrieb

Bei diesem Vergleich sind die Verbrauchswerte für Bleche und Platten dargestellt um zusätzlich Betrachtungen zum Material mit einfließen zu lassen. Durch eine unterschiedliche Materialdicke soll auch der Einfluss dieser auf den Energieverbrauch nachgewiesen werden. Improvisationen können auch eine Chance sein, die Bewertung zu vergrößern.



**Abbildung 28: Energieverbrauch der Lasergeräte im CW - Betrieb in Abhängigkeit von der Laserleistung**

In der Abbildung 28 ist zu erkennen, dass beim Scheibenlaser (TRUDISK4002) mit höherer Laserleistung der Energieverbrauch generell kleiner ist und der Unterschied zwischen den einzelnen Materialvarianten auch kleiner wird. Der geringere Verbrauch bei höherer Laserleistung ist mit dem besseren Wirkungsgrad und der kürzeren Verweildauer, durch welche die Wärmeleitung an Einfluss verliert, zu erklären. Auch der geringere Unterschied zwischen Platte und Blech ist mit dem geringeren Einfluss der Wärmeleitung durch kürzere Verweildauer zu verbinden. Gleichzeitig wird auch der Unterschied zwischen den Anlauffarben der Bleche mit größerer Laserleistung geringer. Damit ist darauf zu schließen, dass der Einfluss der Anlauffarben mit steigender Intensität des Laserstrahls abnimmt. Deshalb ist auch beim Faserlaser (YLR1500) kein Unterschied zwischen den Anlauffarben mehr festzustellen, weil hier die Intensität durch den kleineren Fokusbereich noch höher liegt. Der große Unterschied zwischen Platte und Blech kann beim Faserlaser (YLR1500) auf die große Oberfläche der Schmelze im Verhältnis zu deren Volumen zurückgeführt werden, da die Nähte nur etwa halb so breit sind als die vom Scheibenlaser (TRUDISK4002). Daher haben die Wärmeleitung und damit

auch die Dicke des Materials wiederum einen größeren Einfluss. Dadurch wird auch der geringere Energieverbrauch durch die schmalen Nähte beim Plattenmaterial wieder kompensiert.

### Vergleich des Energieverbrauchs im PW -Betrieb

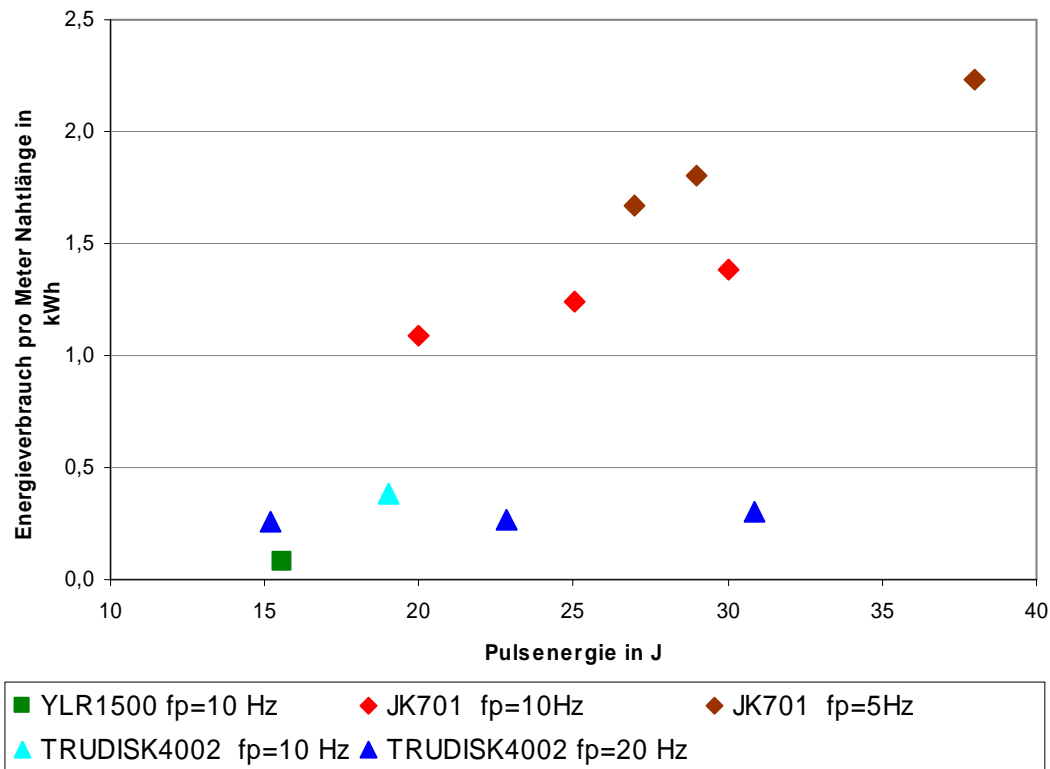


Abbildung 29: Energieverbrauch der Lasergeräte im PW - Betrieb in Abhängigkeit von der Laserleistung beim Plattenmaterial

In der Abbildung 29 ist zu erkennen, dass die kleinsten Pulsenergien der verschiedenen Lasergeräte auch den geringsten Energieverbrauch haben. Das entspricht auch einer hohen Pulsspitzenleistung und einer kurzen Pulsdauer. Kleinere Pulsfrequenzen haben einen deutlich höheren Energieverbrauch, was durch die längere Zeit zwischen den Pulsen verursacht wird. Denn in dieser Zeit ist das Lasergerät nicht komplett aus und braucht Energie, die nicht für die Bearbeitung benutzt wird. Beim Puls laser (JK701) ist auch ein deutlich größerer Anstieg des Energieverbrauchs bei 5 Hz Pulsfrequenz gegenüber 10 Hz zu erkennen. Der Energieverbrauch beim Laserschweißen des Blechmaterials ist nicht mit dargestellt, weil er sich kaum von dem beim Plattenmaterial unterscheidet. Die Pulsenergien sind aber bei den Blechen teilweise andere. Nur beim Faserlaser (YLR1500) ist der Energieverbrauch ein Drittel geringer als

bei dem Plattenmaterial, was wie beim CW- Schweißen durch die schmalen Nähte erklärt werden kann. Generell ist der Unterschied des Energieverbrauchs zwischen den Lasergeräten vom Wirkungsgrad bestimmt. Trotz ähnlichem Wirkungsgrad bei den eingesetzten Laserleistungen hat der Scheibenlasers (TRUDISK4002) gegenüber dem Faserlaser (YLR1500) einen deutlich höheren Energieverbrauch. Das ist mit dem schlechten Wirkungsgrad des Scheibenlasers bei geringer Laserleistung zu erklären, da der Laser zwischen den einzelnen Pulsen mit der kleinstmöglichen Laserleistung betrieben wird. Der Faserlaser (YLR1500) hat dagegen bei niedrigen Leistungen immer noch einen hohen Wirkungsgrad.

