

---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Dominic Scholze**

**Beitrag zur Technologieent-  
wicklung für die Integration  
von Sensoren in additiv gefert-  
igte Bauteile mittels thermi-  
schen Fügens**

Mittweida, 2019

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Beitrag zur Technologieentwicklung für die Integration von Sensoren in additiv gefertigte Bauteile mittels thermischen Fügens**

Autor:

**Herr Dominic Scholze**

Studiengang:

**Maschinenbau**

Seminargruppe:

**MB16wF-B**

Erstprüfer:

**Prof. Dr. -Ing. Peter Hübner**

Zweitprüfer:

**Dipl. -Ing.(FH) Gerd Töberling**

Einreichung:

**Mittweida, 27.09.2019**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2019**

# **BACHELORTHESIS**

---

## **Contribution to technology development for the integra- tion of sensors in additively manufactured components by thermal joining**

author:

**Mr.**

**Dominic Scholze**

course of studies:

**mechanical engineering**

seminar group:

**Mb16wF-B**

first examiner:

**Prof. Dr. -Ing. Peter Hübner**

second examiner:

**Dipl. -Ing.(FH) Gerd Töberling**

submission:

**Mittweida, 23.09.2019**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2019**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Scholze, Dominic:

Beitrag zur Technologieentwicklung für die Integration von Sensoren in additiv gefertigte Bauteile mittels thermischen Fügens. - 2019. - 12, 49, 12 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Bachelorarbeit, 2019

## **Referat:**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erstellung eines Technologiekonzeptes zur Herstellung von Schweißnähten im Überlappstoß zwischen der Nickellegierung Inconel 600 und dem hochlegierten Grundwerkstoff X6CrNiMoTi17-12-2 durch Laserstrahlschweißen. Dafür sollen unterschiedliche Schweißstrategien unter der Variation ausgewählter Schweißparameter angewandt und die so erzeugten Schweißnähte sowohl metallografisch, als auch in ihren mechanischen Eigenschaften miteinander verglichen werden.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>2</b>
2.1 <i>Integration von Sensoren .....</i>	2
2.1.1 Arten von Sensoren .....	2
2.1.2 Anforderungen an die Fixierung von Sensoren.....	6
2.1.3 Technologien zur Fixierung von Sensoren.....	8
2.2 <i>Selektives Laserschmelzen (SLS).....</i>	12
2.3 <i>Nickel und seine Legierungen .....</i>	14
<b>3 Problemstellung und Lösungskonzepte.....</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Technologiekonzept.....</i>	17
3.1.1 Widerstandspunktschweißen .....	18
3.1.2 Laserlöten .....	18
3.1.3 Laserstrahlschweißen .....	19
3.2 <i>Auswahl des Fügeverfahrens .....</i>	19
<b>4 Experimentelle Untersuchung.....</b>	<b>21</b>
4.1 <i>Versuchsplanung .....</i>	21
4.2 <i>Versuchsaufbau .....</i>	21
4.2.1 Schweißtechnische Ausrüstung.....	21
4.2.2 Handlingequipment .....	23
4.2.3 Versuchswerkstoffe .....	23
4.3 <i>Versuchsdurchführung .....</i>	25
4.3.1 Versuchsreihe A – Nachweis Machbarkeit .....	25
4.3.2 Versuchsreihe B – Zugscherversuch .....	26
4.4 <i>Bewertung der Schweißverbindung.....</i>	28
4.4.1 Sichtprüfung .....	28
4.4.2 Metallografische Untersuchung .....	28
4.4.3 Zugscherversuch.....	29

---

<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>30</b>
5.1	<i>Versuchsreihe A.....</i>	30
5.1.1	Cw-geschweißte Schweißnähte und Kreisnähte .....	30
5.1.2	gepulste Schweißnähte .....	35
5.2	<i>Versuchsreihe B.....</i>	39
5.2.1	Metallurgische Eigenschaften .....	40
5.2.2	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften .....	42
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit.....</b>	<b>48</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>50</b>
	<b>Anlagenverzeichnis .....</b>	<b>53</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung.....</b>	<b>65</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1:	Darstellung der Funktionsweise eines taktilen Sensors [10].....	3
Abbildung 2:	Funktionsprinzipsdarstellung des photoelektrischen Effekts.....	4
Abbildung 3:	Darstellung der Volumenänderung eines Körpers unter Zugbelastung .....	5
Abbildung 4:	Darstellung der Funktionsweise von Thermodrähten [18].....	6
Abbildung 5:	Darstellung des Prinzips des piezoelektrischen Effektes .....	6
Abbildung 6:	Messung der Temperatur in festen Körpern [19] .....	9
Abbildung 7:	Messung der Oberflächentemperatur mit aufgelegten Thermodrähten (Links) und der Oberflächentemperatur an schlecht wärmeleitenden Werkstoffen mit eingelegten Messdrähten [19].....	9
Abbildung 8:	Darstellung der Schweißreihenfolge von Röhren-DMS nach Herstellerangabe (A) und nach einer alternativen Variante (B) und Darstellung der Schweißpunktfolge bei der Montage von Metallfolien- DMS (C) [21].....	11
Abbildung 9:	Prinzipdarstellung einer SLS-Anlage.....	13
Abbildung 10:	Leichtbauteil für den Bahnradsport, bei welchem innenliegend eine Wabenstruktur zur Gewichtsreduzierung gedruckt worden ist (Links) [25], Darstellung von innen liegenden, gekrümmten Kühlkanälen in einem mit SLS hergestelltem Umformwerkzeug (Rechts) [24] .....	14
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der $\gamma'$ -(Links) und der $\gamma''$ - Phase (Rechts) .....	15
Abbildung 12:	Prinzipdarstellung des eingelegten DMS Dummies in die SLS gefertigte Tasche .....	17
Abbildung 13:	Darstellung des durch Widerstandspunktschweißen fixierten Hochtemperatur-DMS .....	18
Abbildung 14:	Darstellung des durch Laserlöten fixierten Hochtemperatur-DMS .....	19
Abbildung 15:	Darstellung des durch Laserstrahlschweißen fixierten Hochtemperatur- DMS.....	19
Abbildung 16:	Schematische Darstellung des nicht parallelen reellen Laserverlaufs mit den Kennwerten des Strahlparameterprodukts .....	22
Abbildung 17:	Laserquelle TruDisk 6001 .....	22
Abbildung 18:	Roboter Comau MJ110 (Links) und dessen Arbeitsbereich (Rechts) .....	23

Abbildung 19: Gefüge des Inconel 600 .....	24
Abbildung 20: Austenitisches Gefüge des 1.4571 .....	25
Abbildung 21: Versuchsaufbau Reihe A: 1) Aufgewickelter Inconel 600 Blechstreifen, 2) eingespanntes Ende der Inconel 600 Rolle auf dem Werkstoff 1.4571, 3) 1. Schweißnaht, 4) 2. Schweißnaht, 5) 3. Schweißnaht .....	26
Abbildung 22: Probengeometrien für Scherzugversuch mit quer verlaufender Naht in Anlehnung an die DIN 14273 .....	27
Abbildung 23: Darstellung des Prinzips des Schweißens mit Schweißmaske (Links) und der eingebauten Schweißmaske (Rechts): 1) Schweißmaske, 2) Unterlegblech zum verhindern des Durchknickens der Inconel-Folie, 3) Schweißnaht 4) Inconel 600 Folie, 5) Grundwerkstoff, 6) Pilotlaser .....	27
Abbildung 24: Softwareoberfläche von „Olympus Stream Motion“ zur Schweißnahtvermessung .....	29
Abbildung 25: Zugmaschine „retrolit inspect 50 desk“ .....	29
Abbildung 26: Darstellung der Streckenenergie über verschiedene Schweißgeschwindigkeiten bei den Leistungswerten $P = 120 \text{ W}$ , $250 \text{ W}$ und $500 \text{ W}$ .....	32
Abbildung 27: Darstellung der gemessenen Nahttiefen an den gepulsten Schweißnähten	39
Abbildung 28: Schweißnahtnaufnahme einer CW-Geschweißten Naht .....	40
Abbildung 29: Schweißnahtnaufnahme einer Puls-Geschweißten Naht .....	41
Abbildung 30: Durchschnittlich erreichte maximale Zugkräfte der CW-Geschweißten Nähte .....	42
Abbildung 31: Durchschnittlich erreichte maximale Zugkräfte der Puls geschweißten Nähte .....	43
Abbildung 32: Vergleich der maximal erreichten Zugkräfte, Streckenenergien und Nahtprofile von CW Nähten (L1 + L2) mit gepulsten Nähten (P5 + P6)..	43
Abbildung 33: Vergleich der maximal erreichten Zugkräfte in N von CW-linear geschweißten und kreisgeschweißten Nähten .....	45
Abbildung 34: Durchschnittlich erreichte maximale Zugkräfte der CW-geschweißten Kreisnähte .....	45
Abbildung 35: Kraft-Weg-Diagramm einer Probe der Reihe L1 .....	46
Abbildung 36: Gerissene Zugscherprobe aus der Reihe P7 .....	47
Abbildung 37: Datenblatt Hochtemperaturdehnmessstreifen KHCX-10-120-G13 .....	II

Abbildungsverzeichnis	V
Abbildung 38: Datenblatt Inconel 600.....	III
Abbildung 39: Datenblatt X6CrNiMoTi17-12-2.....	IV
Abbildung 40: Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der CW geschweißten Linearnähte.....	IX
Abbildung 41: Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der gepulst geschweißten Nähte .....	X
Abbildung 42: Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der CW geschweißten Kreisnähte .....	XI