### 4.3.3 Einfluss der Anlauffarben

In der Abbildung 30 ist der Einfluss der Anlauffarben auf die Parameter Vorschub und Pulsenergie dargestellt. Das gelbliche Blech hatte eine Absorption von 15% und das rötliche von 5% (Messung unter 4.1.3).

Lasergerät	Laserleistung	<u>Nahtschweißen</u> (CW-Betrieb)		<u>Pulsnahtschweißen</u> (gepulster Betrieb)	
		Vorschub in m/min		Pulsenergie in J	
		gelbliches Blech	rötliches Blech	gelbliches Blech	rötliches Blech
Scheibenlaser	P=3,8 kW	12,5	12	11,4	11,4
	P=2,85 kW	8,5	8	17	20
Faserlaser	P=1,7 kW	9	9	10,4	12,1
gepulster Nd:YAG -Laser	$P_{\max}=7,5$ kW	/	/	15	15

**Tabelle 12: Einfluss der Anlauffarben auf die Parameter**

Der Unterschied der Vorschubgeschwindigkeit beim Nahtschweißen im CW - Betrieb ist eher vernachlässigbar gering und wurde beim Vergleich des Energieverbrauchs im CW -Betrieb unter Punkt 4.3.2 schon näher diskutiert. Im gepulsten Betrieb ist beim gepulsten Nd:YAG –Laser generell kein Unterschied zu erkennen. Bei dem gepulsten Betrieb des Faserlasers und des Scheibenlasers sind Unterschiede zu erkennen, die jedoch bei hoher Laserleistung (3,8 kW) verschwinden. Das liegt an dem schnelleren Erhitzen



des Materials bei höheren Laserleistungen, wo die Anlauffarbe nach kürzerer Zeit durch das Schmelzen des Kupfers ihre Wirkung verliert. Generell kann somit gesagt werden, dass der Einfluss der Anlauffarben eher gering ist, weil diese sich durch das Erhitzen bzw. Schmelzen des Materials schnell auflösen. Gleichzeitig trifft bei einer Pulsnaht mit 60% Pulsüberlappung der Laserpuls nur noch auf 40% seines Strahlflecks auf die Anlauffarbe. Beim CW –Schweißen werden die Absorptionsbedingungen durch die vorauseilende Wärmewelle schon so geändert, dass dort so gut wie kein Einfluss mehr erkennbar ist.

#### **4.3.4 Messung des Energieverbrauchs der Kühlung**

Um den Energieverbrauch der Kühlung vermessen zu können, muss ein Kühlaggregat an nur ein Lasergerät angeschlossen sein. Das ist bei Fertigungsanlagen mit integrierten Lasersystemen für die Industrie eher der Normalfall. Bei den für die Versuche verwendeten Lasergeräten ist das nicht so, da diese sich in einer Laserabteilung mit mehreren Lasergeräten befinden, die alle an einen großen Kühler angeschlossen sind. Diese Variante ist an dieser Stelle preisgünstiger und effektiver. Deshalb wurden für die Messung alle anderen Geräte am Kühlkreislauf ausgeschaltet bzw. die Zuläufe verschlossen, so dass sich nur das zu vermessende Lasergerät am Kühlkreislauf befindet.

Zur Bestimmung des Energieverbrauchs für die Kühlung der Lasergeräte wurde bei dem lampengepumpten Nd:YAG -Laser (JK704) und dem Scheibenlaser (TRUDISK4002) die Leistungsaufnahme der jeweils vorhandenen Kühlaggregate von RIEDEL und KKT KRAUS aufgenommen. Weil ein Kühlkreislauf ein thermodynamisch träges System darstellt, muss die Messung über einen längeren Zeitraum erfolgen. Für einen bestimmten Zyklus fehlte eine konkrete Bearbeitungsaufgabe. Deshalb wurden die Lasergeräte im Dauerbetrieb über einen längeren Zeitraum betrieben. Beide Kühler kühlen Wasser gegen Luft und wurden bei ca. 20°C Umgebungstemperatur betrieben.

### Daten der Kühler:

Kühlerbezeichnung	RIEDEL PC05G	KKT KRAUS
gekühlter Laser	JK701	TRUDISK4002
Kühlleistung	23,5 kW	38 kW
Baujahr	1992	1994
Kältemittel	R22	R22

Tabelle 13: Zuordnung der Laser und Daten der Kühler

Die beiden Kühler sind durch das gleiche Kältemittel und ähnlichen technischen Stand (Baujahr) gut miteinander vergleichbar.

Die Leistungsaufnahme der Kühler wird von einer typischen Regelung bestimmt. Verdichter und Gebläse schalten ein, sobald eine eingestellte Kühlwassertemperatur überschritten ist und schalten sich beim Unterschreiten einer ebenfalls eingestellten Kühlwassertemperatur wieder aus. In Abbildung 30 ist das für den Kühler von RIEDEL dargestellt.

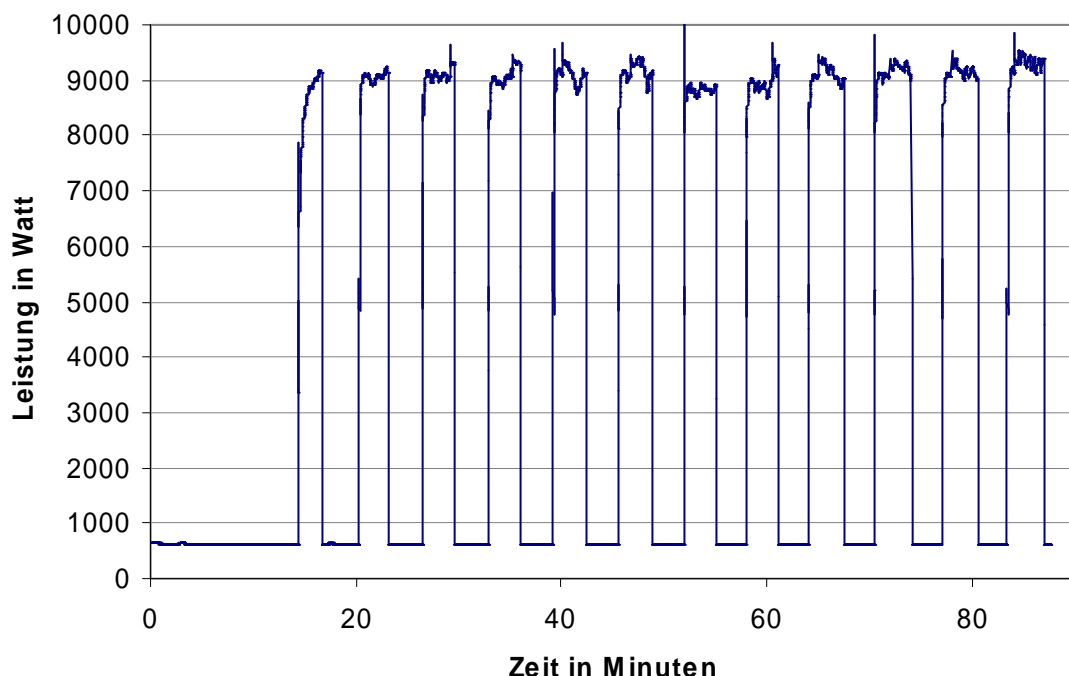


Abbildung 30: Wirkleistungsaufnahme des Kühlers PC05G von RIEDEL bei 300 W mittlerer Laserleistung des Nd:YAG Pulslasers JK701