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Vergleich der unterschiedlichen möglichen Schweißverfahren .....	20
Tabelle 2:	Kennwerte der Scanneroptik Trumpf PFO33/D2 .....	22
Tabelle 3:	Chemische Zusammensetzung von Inconel 600 .....	24
Tabelle 4:	Chemische Zusammensetzung von 1.2709 (oben) und 1.4571 (unten) .....	24
Tabelle 5:	Vorgehensweise beim Präparieren der Metallografieproben .....	28
Tabelle 6:	Schweißparameter der CW-geschweißten Zugproben – $l = 20$ mm, Fokus = 0, Faser = $100 \mu\text{m}$ .....	31
Tabelle 7:	Darstellung der Schweißnahtgeometrien in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit beim CW-Schweißen – $P = 250$ W, Fokus $0,100 \mu\text{m}$ -Faser .....	33
Tabelle 8:	Darstellung der unterschiedlichen Schweißergebnisse des Versuchsteils A..	35
Tabelle 9:	Schweißparameter der Puls-geschweißten Zugproben – $l = 20$ mm. Fokus = $0,100 \mu\text{m}$ Faser, Pulsdauer $t_p = 0,3$ ms, $P = 500$ W, $Q_s = 1,76$ Ws/mm .....	36
Tabelle 10:	Vergleich der Streckenenergien von CW- geschweißten Nähten und gepulsten Nähten .....	37
Tabelle 11:	Darstellung der Schweißnahtgeometrien in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit und der Frequenz beim Puls-Schweißen – $P = 500$ W, Fokus 0, $t_p = 0,3$ ms, $Q_s = 1,76$ Ws/mm, $100 \mu\text{m}$ -Faser .....	38
Tabelle 12:	Vergleich Nahtgeometrien von CW- und Puls -Geschweißten Nähten – $P = 250$ W, $v_s = 50$ mm/s .....	44
Tabelle 13:	Versuchstabelle der CW Geschweißten Nähte .....	V
Tabelle 14:	Versuchstabelle der gepulst geschweißten Nähte .....	VI
Tabelle 15:	Versuchstabelle der CW Geschweißten Kreisnähte .....	VII
Tabelle 16:	Ermittelte Zugkräfte beim Scherzugversuch in Versuchsreihe B .....	VIII

**Abkürzungsverzeichnis**

<b>Abkürzung</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
A	mm <sup>2</sup>	Fläche
CAD		Computer added Design
CW		Continuous wave
d <sub>p</sub>	mm	Pulsdurchmesser
DMS		Dehnmessstreifen
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
Inconel 600		Werkstoff NiCr15Fe, Werkstoffnummer 2.4871
Kfz		Kraftfahrzeug
l	mm	Länge
n		Schweißpunktanzahl
p	Pa	Druck
P	W	Leistung
P <sub>P</sub>	W	Pulsleistung
$\overline{P}$	W	Durchschnittliche Leistung
Pt100		Platinwiderstandsthermometer mit 100 Ω bei 0 °C
Q-		Negativer Ladungsschwerpunkt
Q+		Positiver Ladungsschwerpunkt
Q <sub>s</sub>	Ws/mm	Streckenenergie
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R20	Ω	Elektrischer Widerstand bei T = 20 °C
SLS		Selektives Laserschmelzen
t	s	Zeit
t <sub>s</sub>	s	Schweißzeit
T	K	Temperatur
ΔT	K	Temperaturdifferenz
T <sub>0</sub>	K	Starttemperatur
T <sub>M</sub>	K	Temperatur an der Messstelle
T <sub>V</sub>	K	Temperatur an der Vergleichsstelle
U	V	Spannung

---

$U_t$	V	Thermospannung
$v_s$	mm/s	Geschwindigkeit
$\alpha$	$[10^{-6}/K]$	Längenausdehnungskoeffizient
$\alpha_{t_0}$	$[10^{-6}/K]$	Längenausdehnungskoeffizient zur Startzeit
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Zugspannung
$\tau$	N/mm <sup>2</sup>	Scherspannung
$\rho$	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$	Spezifischer elektrischer Widerstand
$P_{20}$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte bei 20 °C
$\epsilon_r$		Dielektrizitätszahl

# 1 Einleitung

In der Industrie stellt die additive Fertigung einen Quantensprung in der Herstellung von Bauteilen dar. Endkonturnahe und teils komplett einsatzbereite Produkte als Ergebnis eines Prozesses, welcher als eine Alternative zum Spritzgießen als Urformverfahren ab Stückzahl eins fungiert. Neben Leichtbau, wie es ihn so noch nicht gab, über die Ausbildung von hochkomplexen Strukturen, welche bis zur Entwicklung dieser Prozesse nicht möglich waren, reduziert die additive Fertigung von Bauteilen die Anzahl von Bearbeitungsstationen in Produktionsketten, im Idealfall auf eins. Es können Füge-, Umform- und spanende Prozesse eingespart werden ohne Verluste der Qualität der erzeugten Produkte. Der aktuelle Trend der sinkenden Kosten pro  $\text{cm}^3$  gedruckter Bauteile sorgt für einen weiteren Aufschwung der Technologie. [1]

In dieser Bachelorarbeit liegt der Fokus darauf, einen Beitrag zur Technologieentwicklung zu leisten, welcher in Zukunft als Grundlage für weitere Forschungen und Versuche in diesem Gebiet genutzt wird. Ziel ist es, die grundlegende Schweißignung des Metallträgers eines Hochtemperaturdehnmessstreifens aus 2.4816 (Inconel 600) mit dem Werkstoff 1.2709, welcher einer der Grundwerkstoffe beim Selektiven Laserschmelzen darstellt, zu erproben und zu bewerten.

Mit Hilfe dieser Daten soll festgelegt werden ob Sensorintegrationen über Dehnmessstreifen hinaus möglich sind (z.B. Temperatursensoren, Abstandssensoren etc.). Des Weiteren soll geprüft werden ob das Ziel der Herstellung von fertigen Bauteilen mit innenliegender Sensortechnik, welche sich durch eindringen direkt im Bauteil befindet, erfüllt werden kann.

Durch die direkt im selektiven Laserschmelzen eingebrachten Sensoren können zukünftig aufwendige Prozesse der Sensorapplikation bereits während der additiven Fertigung durch Fügen vereinfacht und schneller vollzogen werden.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Integration von Sensoren

#### 2.1.1 Arten von Sensoren

„Ein Sensor oder Messwertaufnehmer ist eine Komponente, die eine gemessene physikalische Größe oder einen chemischen Effekt in ein analoges elektrisches Signal umwandelt. Physikalische Größen können Druck, Gewicht, Beschleunigung, Lichtstärke, Temperatur, Strahlung, Schall, magnetischer Fluss, Drehzahl und viele andere physikalische Größen sein.“ [2]

Sensoren finden an den verschiedensten Stellen in der Industrie, Medizin, Forschung, etc. Anwendung. Beschleunigungssensoren messen Schwingungen, Thermoelemente ermitteln die Temperaturen verschiedener Medien und Stoffe, Hall-Sensoren helfen mit Ultraschallwegmessung beim Einparken, mit Hilfe von Drehzahlaufnehmern werden Motoren und Radrehzahlen aufgenommen und ausgewertet, aber auch der Reifen-, Brems und Kraftstoffdruck werden im Kfz erfasst und an das Steuergerät zum Auswerten weitergegeben [3]. Damit ein Messwertaufnehmer jedoch zuverlässig arbeitet und Messwerte im Rahmen zulässiger Messabweichungen weitergibt muss dieser auch korrekt an seinem Arbeitsort, entsprechend seiner Messaufgabe und den Umgebungseinflüssen, fixiert sein.

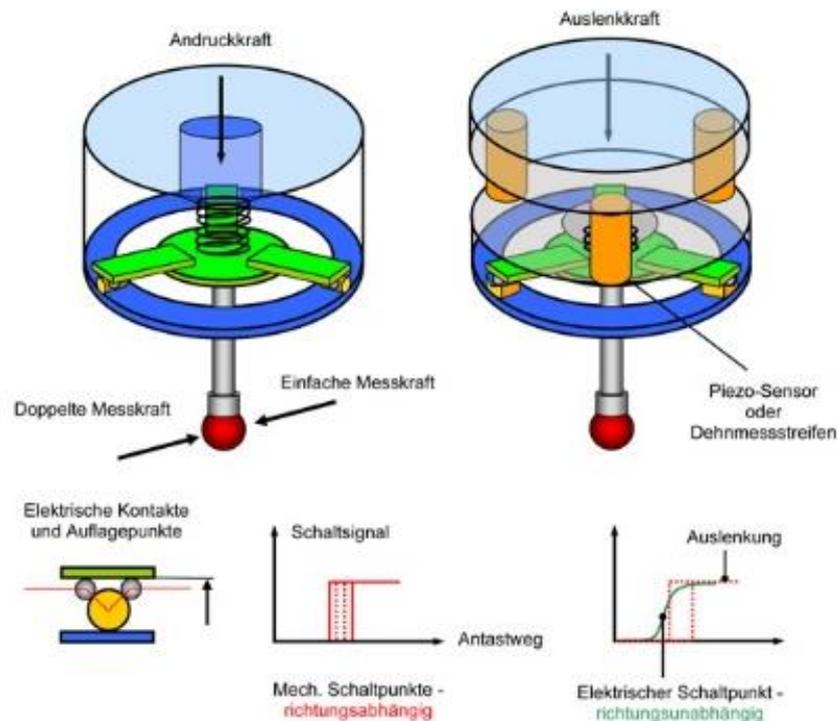
Diese Aufgabenspezifischen Anforderungen variieren je nach Sensorart, der Position der durchzuführenden Messung, sowie der Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise Temperatur, Luftfeuchtigkeit, umgebende Medien etc.

Für unterschiedliche industrielle Anwendungen gibt es jeweils speziell auf diese Aufgabe zugeschnittene Sensoren. Sie werden unterteilt in die zur Anwendung kommenden Messprinzipien [4], in aktive oder passive Sensoren [5] und nach ihren zu messenden Größen.

Ein Widerstandsthermometer (z.B. Pt100) und ein Thermoelement erfüllen zum Beispiel beide die gleiche Messaufgabe, indem sie die Temperatur messen, jedoch funktionieren sie grundlegend unterschiedlich. Ein Pt100, welcher nach EN 60751 genormt ist, basiert auf einer annähernd linearen Erhöhung des elektrischen Widerstandes von Platin bei zunehmender Temperatur [6]. Die Funktionsweise eines Thermoelementes hingegen beruht auf dem Entstehen einer thermoelektrischen Spannung in Folge einer Temperaturdifferenz entlang zweier aus unterschiedlichen Metallen bestehenden verbundenen Drähten [7]. Im Nachfolgenden sollen die Sensoren anhand ihrer Wirkprinzipien eingeordnet werden.