Um die Wirkleistungsaufnahme der Kühler zu bestimmen wurde der Mittelwert über mehrere Regelungsintervalle gebildet. Es wurden die Intervalle

verwendeten, ab denen die Periodendauer annähernd gleich blieb und der Kreislauf sich in einer Art Gleichgewicht befand. Die erzeugte Laserstrahlung wurde mit einem Absorber vernichtet, der nicht im Kühlkreislauf eingebunden war. Bei dem Kühler PC05G von RIEDEL hat es etwa eine Stunde gedauert bis sich ein gleich bleibender, periodischer Verlauf der elektrischen Leistungsaufnahme eingestellt hat, da dieser vorher nicht in Betrieb war. Dagegen hat sich bei dem Kühler von KKT KRAUS schon nach ca. 15 Minuten das Gleichgewicht eingestellt. Die erheblich kürzere Zeit ist darauf zurückzuführen, dass der Kreislauf schon vorher mit einem anderen Kühler betrieben wurde und weitere zu kühlende Geräte angeschlossen waren. Die anderen Geräte wurden für die Messung ausgeschaltet und vom Kreislauf getrennt. Anstelle dieses Kühlers wurde der Kühler von KKT KRAUS angeschlossen. Somit musste nur der Kühler selbst auf Betriebstemperatur gebracht werden, was natürlich weniger Zeit in Anspruch nimmt als wenn der Kreislauf noch kalt wäre.

In den folgenden Tabellen 14 und 15 sind die Leistungsaufnahmen des Lasergerätes und des jeweiligen Kühlers bei Dauerbetrieb mit verschiedenen Laserleistungen dargestellt und zusammengefasst. Die Abwärmeleistung ist hier die aufgenommene Leistung des Lasergeräts abzüglich der emittierten Laserleistung. Das ist ein Näherungswert für die zu kühlende Wärmeleistung unter Vernachlässigung der immer vorhandenen Wärmeabgabe des Lasergeräts an die Umgebung.

#### **Scheibenlaser (TRUDISK4002) mit Kühler von KKT KRAUS**

CW Laserleistung	3.850 W	2.910 W
Leistungsaufnahme des Kühlers	7.940 W	7.332 W
Leistungsaufnahme des Lasers	18.524 W	15.202 W
Leistungsaufnahme Laser + Kühler	26.464 W	22.534 W
Wirkungsgrad Laser + Kühler	14,6%	12,9%
Abwärmeleistung	14.674 W	12.292 W
Verhältnis der Abwärmeleistung des Kühlers zur Leistungsaufnahme des Lasers	1,85	1,68

**Tabelle 14: Kühler KKT KRAUS mit 39 kW Kälteleistung in Verbindung mit Scheibenlaser TRUDISK4002**

### Lampengepumpter Nd:YAG Puls laser (JK701) mit Kühler von RIEDEL

Mittlere Laserleistung $P_{av}$	300 W	200 W	100 W
Leistungsaufnahme des Kühlers	5.267 W	4.466 W	3.365 W
Leistungsaufnahme des Lasers	12.414 W	9.594 W	6.682 W
Leistungsaufnahme Laser+Kühler	17.681 W	14.050 W	10.047 W
Wirkungsgrad Laser + Kühler	1,7%	1,4%	1%
Abwärmeleistung	12.104 W	9.394 W	6.582 W
Verhältnis der Abwärmeleistung des Kühlers zur Leistungsaufnahme des Lasers	2,3	2,1	1,96

Tabelle 15:Kühler PC05G von RIEDEL mit 23,5 kW Kälteleistung in Verbindung mit Lampengepumpten Nd:YAG Puls laser JK701

Bei 300 W mittlerer Laserleistung des gepulsten Lasers JK704 und 2910 W Laserleistung des Scheibenlasers TRUDISK4002 ist die Abwärmeleistung annähernd gleich. Wenn aber die Leistungsaufnahme der Kühler betrachtet wird, ist diese bei dem Kühler mit der größeren Kälteleistung aber deutlich höher. Damit würde bei der Verwendung von an den Laser angepassten Kühlern wesentlich weniger Energie verbraucht werden. Trotzdem wird die maximale Kühlleistung aus Sicherheitsgründen immer höher sein müssen als die zu kühlende Leistung bei maximaler Abwärme des Lasergerätes.

In Abbildung 32 ist eine Art Wirkungsgrad der Kühler dargestellt, in dem für die abgegebene Leistung die Kühlleistung eingesetzt wurde. Die Kühlleistung entspricht der in Tabelle 11/12 dargestellten Abwärmeleistung. Der Wert für die maximale Kühlleistung, laut Datenblatt, wurde noch hinzugefügt. Für die entsprechende maximale el. Leistungsaufnahme wurde ein Dauerbetrieb von Verdichter und Gebläse angenommen. Dafür wurde der Mittelwert aus den Zeiträumen mit maximalen Leistungsaufnahmen gebildet, was diesem Zustand entsprechen würde. Das ist somit ein guter Näherungswert.

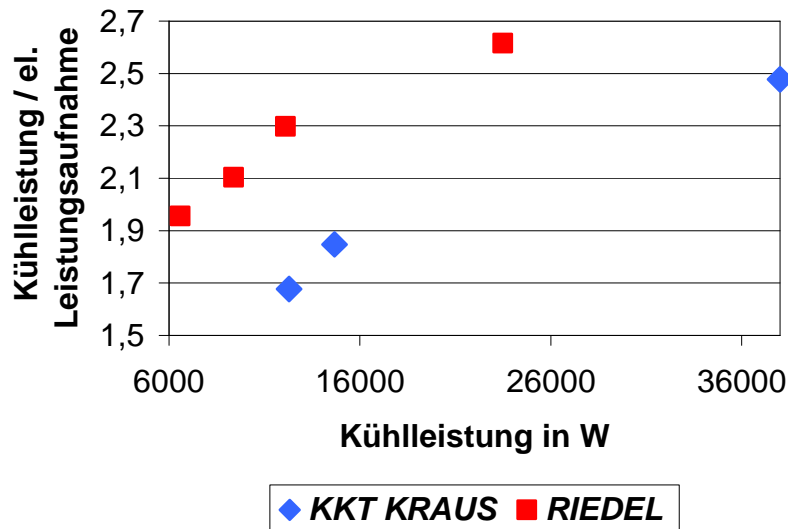


Abbildung 31: Verhältnis der Kühlleistung zur el. Leistungsaufnahme des Kühlers in Abhängigkeit der Kühlleistung

Das Verhältnis der Kühlleistung zu el. Leistungsaufnahme der Kühler nimmt offensichtlich mit geringerer Ausnutzung der maximalen Kühlleistung immer stärker ab. Dieser Verlauf ist mit dem Wirkungsgradverlauf des Scheibenlasers in Abbildung 27 vergleichbar. Demzufolge ist ein Kühler bei maximaler Auslastung am effektivsten.