### Mechanisch

Mechanische Sensoren dienen dazu festzustellen, ob ein Kontakt zu einem anderen Objekt vorliegt. Durch den Kontakt mit einem Körper wird ein Stromkontakt geschlossen oder geöffnet, und so dessen Präsenz registriert. Dieses Messprinzip wird besonders häufig bei mechanischen Tastern in Koordinatenmessmaschinen angewandt [8]. Weniger empfindliche mechanischer Taster werden in der Regel als Endlagenschalter in Form eines Rollenstößels zur Beendigung eines Bewegungsvorgangs eingesetzt [9].



**Abbildung 1:** Darstellung der Funktionsweise eines taktilen Sensors [10]

### Optisch

Sogenannte Photozellen arbeiten nach dem photoelektrischen Prinzip. Eine spezialbeschichtete, oberflächenbehandelte Metallplatte (Katode) löst bei Bestrahlung mit Licht Elektronen aus ihrer Oberfläche heraus, welche dann als freie Elektronen zur Verfügung stehen und sich zur positiv geladenen Anode bewegen [11]. Dieser Effekt entsteht, da beim Aufprall von Photonen auf der Platte diese ihre ganze Energie  $h\nu$  an ein Elektron abgeben. Hat ein Elektron genug Energie durch auftreffende Photonen absorbiert wird die Austrittsenergie  $\Phi$  überschritten und es löst sich von der Metalloberfläche. Die überschüssige Energie des Photons wird in kinetische Energie umgewandelt und das Elektron bewegt sich mit der Geschwindigkeit  $v$  und der kinetischen Energie  $\Phi - h\nu$  fort. Dies ist auch bekannt als äußerer photoelektrischer Effekt. Aufgrund der Tatsache, dass bereits ein Photon ausreichen kann um die Austrittsenergie zu überschreiten, tritt dieser Effekt bereits bei sehr geringen Lichtstärken auf. Eine Erhöhung der Lichtintensivität lässt nur noch die Anzahl der Elektronen welche freigesetzt werden steigen, nicht jedoch ihre Energie. [12]

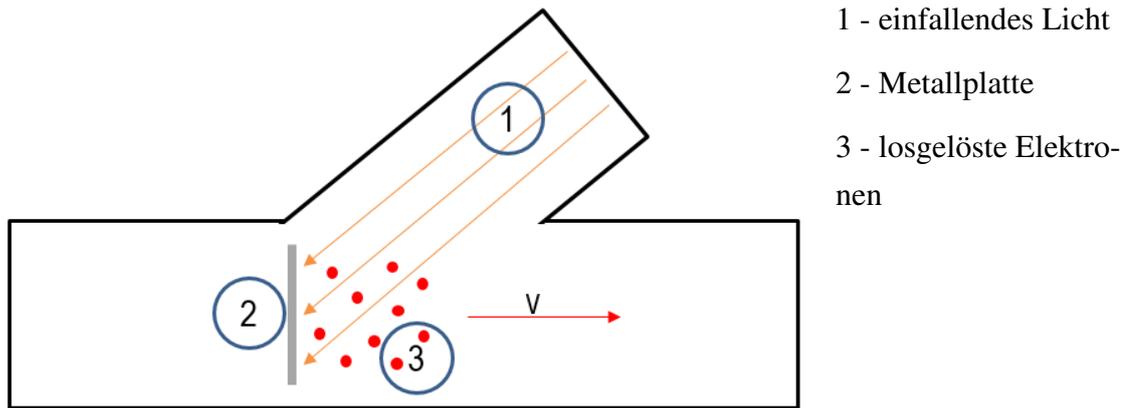


Abbildung 2: Funktionsprinzipdarstellung des photoelektrischen Effekts

### Kapazitiv

Ein Kapazitiver Sensor besteht in der Regel aus 2 Kondensatoren, zwischen welchen ein elektrisches Feld aufgebaut wird. Dringt nun ein Material mit einer Dielektrizitätszahl  $\epsilon_r$  größer als jene von Luft in dieses elektrische Feld ein, führt dies zu einer Vergrößerung der Kapazität des Sensors, welche messtechnisch erfasst wird. Kapazitive Sensoren werden unter anderem angewandt für Abstands-, Vibrations-, Verkippungs-, Ebenheits-, Schichtdicken- und Rundheitsmessungen. [13]

### Induktiv

Nahezu sämtliche induktiven Sensoren auf dem Markt arbeiten nach dem Wirbelstromprinzip. Ein Oszillator erzeugt mit Hilfe eines Schwingkreises ein Wechselfeld, welches er aus der aktiven Fläche des Sensors nach vorne abgibt. Begibt sich nun ein metallisches Objekt in dieses Wechselfeld, wird dem Schwingkreis Energie entzogen und das Vorhandensein des Objektes wird erkannt [14]. Diese Sensoren dienen, ebenso wie die kapazitiven Sensoren, hauptsächlich der Erkennung des Vorhandenseins von metallischen Bauteilen. Zu diesem Zweck reicht ein einfaches Anschrauben des Sensors unter Beachtung des Schaltabstandes, welcher sich durch unterschiedliche Reduktionsfaktoren für zu erkennende metallische Werkstoffe verringert. [15]

### Resistiv

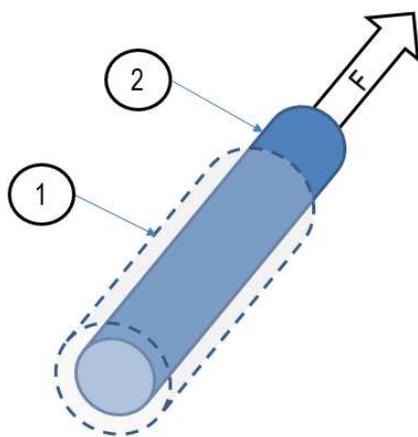
Jeder Körper besitzt einen elektrischen Widerstand  $R$ . Er ist ein Maß dafür wie stark ein elektrischer Strom daran gehindert sich durch einen Körper zu bewegen [16], wobei Materialien mit einem sehr hohen elektrischen Widerstand, so dass kein Strom mehr hindurchfließen kann, als Isolatoren bezeichnet werden. Der elektrische Widerstand eines Drahtes hängt ab von der Werkstoffkonstante des spezifischen Widerstandes  $\rho$ , der Länge  $l$ , der Querschnittsfläche  $A$  und von der Temperatur  $T$  des Materials aus welchem er besteht [17]. Unter der Annahme der Temperatur  $T = 20^\circ\text{C}$  lautet die Formel zur Berechnung:

$$R_{20} = \rho_{20} \cdot \frac{l}{A} \quad (1)$$

Die Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Temperatur, welche bei dem Temperaturunterschied  $\Delta T = T - T_0$  mit dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  in  $[\frac{1}{^\circ\text{C}}]$  dargestellt wird, erfolgt mit folgender Gleichung:

$$R(T) = R(T_0) \cdot (1 + \alpha_{T_0} \cdot (T - T_0)) \quad (2)$$

Wenn nun eine Zugbeanspruchung auf diesen Leiter wirkt, sich als Folge dessen seine Länge erhöht und sein Querschnitt dabei verkleinert, steigt der elektrische Widerstand bei gleichbleibender Temperatur, da es für die sich bewegenden Elektronen erschwert wird ohne bzw. mit wenig Kollisionen den Draht zu durchschreiten. Dieses Grundprinzip wird für die Messung mittels Dehnmessstreifen verwendet, während die Temperaturabhängigkeit eines elektrischen Widerstandes beim Thermoelement Pt100 zur Anwendung kommt [17].



1 – Volumenkörper ohne Belastung

2 – Volumenkörper unter Zugbeanspruchung

**Abbildung 3: Darstellung der Volumenänderung eines Körpers unter Zugbelastung**

### Thermoelektrisch

Werden 2 metallische Drähte aus den Materialien A und B elektrisch miteinander verbunden und es herrschen an der Verbindungsstelle oder auch Messstelle(1), sowie an der Vergleichsstelle (2) die unterschiedlichen Temperaturen  $T_M$  und  $T_V$ , so fließt ein Thermostrom  $U_t$ . Die Größe dieses Thermostromes ist abhängig von  $T_M$ ,  $T_V$  und den Materialien A und B [17]. Sensoren welche, durch z.B. Thermoelektrische oder piezoelektrische Mechaniken, eine eigene Spannung „erzeugen“ werden aktive Sensoren genannt.

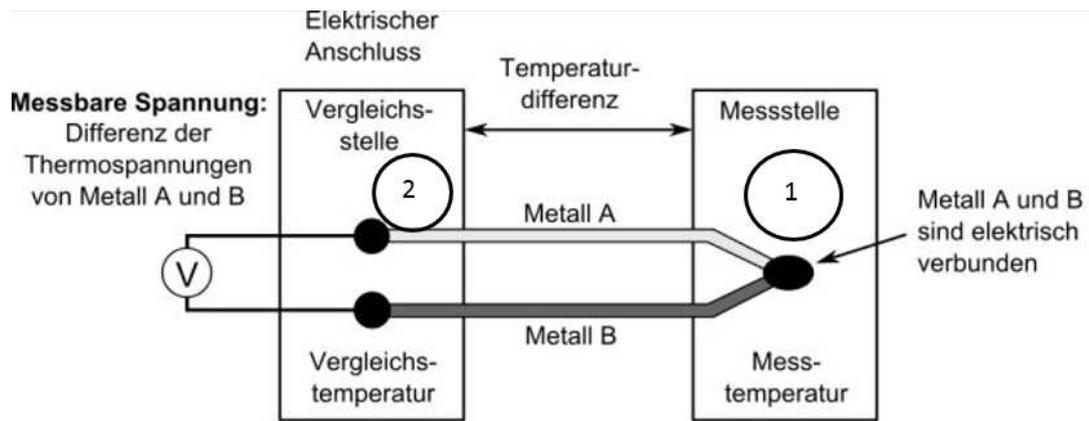


Abbildung 4: Darstellung der Funktionsweise von Thermodrähten [18]

### Piezoelektrisch

Der direkte piezoelektrische Effekt wird durch elastische Verformung von Kristallen hervorgerufen. Im unbelasteten Zustand liegen die Ladungsschwerpunkte  $Q^+$  und  $Q^-$  im Zentrum des Kristalles im Metallgitter. Durch die Beanspruchung des Kristalls mit der Kraft  $F$  ergibt sich eine Verschiebung des Kristallgitters und damit der Ladungsschwerpunkte. Es resultiert eine Mikrospannung  $U$  [4].

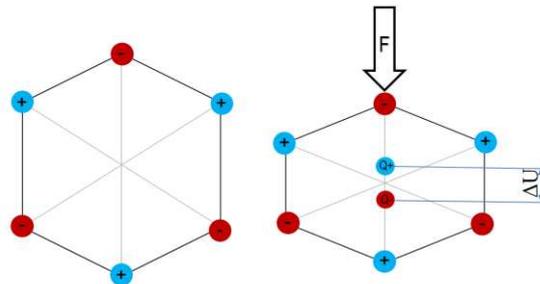


Abbildung 5: Darstellung des Prinzips des piezoelektrischen Effektes

## 2.1.2 Anforderungen an die Fixierung von Sensoren

Die Anforderungen an die Fixierung von Sensoren sind ebenso vielseitig wie die Sensoren und ihre Einsatzspektren selbst.

### Position und Lagesicherung bei allen Sensoren

Unabhängig von der Art, der Funktion oder der Bauweise von Sensoren, liegt die Hauptaufgabe bei der Fixierung von Sensoren in der Positions- und Lagesicherung. Diese kann in Abhängigkeit der Festigkeitsanforderungen durch verschiedene Technologien wie beispielsweise klemmen oder einfaches auflegen realisiert werden. Für höhere Anforderungen in Bezug auf die Fixierung der Position und Lage können Sensoren auch verschraubt, geklebt oder stoffschlüssig mittels Schweißen oder Lötens fixiert werden.

### Übertragung von Kräften und Dehnungen

Bei einigen Aufnehmern genügt es, sie an der richtigen Position zu positionieren, so dass sie ihre Aufgabe erfüllen können. Bei Sensoren zur Abstands- oder Füllstandsmessung beispielsweise ist dies zu meist der Fall. Andere Sensoren, wie z.B. Dehnmessstreifen, benötigen zur Erfüllung der ihnen zugeordneten Messaufgabe, welche in der korrekten Erfassung von Dehnungen liegt, eine Fixierung, welche vorliegende Kräfte und Dehnungen auf den Sensor möglichst ohne Verlust überträgt. Ein einfaches Auflegen des Sensors wird diesem Anspruch nicht gerecht. Um eine Kraftübertragung auf z.B. einen Dehnmessstreifen zu realisieren, sollten die Fügeprozesse Löten, Schweißen oder Kleben gewählt werden.

### Gewährleistung einer ausreichenden thermischen Leitfähigkeit

Sensoren welche zu Messung von Temperaturen oder Temperaturverläufen verwendet werden, wie beispielsweise Thermoelemente und Widerstandsthermometer, benötigen eine möglichst gute Wärmeleitung in den Sensor und zugleich eine möglichst geringe Wärmeleitung aus dem Sensor heraus um schnell präzise Temperaturmessungen durchführen zu können. Diese thermische Leitfähigkeit ist bei einem einfachen anhalten an ein Bauteil, oder einführen in eine Bohrung, wie in VDI 3511 Blatt 5 erklärt, durchaus gegeben, jedoch nicht so ausgeprägt wie bei einem Stoffschluss. Die Ursache hierfür liegt in dem Übergangswiderstand, der sich beim einfachen Anlegen oder Anschrauben des Sensors an das zu messende Bauteil in Folge des sich zwischen diesen beiden Komponenten ergebenden Spalt, resultiert. Bei stoffschlüssigen Verbindungen ist dieser Widerstand deutlich kleiner, wodurch auch das Messergebnis exakter wird.

### Gewährleistung einer guten thermischen Beständigkeit

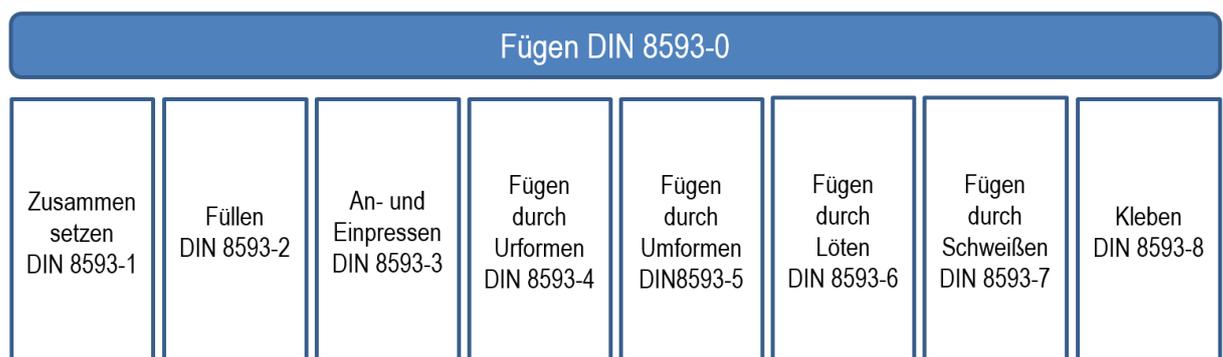
Das Anwendungsspektrum von Messwertaufnehmern ist keinesfalls auf eine Anwendung bei Raumtemperatur beschränkt, sondern erstreckt sich von der Tieftemperatur bis zur Hochtemperaturanwendung. Temperaturüberwachung und –Steuerung, Positionskontrolle und Kontrolle von Gaskonzentrationen sind einige der Aufgaben, welche auch unter sehr hohen Temperaturen bewältigt werden müssen. Aus dieser Randbedingung resultieren neben entsprechenden Anforderungen an den Sensor selbst, auch gesonderte Anforderungen an die Fixierung der Sensoren, in Bezug auf die thermische Beständigkeit. Um diese zu realisieren, sollte ebenfalls auf Stoffschlüssige Fügeverbindungen zurückgegriffen werden. Dabei eignen sich besonders Schweißverbindungen, weil diese im Vergleich zu Lötverbindungen und Klebeverbindungen eine deutlich höhere Temperaturbeständigkeit aufweisen.

In bisher üblichen Anwendungen wurden Sensoren weitestgehend auf die Oberflächen von Bauteilen mittels Kleben, Schweißen etc. aufgebracht oder mit Hilfe von Gewindehülsen und verschiedenen Klebern in, in dem Bauteil eingebrachten Löcher appliziert, wodurch die Fixierung je nach Einsatzort, unterschiedlichen Umgebungseinflüssen und -medien standhalten muss. (siehe Punkt 2.1.3 Technologien zur Fixierung von Sensoren).

Durch die zunehmende Herstellung von Komponenten unter Verwendung von additiven Fertigungsverfahren wie beispielsweise dem Selektiven Laserschmelzen (SLS) und den sich daraus ergebenden Gestaltungsmöglichkeiten, ergibt sich eine neue Ausgangssituation für das Fixieren von Sensoren. Durch das SLS-Verfahren ist es möglich Sensoren direkt in ein neues Bauteil einzudrucken. Geschützt vor äußeren Einflüssen in Form von Umgebungsmedien, mechanischen Belastungen in Folge von Schlägen direkt auf den Sensor o.ä. kann der Sensor innerhalb des Bauteiles seine Aufgabe der Messwertaufnahme und -weitergabe erfüllen. Bedingt durch das Verfahrensprinzip des Pulverbettverfahrens (Siehe Punkt 2.2 Selektives Laserschmelzen), ergeben sich in Folge der starken Erwärmung der Bauteile während der additiven Fertigung neue Anforderungen an die Sensoren und deren Fixierung hinsichtlich der thermischen Beständigkeit. So gewinnt speziell die thermische Beständigkeit der Sensoren sowie deren Fixierung, unabhängig von den im Einsatz vorherrschenden Temperaturen, signifikant an Bedeutung. Weiterhin ergeben sich aus der Integration der Sensoren, in speziell dafür vorgesehene Taschen und Kavitäten im Bauteil, neue Anforderungen in Bezug auf die Zugänglichkeit der Sensoren zur Realisierung der Fixierung. (siehe Abbildung 12).

### 2.1.3 Technologien zur Fixierung von Sensoren

Je nachdem welche Messgrößen mit dem Sensor erfasst werden müssen, wo er zu verbauen ist und wie die Umgebungsbedingungen während des Einbaus bzw. während des Betriebes sind, gibt es sehr unterschiedliche Möglichkeiten wie ein Sensor fixiert werden kann. Prinzipiell handelt es sich bei der Sensormontage um ein Fügen zweier Bauteile, welches nach DIN EN 8593-0 genormt ist.



Für den in dieser Bachelorarbeit behandelten Anwendungsfall und den daraus resultierenden Randbedingungen soll das Fügen durch Füllen, An- und Einpressen, Ur- und Umformen vernachlässigt werden, da es für diese Anwendung von untergeordneter Bedeutung ist.

#### Fügen durch Zusammensetzen

Das Zusammensetzen ist nach DIN 8593-1 eine Verfahrensgruppe die weiter in die Verfahren Auflegen, Aufsetzen, Einlegen, Einsetzen, Ineinanderschieben, Einhängen, Einrenken und federnd Einspreizen unterteilt werden kann.