## 5 Zusammenfassung

Hinsichtlich der Energieeffizienz beim Laserschweißen von Kupfer wurden in dieser Arbeit Scheibenlaser, Faserlaser und Lampengepumpter Nd:YAG Puls laser verglichen. Gleichzeitig wurde der Einfluss ausgewählter Laserparameter und technischer Parameter nachgewiesen. Es wurden dafür 0,5 mm tiefe Schweißnähte in 6 mm dicken Plattenmaterial und 0,5 mm dicken Blechen eingebracht. Der Energieverbrauch wurde mit entsprechenden Messgeräten separat aufgenommen.

Für die Auswahl des Lasergeräts kommen nur Laser mit einer ausreichend hohen Intensität, die von Kupfer absorbiert wird, in Frage. Dabei existiert nur ein schmales Parameterfenster, das zum Schweißen von Kupfer geeignet ist.

Bezüglich des Einflusses von Laserparametern und technischen Parametern auf die Schweißnahtqualität und den Energieverbrauch wurde folgendes festgestellt. Ein großer Vorschub verringert den Energieverbrauch und verbessert die Nahtqualität. Pulsnahtschweißen erhöht gegenüber dem Nahtschweißen mit kontinuierlicher Strahlung die Prozesssicherheit, die Welligkeit bzw. Rauheit der Naht und den Energieverbrauch. Eine Defokussierung und der Einsatz größerer Brennweiten der Fokussierlinse, die eine Vergrößerung des Laserstrahldurchmessers bewirken, waren wegen zu geringer verfügbarer Laserleistung kaum möglich. Hohe Laserleistungen begünstigen eine gute Nahtqualität und verringern den Energieverbrauch. Beim Pulsschweißen steigt die Nahtqualität mit größeren Pulslängen und dementsprechend höheren Pulsenergien und höheren Energieverbrauch. Eine höhere Pulswiederholrate verringert den Energieverbrauch hat aber kaum Einfluss auf die Nahtqualität.

Die Verwendung von Schutzgas bewirkt eine unregelmäßige Schweißnaht und verursacht einen höheren Energieverbrauch.

Die veränderten optischen Materialeigenschaften durch Bildung von Anlauffarben haben beim Laserschweißen von Kupfer im CW-Betrieb nur minimale Auswirkungen auf den Energieverbrauch, da sich diese nach kurzer Zeit der Laserstrahleinwirkung wieder auflösen. Im PW-Betrieb sind die Auswirkungen größer, da jeder neue Puls etwa zur Hälfte auf die unveränderte, kalte Oberfläche trifft.

Der Vergleich der Wirkungsgrade lieferte das Ergebnis, dass Faserlaser vor Scheibenlaser und lampengepumpter Nd:YAG -Laser am effizientesten sind. Dieses Ergebnis setzte sich auch beim Vergleich der lasergeschweißten Kupferproben bei gleicher Einschweißtiefe fort. Damit ist der Wirkungsgrad der einzelnen Lasergeräte für den Energieverbrauch beim Laserschweißen von Kupfer ausschlaggebend. Die Parametereinstellungen sind auch aufgrund der geringen Variationsmöglichkeiten weniger bedeutend. Die Möglichkeiten der Energieeinsparungen über die Parametervariation sind bei anderen Materialien vielleicht größer.

Die Auswahl der Lasergeräte für eine Fertigungsanlage hinsichtlich des Energieverbrauchs richtet sich in erster Linie nach dem zu schweißenden Material und den konkreten Anforderungen. Das entscheidet mit welchen Lasergeräten eine Bearbeitung möglich ist. Weiter wird das Gerät mit dem besten Wirkungsgrad ausgewählt. Dieses Lasergerät sollte dann noch im oberen Leistungsbereich betrieben werden. Damit werden die Anschaffungskosten gering gehalten und in dem Leistungsbereich mit den höchsten Wirkungsgraden gearbeitet. Beim Pulsnahtschweißen spielt der Energieverbrauch zwischen den Pulsen auch eine entscheidende Rolle.

Die Betriebskosten werden hauptsächlich durch die elektrische Leistungsaufnahme des Lasergerätes bestimmt. Durch Messungen des Energieverbrauchs der Kühleinrichtung ergab sich, dass dessen Stromverbrauch bei optimaler Anpassung an das Lasergerät am geringsten ist. Hier spielt auch der Wirkungsgrad des Lasergerätes eine relevante Rolle, denn je höher Abwärme desto höher der Energieverbrauch für die Kühlung. Der Energieverbrauch der Positioniereinrichtung wurde nicht untersucht.

In dieser Arbeit wurde nur eine begrenzte Anzahl von Parametern ausgewählt, welche für den Energieverbrauch relevant sind. Weitere Parameter die genauer untersucht werden sollten sind Strahlqualität, Fokusbereich, Pulsform, Pulsfrequenz und Fokusanzahl. Bezüglich der Strahlqualität kommt einem Monomode Faserlaser besondere Bedeutung zu. Der Energieverbrauch von der Positioniereinrichtung wurde bis jetzt noch nicht mit berücksichtigt gehört aber zu einer kompletten Anlage mit dazu. Ebenso können noch verschiedene Positioniersysteme (z.B. Scanner, fliegende Optik usw.) hinsichtlich des Energieverbrauchs bei verschiedenen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten untersucht werden. Der Schweißprozess ist durch die geringe Absorption von Kupfer sehr anfällig auf leichte Absorptionsschwankungen. Um diese auszugleichen wurden Lasersysteme entwickelt, die während des Schweißprozesses den Anteil der reflektierten Strahlung messen und auf Schwankungen sofort reagieren können. Die Anwendung dieses Systems könnte für das Schweißen von Kupfer sehr hilfreich sein.