Ein so ausgeführter Fügevorgang zur Sensorapplikation eignet sich, wenn es sich um eine Fixierung handelt, bei welcher die Anforderung an eine Kraftübertragung nur eine untergeordnete oder gar keine Rolle spielt. Besonders die Fixierung von Thermoelementen nach VDI 3511 Blatt 5 sieht ein Fügen durch Zusammensetzen vor, wenn es sich um Temperaturmessungen innerhalb von Bauteilen handelt (Siehe Abbildung 6).

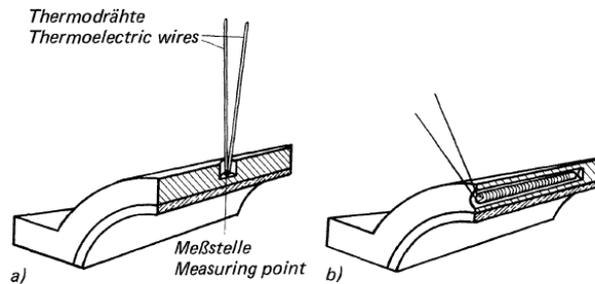
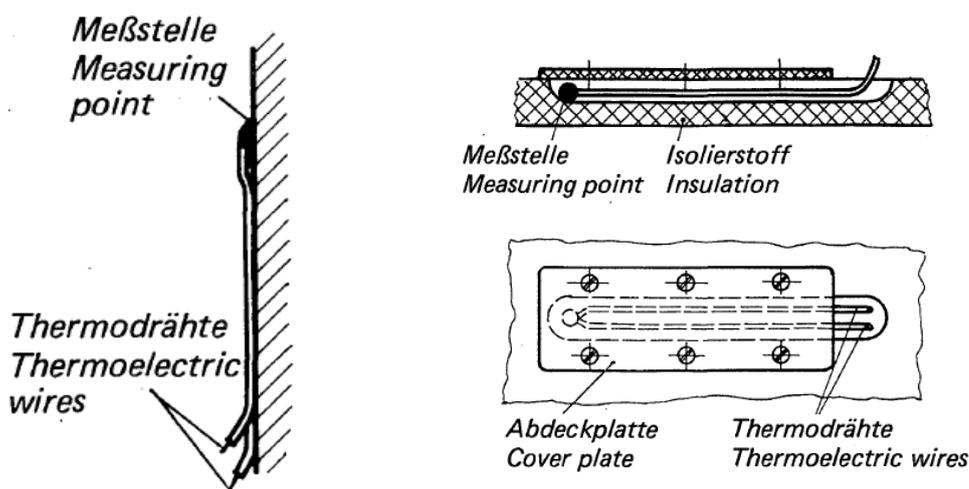


Bild 1. Temperaturmessung in festen Körpern  
 a) mit Thermodrähten  
 b) mit Widerstandsthermometern

Fig. 1. Temperature measurement in solid bodies  
 a) with thermoelectric wires  
 b) with resistance thermometers

**Abbildung 6: Messung der Temperatur in festen Körpern [19]**

Bei der Anwendung dieses Prinzips zur Fixierung von Sensoren gilt es insbesondere zu beachten, dass generell eine schlechtere thermische Leitfähigkeit als bei einem stoffschlüssigen Fügen gegeben ist. Um den Wärmeübergang auf einen Messfühler zu vergrößern, und somit den Wärmeübergang von Messfühler auf Umgebung, wird dieser möglichst großflächig auf die Oberfläche des zu messenden Materials aufgelegt (siehe Abbildung 7). Falls es sich um einen sehr schlecht wärmeleitenden Werkstoff handelt, bei welchem die Temperatur ermittelt werden soll, werden Thermosensoren verwendet, welche eine sehr geringe Wärmeableitung aufweisen um den entstehenden Messfehler möglichst gering zu halten.



**Abbildung 7: Messung der Oberflächentemperatur mit aufgelegten Thermodrähten (Links) und der Oberflächentemperatur an schlecht wärmeleitenden Werkstoffen mit eingelegten Messdrähten [19]**

### Fügen durch Löten

Beim Fügen durch Löten entsteht eine Bindung, durch intermetallische Bindungskräfte, zwischen den, nicht über den Schmelzpunkt hinaus erwärmten, Flächen der miteinander zu verbindenden Fügepartner und einem aufgeschmolzenen Lot. Dies ermöglicht das Fügen von unterschiedlichen Metallkombinationen. Aufgrund der kleinen Abmessungen der zu betrachtenden Sensoren spielt das konventionelle Löten eine nur untergeordnete Rolle, wodurch das Hauptaugenmerk auf dem Laserlöten liegt. Im Unterschied zu den konventionellen Lötverfahren, wird beim Laserlöten die für das Erwärmen der zu fügenden Komponenten, sowie die für das Aufschmelzen des Lotwerkstoffes erforderliche Energie durch einen Laserstrahl bereitgestellt.

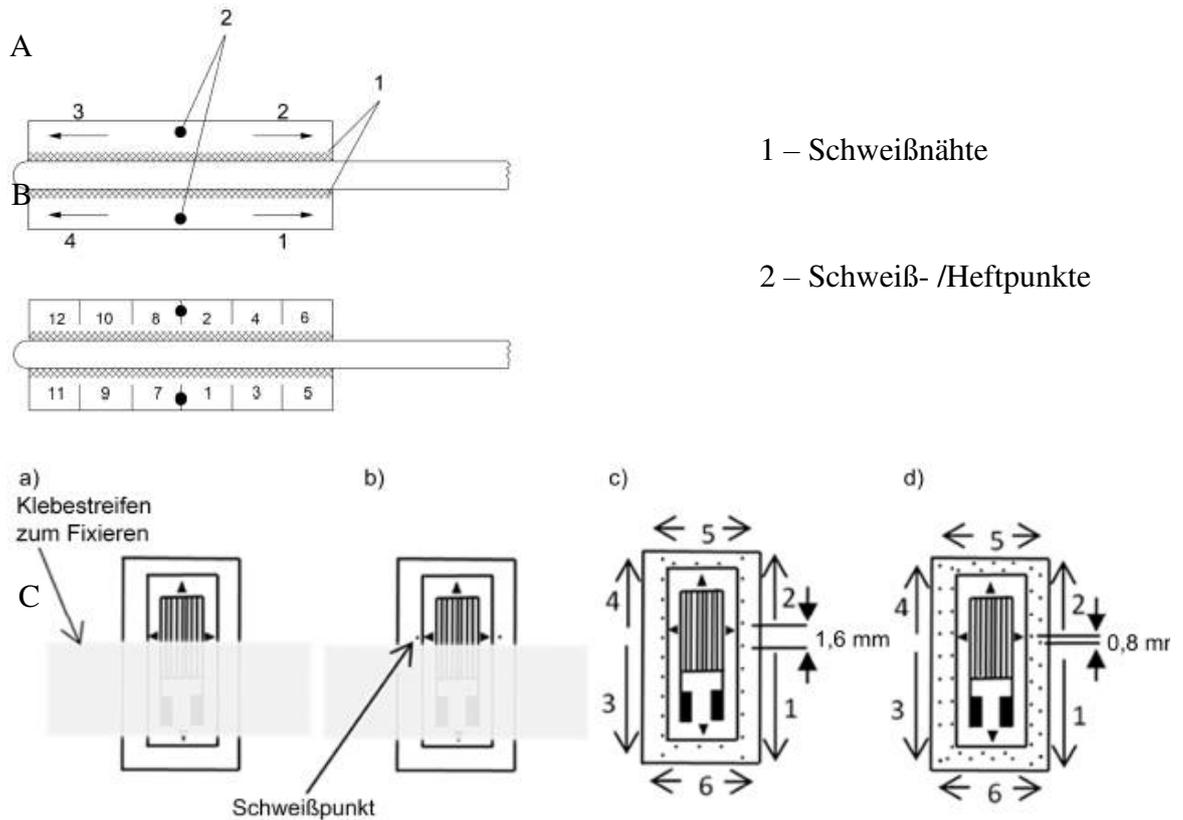
Das Verfahren des Laserlötens eignet sich, durch die im Vergleich zu anderen Lötverfahren gut regelbare und nur lokal begrenzte Energiezuführung, besonders gut zum Applizieren von dünnen Metallfolien-Dehnmessstreifen. Sensorfixierungen welche mittels Laserlöten realisiert werden ermöglichen sowohl eine Kraft- und Momentenübertragung, als auch eine gute thermische Leitfähigkeit, jedoch ist die thermische Beständigkeit durch den Schmelzpunkt des Lotes begrenzt.

### Fügen durch Schweißen

Beim Fügen durch Schweißen werden die miteinander zu verbindenden metallischen Partner über den Schmelzpunkt hinaus erwärmt und bilden eine gemeinsame Schmelze. Wie bereits im vorangegangenen Punkt erwähnt, sind die Abmessungen der zu fügenden Komponenten, welche in dieser Arbeit betrachtet werden sollen, relativ klein. In Folge dessen eignet sich speziell die Gruppe der Strahlschweißverfahren, wie beispielsweise das Laserstrahlschweißen, Elektronenstrahlschweißen oder das Mikroplasma-schweißen, da diese einen geringen und gut fokussierbaren Energieeintrag in einem räumlich begrenzten Bereich ermöglichen. Auf Grund der Anwendung des SLS-Verfahrens zur Fertigung der additiv gefertigten Bauteile, soll speziell das Laserstrahlschweißen betrachtet werden. Laserstrahlgeschweißte Verbindungen zeichnen sich durch ausgezeichnete Nahtqualitäten, sowie einen sehr geringen Energieeintrag aus [20]. Da es sich bei der Laserschweißverbindung um einen Stoffschluss handelt, werden sowohl die Anforderungen hinsichtlich der Kraft- und Momentenübertragung, der Wärmeleitung sowie der thermischen Beständigkeit die an die Fixierung von Sensoren gestellt werden, erfüllt. Damit qualifiziert sich diese Technologie für Anwendung an Sensoren, an deren Fixierung besondere in Bezug auf eine sehr gute Übertragung von Kräften und Dehnung, sowie einen minimalen Übergangswiderstand gestellt werden. Dabei handelt es sich speziell um die Punkt 2.1.1 beschriebenen nach dem resistiven Messprinzip arbeitenden Dehnmessstreifen, sowie um Sensoren zur Messung von Temperaturen und Strom- bzw. Spannungswerten.

Eine weitere Möglichkeit der Fixierung von Sensoren mittels Schweißverbindungen stellt das Widerstandspunktschweißen dar, welches nach DIN 1910-100 den Pressschweißverfahren zugeordnet ist. Es handelt sich bei diesem Verfahren um ein zusatzwerkstoff- und schutzgasfreies Schweißverfahren, bei welchem die Schweißverbindung aufgrund sehr lokalen Aufschmelzens der Grundwerkstoffe durch Strom und gleichzeitiges Zusammenpressen der Schmelzzone erfolgt. Die daraus resultierende Verbindung wird Schweißlinie genannt.

Mit diesen Schweißverfahren lassen sich die nach VDI 2635 Blatt 2 geregelte Montagevarianten eines Metallfolien DMS umsetzen (Siehe Abbildung 8).



**Abbildung 8:** Darstellung der Schweißreihenfolge von Röhren-DMS nach Herstellerangabe (A) und nach einer alternativen Variante (B) und Darstellung der Schweißpunktfolge bei der Montage von Metallfolien-DMS (C) [21]

VDI 2635 Blatt 2			
<p>Kleben mit organischen Klebern</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Metallfolien-DMS mit Kunststoffträger</li> </ul>	<p>Kleben mit keramischen Klebern</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Freigitter-DMS</li> </ul>	<p>Flammspritzen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Freigitter-DMS</li> </ul>	<p>Punktschweißen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Metallfolien-DMS auf Trägerblech</li> <li>➤ Röhren-DMS</li> </ul>

### Fügen durch Kleben

Beim Kleben werden die miteinander zu verbindenden Komponenten mit Hilfe eines Klebstoffes stoffschlüssig gefügt. Die Bauteile werden dabei nicht wie beim Schweißen erwärmt. Infolgedessen kommt es auch zu keinen Phasenumwandlungen innerhalb der verwendeten metallischen Werkstoffe. Diese Form der Applikation von Sensoren wird sehr häufig bei der Montage von Dehnmessstreifen angewendet. Da die Anforderung der thermischen Leitfähigkeit bei Dehnmessstreifen nicht von besonderer Relevanz ist, stellt dieses Fügeverfahren neben dem Widerstandspunktschweißen eine der häufigsten Methoden zur DMS-Montage dar. Es gilt jedoch zu beachten, dass eine Dehnung nicht direkt vom Bauteil auf den Dehnaufnehmer übertragen wird.

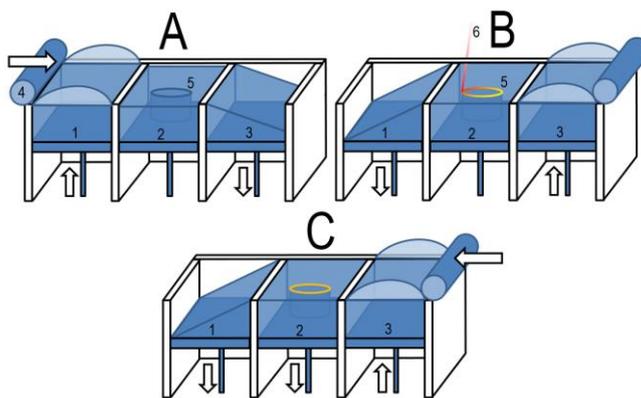
Das Kleben von DMS erfolgt sowohl mit organischen, als auch mit keramischen Klebern nach VDI 2635 Blatt 2. Prinzipiell werden die Kleber in die gerade genannten organische und keramischen Kleber eingeteilt, wobei die erstgenannten für Einsatztemperaturen unter 400 °C, und die zweitgenannten für Einsatztemperaturen über 400 °C konzipiert sind. Prinzipiell ist es für die Sensorapplikation mittels Kleben notwendig die Oberflächen der zu fügenden Bauteile aufzurauen und von Fett und Ölresten zu befreien. Für den Klebstoff werden warmaushärtende Klebstoffe empfohlen, welche sich für den jeweiligen Anwendungsfall bei hohen Temperaturen durch gute Festigkeitseigenschaften, einem hohem Isolationswiderstand und geringem Kriechen auszeichnen. Während der Aushärtung sollte ein geringer Druck von 0,1 bis  $0,5 \frac{N}{mm^2}$  mittels einer Feder oder eines Gewichtes bei 30 °C über der späteren Betriebstemperatur auf dem DMS aufgebracht werden. Sollte es nicht möglich sein, das Bauteil während des Klebens auf Betriebstemperatur zu erwärmen, können besondere hochtemperaturstabile kaltaushärtende Kleber verwendet werden [21]. Keramikkleber werden eingesetzt, wenn Betriebstemperaturen von > 400 °C zu erwarten sind. Diese Kleber werden vorzugsweise zur Fixierung von Freigitter-DMS genutzt, wobei während der Applikation aufgrund des Gesundheitsrisikos eine Schutzausrüstung getragen werden muss. Die Aushärtung von Keramikkleber erfolgt in einem temperaturprogrammierbaren Ofen unter strikter Einhaltung der vom Hersteller vorgegebenen Temperatur-Zeit-Verläufe.

## **2.2 Selektives Laserschmelzen (SLS)**

Das selektive Laserschmelzen (auch additive manufacturing (AM), selective laser melting (SLM) oder auch direktes Metall-Lasersintern (DMLS) genannt) ist ein additives, Werkzeugloses Verfahren zum Herstellen von Bauteilen aus formlosen metallischen Pulverwerkstoffen [22].

Der Grundlegende Aufbau einer SLS Maschine ist exemplarisch in der Abbildung 11 dargestellt. Der Maschinenraum besteht aus 3 Kammern: einer Materialvorratskammer (1), der Arbeitskammer (2) und der Überlaufkammer (3). Das Einbringen des Metallpulvers in den

Arbeitsbereich der Maschine erfolgt über eine Rolle (4) (Siehe Abbildung 9A). Die Menge des Pulvers welche zum Transport zur Verfügung steht wird über den Hub der Vorratskammer nach oben eingestellt. Die Arbeitskammer wird um den Betrag einer Schichtdicke und die Vorratskammer etwas weiter abgesenkt. Nachdem das Pulver durch die Bewegung der Rolle von der Vorratskammer zur Überlaufkammer in den Arbeitsbereich transportiert worden ist, wird die nächste Schicht des Bauteiles (5) mittels einer Lasers (6) hergestellt (siehe Abbildung 9B).

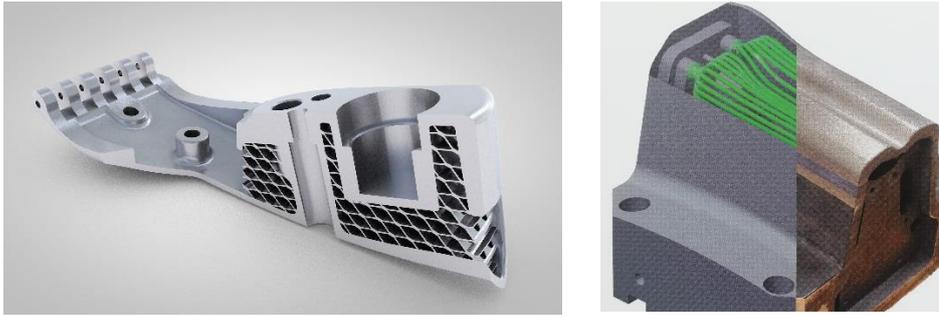


- A) Einbringen des Pulvers in den Arbeitsbereich
- B) Herstellung der Schicht
- C) Erneutes Einbringen des Pulvers in den Arbeitsbereich
- 1) Vorratskammer
- 2) Arbeitskammer
- 3) Überlaufkammer
- 4) Rolle
- 5) Herzustellende Schicht
- 6) Lasterstrahl

**Abbildung 9: Prinzipdarstellung einer SLS-Anlage**

Der Laser schmilzt örtlich das Metallpulver auf, welches nach dem Erstarren durch die spezifische Dichte von  $> 99,5\%$  nahezu die Kennwerte des Werkstoffes des Pulverwerkstoffes aufweist. [22] Während dieses Prozesses wird die Vorratskammer abgesenkt und die Überlaufkammer angehoben um für das Auftragen des Pulvers für die nächste Schicht vorbereitet zu sein. Diesmal verfährt die Rolle in entgegengesetzter Richtung als noch im Schritt A und Schritt B wird wiederholt. Dieser Wechsel der Schritte erfolgt bis das Bauteil hergestellt ist. [23]

Der Formenvielfalt beim SLS sind nur sehr wenige Grenzen gesetzt. Hinterschneidungen, innenliegende Konturen und Kanäle (siehe Abbildung 10) in speziellen Formen als auch außenliegende Flächen, welche bisher durch die Umsetzbarkeit durch Umformen, Urformen, Drehen und Fräsen nur eingeschränkt oder gar nicht herstellbar waren können nun ohne größere Probleme realisiert werden. Von extremen Leichtbau, der bis dieses Verfahren auf den Markt gekommen ist nicht realisierbar war, über unterschiedliche Materialdicken und -Dichten in einem einzigen Bauteil bis hin zu innenliegenden geschwungenen Kanälen bietet das SLS-Verfahren gänzlich neue Möglichkeiten der Umsetzbarkeit in der Herstellung von Produkten. [22] [24]



**Abbildung 10:** Leichtbauteil für den Bahnradsport, bei welchem innenliegend eine Wabenstruktur zur Gewichtsreduzierung gedruckt worden ist (Links) [25], Darstellung von innen liegenden, gekrümmten Kühlkanälen in einem mit SLS hergestelltem Umformwerkzeug (Rechts) [24]

Eine hohe Streckgrenze und Zugfestigkeit, aber auch eine sehr gute Zähigkeit bei einem verzugsarmen Verarbeiten sind die prägenden Eigenschaften des Werkstoffes X3NiCoMoTi18-9-5 mit der Werkstoffnummer 1.2709, welcher häufig für das SLS verwendet wird (Siehe Anlagen AI Datenblatt 1.2709). [24]

### 2.3 Nickel und seine Legierungen

Bei Nickel handelt es sich um ein Metall, welches sowohl als Legierungselement in der Stahlproduktion, als auch als eigenständiger Werkstoff in Form von sogenannten Nickelbasislegierungen immer häufiger in der Industrie angewandt wird. Während 27 % der weltweit 2,35 Mio. [26] produzierten Tonnen Nickel in der Edelstahlproduktion verwendet werden, in welcher es als Legierungselement zur Verbesserung der Korrosions- und Hochtemperaturbeständigkeit eingesetzt wird, werden 13 % direkt in Nickellegierungen weiterverarbeitet (Stand 2018) [27]. Eine der bekanntesten Nickellegierungen stellt das Konstantan dar, welches aufgrund seines über ein breites Temperaturspektrum konstanten elektrischen Widerstandes in hochgenauen Widerständen verwendet wird [28].