## 6 Literaturverzeichnis

- [BIAS] Bremer Institut für angewandte Strahltechnik  
URL: [http://www.bias.de/Events/Archive/LAF06/Praesentationen/09\\_westphaeling.pdf](http://www.bias.de/Events/Archive/LAF06/Praesentationen/09_westphaeling.pdf)  
verfügbar am 18.11.2010, leicht verändert
- [DAUS] F. Dausinger: Strahlwerkzeug LASER :Energieeinkopplung und Prozesseffektivität, Stuttgart Teubner 1995
- [DAUS2] F. DAUSINGER: Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift 1995. Stuttgart, Teubner Verlag,1995.
- [DIN] DIN Taschenbuch 277, DIN EN ISO 11145:2001(D) Optik und optische Instrumente -Laser und Laseranlagen - Begriffe und Formelzeichen
- [EICHLER] Eichler, Jürgen; Eichler, Hans Joachim: Laser: Bauformen Strahlführung Anwendungen. -6. Auflage- Berlin: Springer, 2006
- [GREF] Dr.-Ing. Wolfgang Gref: Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik  
Herbert Utz Verlag GmbH  
München 2005
- [HE] Hering et. al.: Physikalisch Technisches Taschenbuch, VDI Verlag 1994
- [HÜGEL] Hügel, Helmut; Graf Thomas: Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. -2., neu überarbeitete Auflage Vieweg + Teubner Wiesbaden 2009



- [KI] Deutsches Kupferinstitut e.V. <info@kupferinstitut.de>  
  
URL: [http://www.kupfer-institut.de/  
front\\_frame/frameset.php3?client=1&parent=13&idcat=13&lang=1&sub=yes](http://www.kupfer-institut.de/front_frame/frameset.php3?client=1&parent=13&idcat=13&lang=1&sub=yes)  
verfügbar am 19.08.2010
- [KI2] Deutsches Kupferinstitut e.V. <info@kupferinstitut.de>  
  
URL: [http://www.kupfer-institut.de/  
front\\_frame/frameset.php3?idcat=371&client=1&idside=344&idcatside=995&lang=1&parent=13](http://www.kupfer-institut.de/front_frame/frameset.php3?idcat=371&client=1&idside=344&idcatside=995&lang=1&parent=13)  
verfügbar am 19.08.2010
- [KU] Kunstakademie Hamburg e.V.  
  
URL: [http://www.kunstschule-mittelweg.de/Themen/Planeten-u-  
Metalle.html](http://www.kunstschule-mittelweg.de/Themen/Planeten-u-Metalle.html)  
verfügbar am 19.08.2010, leicht verändert
- [KNISSEL] Knissel, Holger: Entwicklung eines Prüf- und  
Bewertungskonzeptes für laserstrahlgeschweißte Verbindungen  
DVS-Berichte Band 206, DVS-Verlag Düsseldorf 1999
- [MS] Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe -  
Nichteisenmetallische Werkstoffe, 4. neu bearbeitete Auflage  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010
- [POPR] Reinhart Poprawe: Lasertechnik für die Fertigung  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005
- [PWS] Hans J Fahrenwaldt, Volkmar Schuler : Praxiswissen  
Schweißtechnik: Werkstoffe Prozesse, Fertigung  
3. aktualisierte Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Feb 2009

- [SITEC] SITEC Industrietechnologie GmbH:
- [TRUMPF] Trumpf Laser und Systemtechnik GmbH <info@trumpf-laser.com>  
Festkörperlaser von Trumpf  
URL:<http://www.trumpf-laser.com/produkte/festkoerperlaser.html>  
verfügbar am 14.4.2010
- [WSK] Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung,  
Springer - Verlag Berlin Heidelberg 2008
- [WOP] World of Photonics Portal  
Redaktion: seiler@electronicpress.de  
URL:  
<http://www.world-of-photonics.net/link/de/23732078#23732078>  
verfügbar am 25.08.2010

### **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

.....  
Bearbeitungsort, Datum

.....  
Unterschrift

## 7 Anhang

### 7.1 Kalkulation der Betriebskosten

#### Beispielrechnung

Die Energiewerte entsprechen der energieeffizientesten Variante bei hinreichender Qualität, für eine Durchschweißung mittels Pulsnahtschweißen (mit ca. 60% Pulsüberlappung) von rötlichen Kupferblechen (0,5 mm Blechdicke). Die Energiekosten wurden mit 0,12€ je kWh berechnet. Weil der Nd:YAG Pulslasers JK701 nicht mehr produziert wird, wurde der Anschaffungspreis des vergleichbaren Nd:YAG Pulslaser SLS 200 von LASAG verwendet. Die Leistungsaufnahme des Kühlers wurde aus Verhältnis Leistungsaufnahme des Kühlers zur der Abwärmeleistung berechnet. Für dieses Verhältnis wurde der Mittelwert aus den Verhältnissen der Kühler unter Punkt 4.3.4 gebildet, welche 1.98 beträgt. Die Nahtlänge beträgt 200 mm. Der Teilewechsel plus die Positionierzeit beträgt 5 s. Für diese Zeit wurden die Energiekosten vom Bereitschaftsmodus auf berechnet und hinzugefügt. Als 1 Jahr wurden 6000 Betriebsstunden angenommen.

Lasergesät	TRUDISK4002	YLR1500	JK 701
Anschaffungspreis in €	280.000	150.000	70.000
Leistungsaufnahme in W	5.763	999	8.287
Zeit für 200 mm Nahtlänge in s	31,6	40	80
Leistungsaufnahme im Bereitschaftsmodus in W	5.009	146	8.287
Mittelwert der Leistungsaufnahme des Lasers in W	5.660	904	8.287
Mittlere Laserleistung in W	228	242,2	150
Abwärmeleistung in W	5.463	689	8.137
Leistungsaufnahme Kühler	2759	348	4110
Energie pro Teil in kWh	0,08559	0,01565	0,29271
Stück pro Jahr	590164	480000	254118
Energie für 1 Jahr in kWh	50512	7512	74383
Energiekosten pro Jahr	6061€	901€	8926€

Tabelle 16: Kostenrechnung der verwendeten Lasergesäte

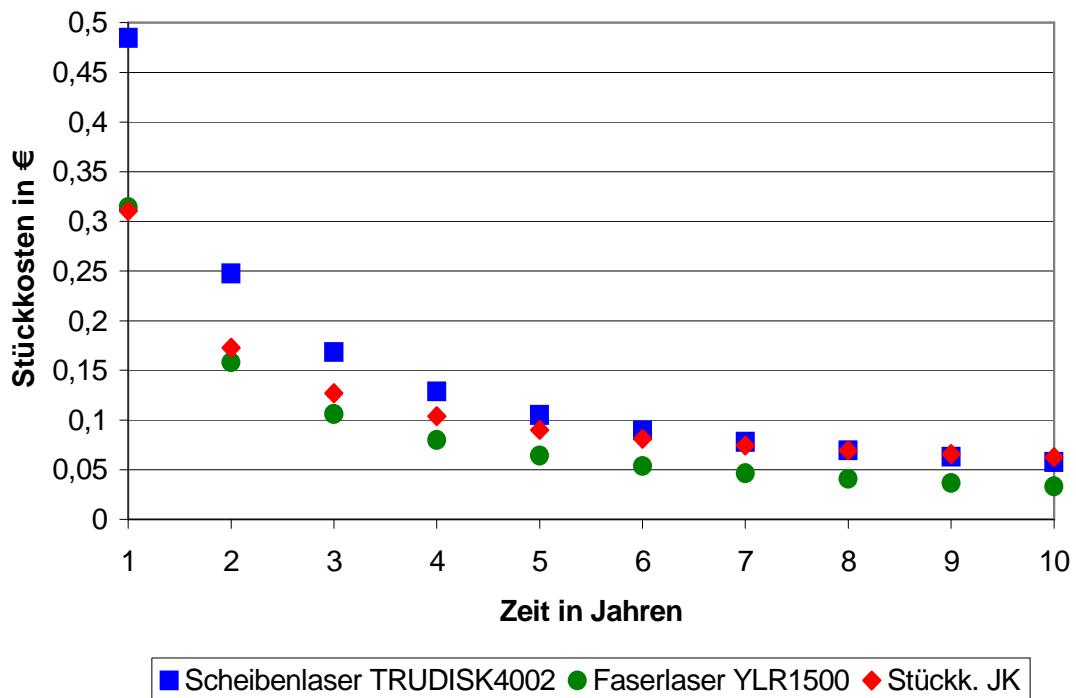


Abbildung 32: Stückkosten in Abhängigkeit der Zeit

In Abbildung 33 sind die Stückkosten nur aus den Anschaffungskosten der Lasergeräte und den Energiekosten berechnet. Die Anschaffungskosten des Kühlers wurden nicht mit betrachtet. Nach ca. 1,5 Jahren sind die Stückkosten des Faserlasers gleich denen des preisgünstigeren gepulsten Nd:YAG – Lasers, der langsamer ist und mehr Energie verbraucht. Der Scheibenlaser lässt durch seine hohen Anschaffungskosten und den hohen Verbrauch bei geringer Laserleistung, selbst über mehrere Jahre, die höchsten Kosten entstehen. Es ist zu erkennen, dass ein schlechter Wirkungsgrad sich durch höhere Kosten für die Kühlung verstärkt auf den Energieverbrauch auswirkt. Für einen genaueren Kostenvergleich muss eine an den jeweiligen Laser angepasster Kühler verwendet werden, wodurch die Anschaffungskosten der Kühler unterschiedlich sind. Weiterhin könnte der Scheibenlaser etwas kleiner dimensioniert werden, was auch mit einer Kosteneinsparung verbunden ist.

## 7.2 Strahlvermessung Scheibenlaser HLD4002

Die Strahlvermessung wurde mit einem Strahlvermessungsgerät von PRIMES durchgeführt, das nach dem Prinzip der rotierenden Spitze funktioniert. Dabei wird die Spitze in verschiedenen Ebenen durch den Laserstrahl gefahren und zeichnet die Leistung Pixelweise auf. Bei 300 W Laserleistung wurde ein Strahldurchmesser von 290  $\mu\text{m}$  ermittelt und bei 1500 W Laserleistung ein Strahldurchmesser von 328  $\mu\text{m}$  (jeweils bei 86% Laserleistung innerhalb des Strahldurchmessers). Durch weniger Messebenen und die kurze Brennweite wurde bei 1500 W nicht genau die Ebene des kleinsten Durchmessers gemessen. Deshalb ist davon auszugehen dass sich der Strahldurchmesser bei noch höheren Laserleistungen nicht wesentlich vergrößert. Die Messung bei höheren Leistungen und mehr Ebenen war aufgrund von beginnender Materialabtragung an der Messspitze nicht möglich.