#### Phasen und Legierungen

Nickellegierungen liegen in bis zu 3 Phasen vor. Diese sind die  $\gamma$ -,  $\gamma'$ - und die  $\gamma''$ -Phase.

#### $\gamma$ -Phase

Bei der  $\gamma$ -Phase handelt es sich um einen Kubisch Flächenzentrierten Mischkristall, welcher neben Nickel als Hauptelement noch die Elemente Co, Fe, Cr, Mo und W in gelöster beinhaltet. Durch die unterschiedlichen Atomdurchmesser kommt es zu Verspannungen im Atomgitter, welche als Mischkristallverfestigung bezeichnet werden.

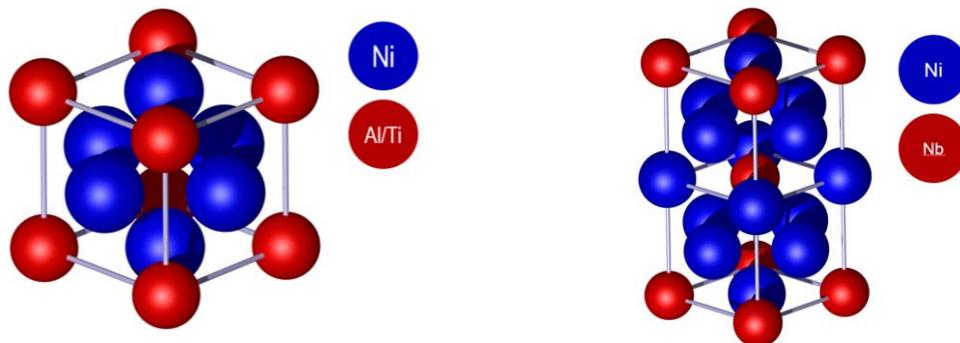
#### $\gamma'$ -Phase

Eine signifikante Steigerung der Festigkeit einer Nickellegierung wird durch die Ausscheidung der 2. Phase, der  $\gamma'$ -Phase, erreicht. Durch hinzulegieren von Aluminium und Titan

bildet sich diese kohärente, intermetallische Phase im Nickel-Mischkristall mit der theoretischen Zusammensetzung  $\text{Ni}_3\text{Al}$  bzw.  $\text{Ni}_3\text{Ti}$ , welche sich in der  $\gamma'$ -Phase ausscheidet. Durch die so entstehende Behinderung von Versetzungsbewegungen nennt man diese Verfestigungsform Ausscheidungsverfestigung. Bei Ausscheidungsgehärteten Superlegierungen liegt der Anteil der  $\gamma'$ -Phase bei 20 % bis maximal 30 %, wohingegen bei Gussteilen der Anteil bei bis zu 70 Masseprozent liegt. Der Aufbau des Gitters dieser Phase ist das kubisch flächenzentrierte Gitter, wobei das Nickel die Flächenmitten, und das Aluminium bzw. das Titan die Eckatome besetzt (siehe Abbildung 11). Je nachdem welche Elemente noch hinzulegiert werden, können die Nickelatome durch Kobalt und Kupfer substituiert werden. Aluminium und Titan können durch Titan Niob, Tantal, Vanadium, Mangan und Silizium ausgetauscht werden. Die Elemente Eisen, Chrom und Wolfram sind in der Lage sämtliche Positionen in dieser Phase zu belegen.

### $\gamma''$ -Phase

Die  $\gamma''$ -Phase ist eine scheibenförmige Nickel-Niob-Verbindung welche bis etwa 650 °C stabil ist. Bei Schmiedeteilen wird durch zulegiere von Niob die  $\gamma''$ - und, bei hohen Temperaturen, die daraus resultierende plattenförmige  $\delta$ -Phase erzeugt, um weniger  $\gamma'$  mit der daraus entstehenden versprödet wirkenden  $\eta$ -Phase im Gitter vorliegen zu haben. Bei den in den Experimenten verwendeten Werkstoffen Inconel 600 und 1.4571 wurde kein Niob zulegiert (siehe 4.2.3 Versuchswerkstoffe), woraus sich herleiten lässt, dass die  $\gamma''$ - und die daraus entstehende  $\delta$ -Phase weder im Gefüge des Grundwerkstoffes, noch im Bereich der Schweißnaht anzutreffen sind.



**Abbildung 11:** Schematische Darstellung der  $\gamma'$ -Phase (Links) und der  $\gamma''$ -Phase (Rechts)

### Schweißbeugung von Cr-Ni-stählen und Nickellegierungen

Hochlegierte austenitische rostfreie Edelmetalle (Nickelgehalt > 8 %) gelten generell, ähnlich wie Nickelbasislegierungen, mit allen herkömmlichen Schweißverfahren als gut schweißgeeignet, mit Ausnahme des Autogenschweißens [29]. Abgesehen von einer möglichst guten Arbeitsvorbereitung, im Sinne einer sorgfältigen Reinigung der zu verschweißenden Bleche,

bedarf es keiner gesonderten Maßnahmen, wie beispielsweise Vorwärmen, zum Fügen von Nickel, hochlegierten Sonderedelstählen oder sogenannten Superlegierungen [30]. Es sollte Jedoch darauf geachtet werden, dass die Streckenenergie welche während des Fügens in die Bauteile gebracht wird möglichst gering ist. Aufgrund der hohen Ausdehnungskoeffizienten und der verringerten Wärmeleitfähigkeit hochlegierter Stähle ist der Wärmeverzug bei diesen Stählen besonders ausgeprägt. Dem kann mit Hilfe von näher aneinander liegenden Schweißpunkten, Kupferschienen und einer verringerten Streckenenergie entgegengewirkt werden.

### 3 Problemstellung und Lösungskonzepte

Die Problemstellung der vorliegenden Arbeit liegt in der Integration von Sensoren in mittels SLS gefertigten Bauteilen während des generativen Fertigungsprozesses. Die Position dieser Messelemente wird durch das additive Fertigen von Taschen vorgegeben, wodurch ein Ausmessen der Positionen, oder auch ein aufwendiges Ausrichten der Sensoren in die gewünschte Richtung entfällt. Die Abmaße der Tasche beruhen auf dem Angebot des DMS-Dummys und dessen CAD Dateien (Siehe Abbildung 12). Die Taschengometrie kann zur Realisierung bestimmter Fügeverfahren variieren, wodurch jedoch die Problematik der Zugänglichkeit durch die besonders kleinen Abmaße der hochpreisigen Hochtemperaturdehnmesstreifen nicht generell behoben wird. Die Fixierung der DMS muss aufgrund der im SLS Verfahren hohen auftretenden Temperaturen eine sehr gute thermische Beständigkeit aufweisen, weshalb eine Fixierung mittels Kleber nicht weiter in Betracht gezogen kann. Diese weisen, je nach Hersteller, gute Temperaturstabilitäten nur bis  $\sim 600\text{ °C}$  auf [31]. Des Weiteren belaufen sie Aushärtezeiten der Klebstoffe zumeist auf mehrere Stunden, wodurch ein schnelles Herstellen der Bauteile weiter verzögert wird.

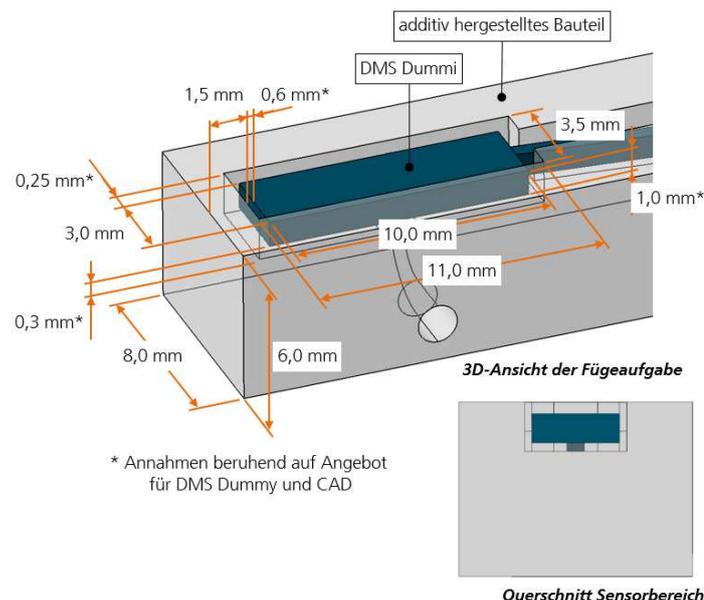


Abbildung 12: Prinzipdarstellung des eingelegten DMS Dummys in die SLS gefertigte Tasche

#### 3.1 Technologiekonzept

Aufgrund der Anforderung der thermischen Beständigkeit und der Notwendigkeit der Übertragung von Dehnungen auf den DMS sind die Fügeverfahren Zusammensetzen und Kleben

aus den nachfolgenden Betrachtungen ausgeschlossen. Es werden zur Umsetzung der Fügeaufgabe die Verfahren Widerstandspunktschweißen, Laserstrahlschweißen und Laserstrahl-löten betrachtet und miteinander verglichen.