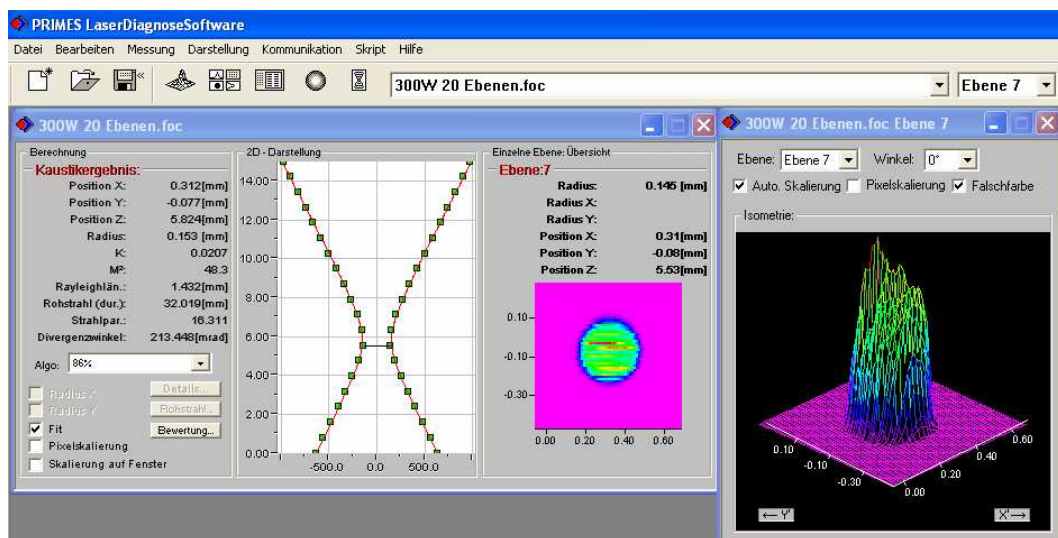


Abbildung 33: Strahlprofil bei 300 W Laserleistung

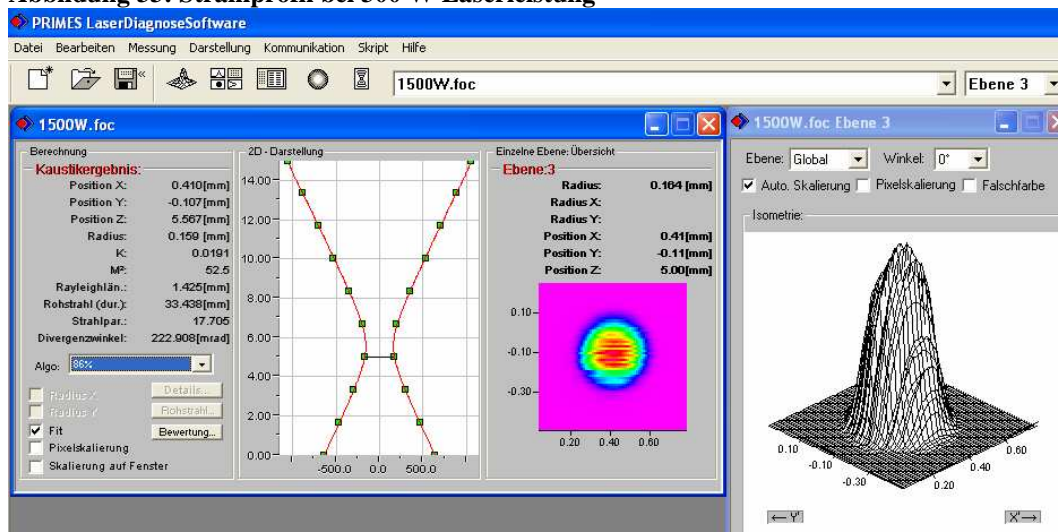


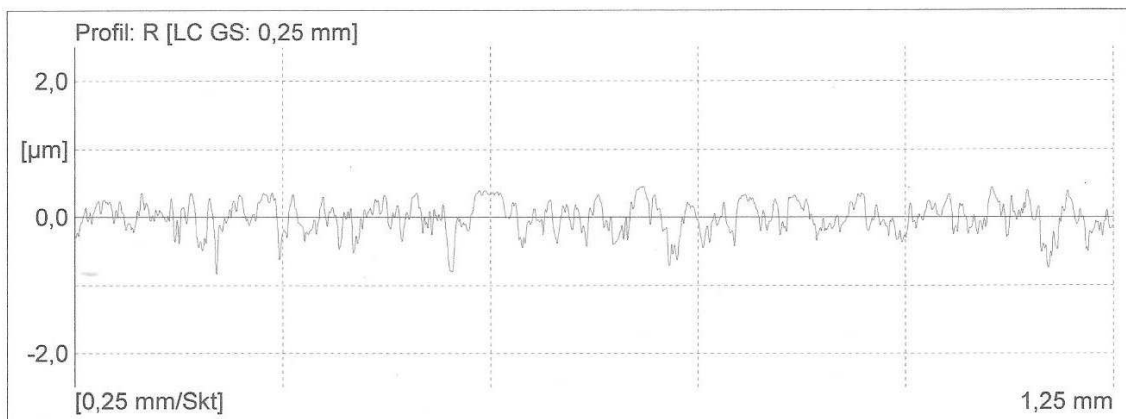
Abbildung 34: Strahlprofil bei 1500 W Laserleistung

### 7.3 Messprotokolle der Rauigkeitsmessung:

 MarSurf XR 20 V1.40-3 (SP1)	SITEC Industrietechnologie GmbH Qualitätssicherung Messraum  SITEC Neue Messung	 16.07.2010
---	--	---

Objekt:	Blech flach
Nummer:	
Bemerkung:	Messrichtung quer

Messgerät:	Mahr-Messkarte	Lt:	1,75 mm [N=5]
Vorschubgerät:	PGK 120	Ls:	2,5 µm
Taster:	MFW-250 [???	VB:	±250 µm
		Vt:	0,10 mm/s
		Punkte:	3500



Profil: R [LC GS: 0,25 mm]	
Ra	0,181 µm
Rq	0,228 µm
Rz	1,111 µm
Rmax	1,20 µm
Rt	1,29 µm



MarSurf XR 20  
V1.40-3 (SP1)

SITEC Industrietechnologie GmbH  
Qualitätssicherung  
Messraum

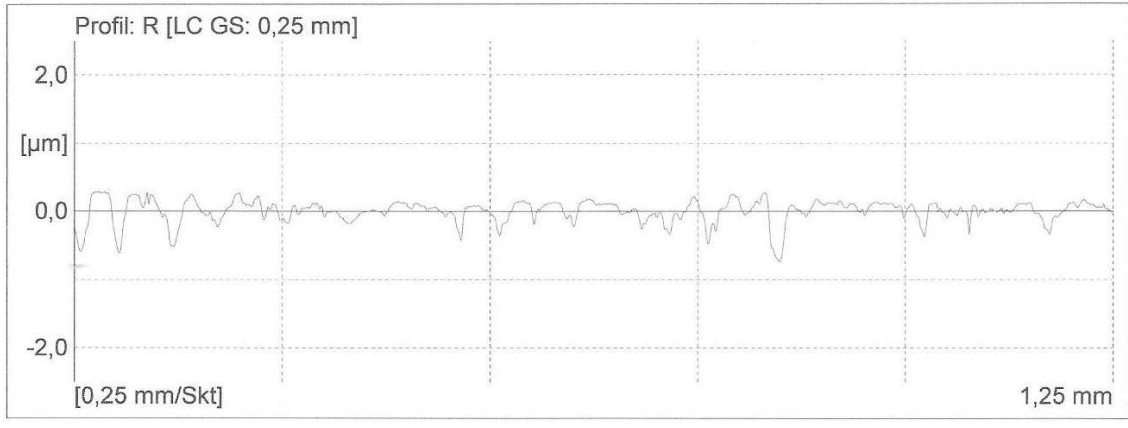
SITEC  
Neue Messung



16.07.2010

Objekt: Blech flach  
Nummer:  
Bemerkung: Messrichtung längs

Messgerät: Mahr-Messkarte	Lt: 1,75 mm [N=5]
Vorschubgerät: PGK 120	Ls: 2,5 µm
Taster: MFW-250 [???	VB: ±250 µm
	Vt: 0,10 mm/s
	Punkte: 3500

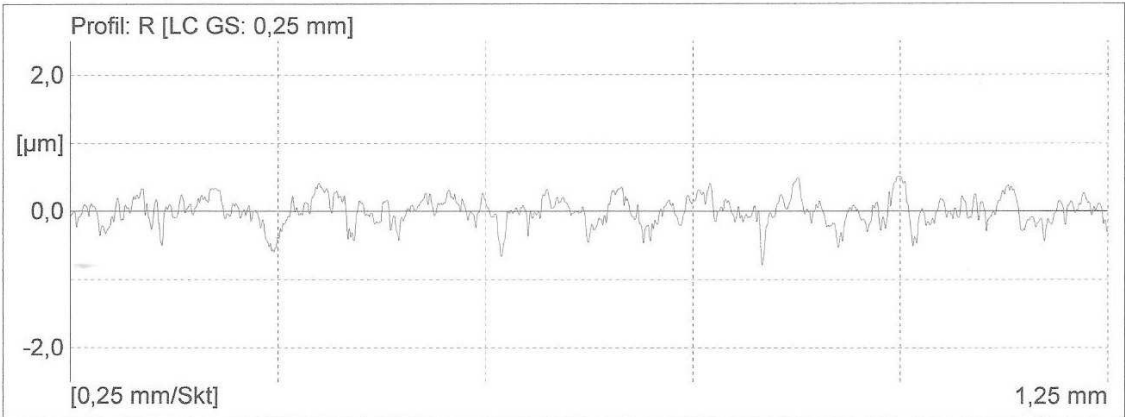


Profil: R [LC GS: 0,25 mm]	
Ra	0,117 µm
Rq	0,166 µm
Rz	0,714 µm
Rmax	1,01 µm
Rt	1,02 µm

 <p>MarSurf XR 20 V1.40-3 (SP1)</p>	<p>SITEC Industrietechnologie GmbH Qualitätssicherung Messraum</p> <p>SITEC Neue Messung</p>	 <p>16.07.2010</p>
--	--	---

Objekt:	Blech Winkel
Nummer:	
Bemerkung:	Messrichtung quer

Messgerät:	Mahr-Messkarte	Lt:	1,75 mm [N=5]
Vorschubgerät:	PGK 120	Ls:	2,5 µm
Taster:	MFW-250 [???	VB:	±250 µm
		Vt:	0,10 mm/s
		Punkte:	3500



Profil: R [LC GS: 0,25 mm]	
Ra	0,154 µm
Rq	0,200 µm
Rz	1,025 µm
Rmax	1,30 µm
Rt	1,30 µm





MarSurf XR 20  
V1.40-3 (SP1)

SITEC Industrietechnologie GmbH  
Qualitätssicherung  
Messraum

SITEC  
Neue Messung

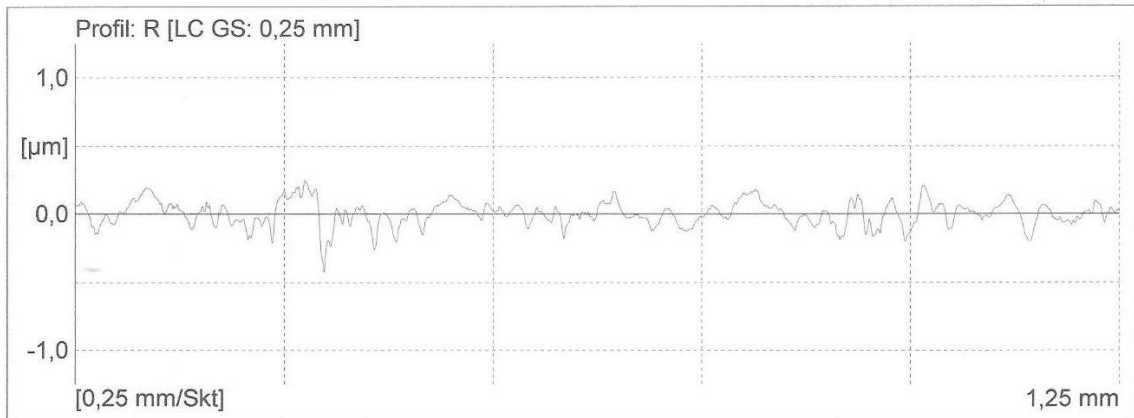


16.07.2010

Objekt: Blech Winkel  
Nummer:  
Bemerkung: Messrichtung längs

Messgerät: Mahr-Messkarte  
Vorschubgerät: PGK 120  
Taster: MFW-250 [???

Lt: 1,75 mm [N=5]  
Ls: 2,5 µm  
VB: ±250 µm  
Vt: 0,10 mm/s  
Punkte: 3500



Profil: R [LC GS: 0,25 mm]

Ra	0,069 µm
Rq	0,089 µm
Rz	0,443 µm
Rmax	0,68 µm
Rt	0,68 µm



MarSurf XR 20  
V1.40-3 (SP1)

SITEC Industrietechnologie GmbH  
Qualitätssicherung  
Messraum

SITEC  
Neue Messung

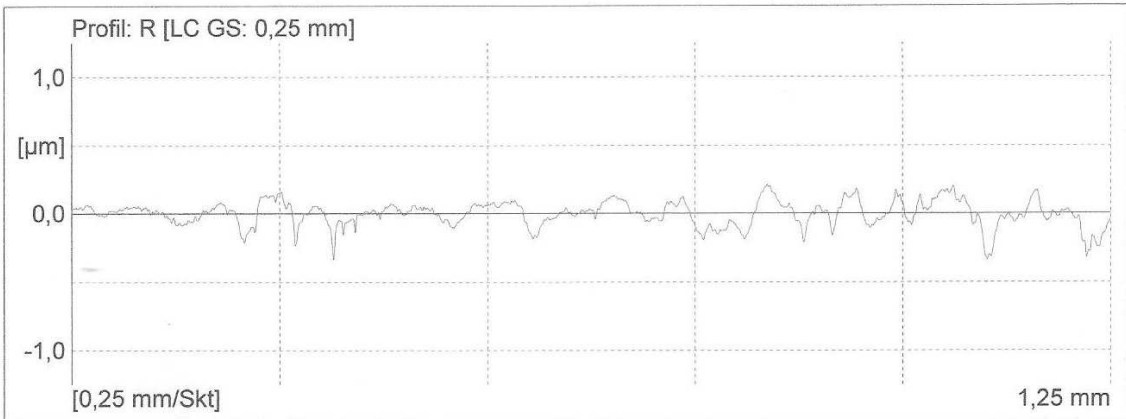


16.07.2010

Objekt: Block  
Nummer:  
Bemerkung: Messrichtung längs

Messgerät: Mahr-Messkarte  
Vorschubgerät: PGK 120  
Taster: MFW-250 [???

Lt: 1,75 mm [N=5]  
Ls: 2,5 µm  
VB: ±250 µm  
Vt: 0,10 mm/s  
Punkte: 3500



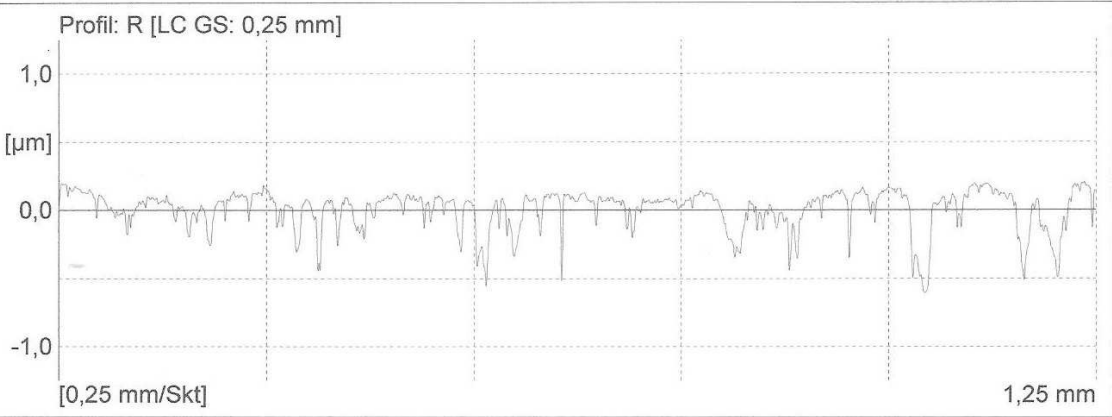
Profil: R [LC GS: 0,25 mm]

Ra	0,070 µm
Rq	0,092 µm
Rz	0,426 µm
Rmax	0,54 µm
Rt	0,55 µm

 <b>Mahr</b> MarSurf XR 20 V1.40-3 (SP1)	SITEC Industrietechnologie GmbH Qualitätssicherung Messraum  SITEC Neue Messung	 <b>SITEC</b> INDUSTRIE TECHNOLOGIE  16.07.2010
--	--	--

Objekt:	Block
Nummer:	
Bemerkung:	Messrichtung quer

Messgerät:	Mahr-Messkarte	Lt:	1,75 mm [N=5]
Vorschubgerät:	PGK 120	Ls:	2,5 µm
Taster:	MFW-250 [???	VB:	±250 µm
		Vt:	0,10 mm/s
		Punkte:	3500



Profil: R [LC GS: 0,25 mm]	
Ra	0,110 µm
Rq	0,146 µm
Rz	0,633 µm
Rmax	0,81 µm
Rt	0,81 µm