### 3.1.1 Widerstandspunktschweißen

Das Widerstandspunktschweißen (WPS) ist sehr gut zum Schweißen von Überlappschweißverbindungen von Blechen geeignet, da es durch einen punktuellen Eintrag der Wärme für wenig thermischen Verzug sorgt und dazu mit sehr geringen Taktzeiten durchführbar ist. Außerdem lassen sich Werkstoffkombinationen miteinander verbinden die ansonsten nur schwer zu schweißen sind. Die, aufgrund von Verfahrenwegen der Elektroden auftretenden Bewegungen und der Haltezeit von  $\sim 0,2$  s, mittlere Prozessgeschwindigkeit, die Regelung zur Montage von Dehnmessstreifen bei hohen Temperaturen nach VDI 2635 Blatt 2 und die geringe thermische Belastung des Grundwerkstoffes bringen dieses Verfahren in die nähere Auswahl der möglichen Fügeverfahren zur Realisierung der gestellte Fügeaufgabe.

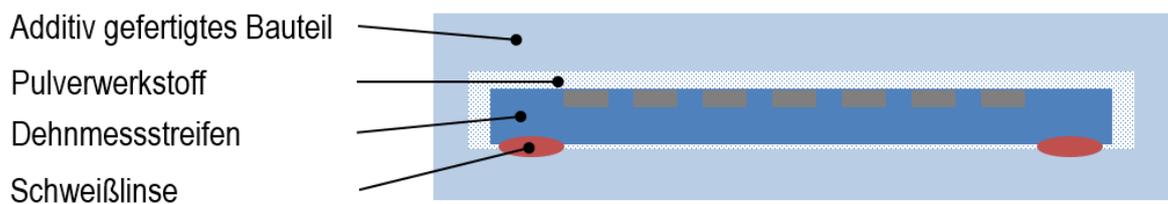


Abbildung 13: Darstellung des durch Widerstandspunktschweißen fixierten Hochtemperatur-DMS

### 3.1.2 Laserstrahlöten

Beim Laserstrahlöten handelt es sich um eine Fertigungstechnik, welche die Vorteile einer Lötverbindung und einer Laserbearbeitung kombiniert. Während beim konventionellen Löten der Wärmeübergang auf das Bauteil bzw. das Lot durch die Spitze des LötKolbens erfolgt, wird er beim Laserstrahlöten mittels eines Lasers berührungslos realisiert. Das Laserlöten kann alternativ zur konventionellen Lötmethode mittels Lötendraht, auch mit einer Löt-paste durchgeführt werden [32]. Die Löt-nahtvorbereitung sieht das Herstellen einer sauberen, fett- und schmutzfreien Oberfläche mittels Feilen, Schleifen und Reinigen mit Alkohol sowohl am Grundwerkstoff als auch an dem anzulötenden Material vor. [33]

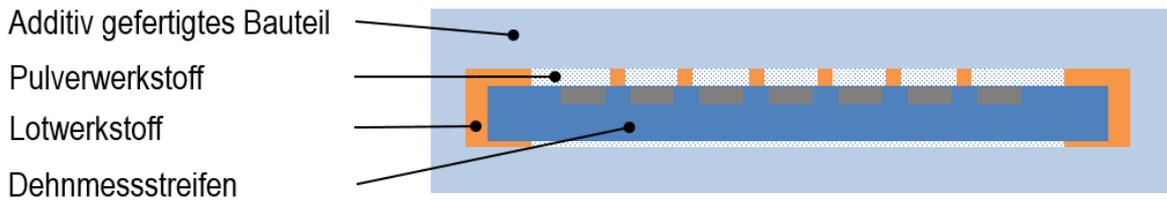


Abbildung 14: Darstellung des durch Laserlöten fixierten Hochtemperatur-DMS

### 3.1.3 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen mit einem Festkörperlaser stellt nach DIN EN 1910–100 ein Schmelzschweißverfahren dar und besitzt DIN EN ISO 4063 die Ordnungsnummer 521. Damit ein Laser (engl. „Light Amplification of Stimulated Emission of Radiation“) eine möglichst hohe Intensität und damit einen großen Energieeintrag realisieren kann und dieser auch besonders gut fokussierbar ist, muss er gewissen Qualitätsanforderungen entsprechen. Die Lichtwellen müssen hoch monochromatisch und kohärent als auch mit einer niedrigen Divergenz ausgerichtet sein. Das Laserstrahlschweißen zeichnet sich durch ausgezeichnete Nahtqualitäten, sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten und durch seine berührungslose Fertigung aus [20]. Aufgrund der hohen Energiedichte, bei sehr schmalen geschweißten Nähten, ist die thermische Belastung für das Material nahe der Schweißnaht minimal.

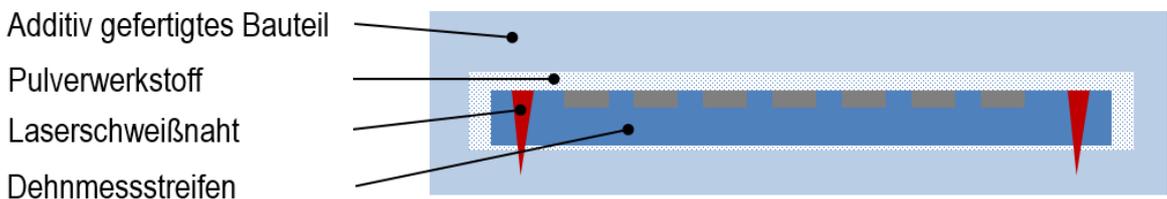


Abbildung 15: Darstellung des durch Laserstrahlschweißen fixierten Hochtemperatur-DMS

## 3.2 Auswahl des Fügeverfahrens

In der nachfolgenden Tabelle werden die Fügeverfahren nach den wichtigsten Kriterien zum Herstellen der Verbindung von Inconel 600 und dem Pulverwerkstoff bewertet. Zur besseren Darstellung des Zutreffens oder nicht-Zutreffens eines Kriteriums werden Punkte von 0 bis 10 vergeben, wobei 0 ein absolutes nicht zutreffen und 10 ein absolutes zutreffen darstellt.

**Tabelle 1: Vergleich der unterschiedlichen möglichen Schweißverfahren**

	Widerstandspunkt-schweißen	Laserstrahl-löten	Laserstrahl-schweißen
↑ Prozessgeschwindigkeit	5/10	8/10	10/10
↓ Nahtbreiten	5/10	8/10	10/10
↑ Energiedichte	4/10	8/10	10/10
↑ Flexibilität	4/10	7/10	8/10
↓ Nachbearbeitung	10/10	5/10	10/10
↓ Streckenenergie	6/10	7/10	9/10
Berührungslos	-	10/10	10/10
SLS-Anlagen geeignet	-	8/10	10/10
Reproduzierbarkeit	5/10	10/10	10/10
Σ	44	71	87

Das Laserstrahlschweißen weist unter den hier genannten Fügemethoden mit bis zu mehreren hundert mm/s die höchste Prozessgeschwindigkeit bei zeitgleich minimalen Nahtdurchmessern auf. Bei Verwendung einer 100 µm Faser wird der Lichtstrahl mit einer sehr großen Energiedichte auf einen sehr kleinen Spot fokussiert, was in Kombination mit der hohen Schweißgeschwindigkeit zu einer sehr kleinen Streckenenergie führt. So wird der Hochtemperaturdehnmessstreifen minimal thermisch belastet und es entsteht nur ein sehr geringer Verzug. Sowohl das Laserstrahl-löten und das Laserstrahlschweißen überzeugen durch eine sehr gute Reproduzierbarkeit ihrer Ergebnisse, da das Werkzeug (Laser) keinem Verschleiß ausgesetzt ist. Beim Widerstandspunktschweißen wirkt sich eben dieser Verschleiß an der Elektrode nachteilig auf die Schweißlinsenqualität aus [34]. Der größte Vorteil gegenüber dem WPS ist, dass das Laserstrahlschweißen auf einer SLS-Anlage durchgeführt werden kann. Das heißt, das Bauteil wird nach dem additiven Fertigen der Tasche für den Sensor nicht aus der Arbeitskammer herausgenommen, sondern verweilt an seiner Position. Nach dem Entfernen des Pulvers wird der DMS nur eingelegt und kann in der Arbeitskammer des SLS gefügt werden. Die Vorgehensweise erspart zum einen zusätzliche Maschinen, Zeit für das Einrichten der gedruckten Bauteile und Kosten. Daher wird in den nachfolgenden Versuchen mit diesem Fügeverfahren gearbeitet.

## 4 Experimentelle Untersuchung

### 4.1 Versuchsplanung

Die für die experimentelle Untersuchung, der im vorangegangenen Punkt 3 beschriebenen Problemstellung, erforderlichen Versuche, werden in 2 Reihen unterteilt. In der ersten Reihe soll mit Hilfe einer Parameterstudie die generelle Machbarkeit des nachzuweisenden Technologiekonzeptes untersucht und nachgewiesen werden. Dabei sollen für die Verfahrensvarianten des Laser-CW-Schweißens und des gepulsten Laserstrahlschweißens der Einfluss der relevanten Prozessparameter wie beispielsweise Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Pulsdauer etc. ermittelt sowie deren Einfluss auf die resultierende Schweißnahtqualität untersucht werden. Um die thermische Belastung der Proben auf ein Minimum zu reduzieren, soll ein minimal kleiner Spot verwendet werden. Auf Grund dessen, wird die Fokusslage auf konstant 0 festgelegt, da jede Vergrößerung des Fokussdurchmessers eine Erhöhung des Energieeintrages zur Folge hätte.

Die anschließende Bewertung der in den Versuchen hergestellten Verbindungen erfolgt mittels einer Sichtprüfung, sowie über die metallografische Untersuchung von aus den Proben hergestellten Mikro- und Makroschliffen.

Die zweite Versuchsreihe beinhaltet die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften ausgewählter Verbindungen. Dazu sollen auf Basis der Ergebnisse aus dem ersten Versuchsteil, unter Anwendung ausgewählter Parametersätze, Scherzugproben hergestellt und geprüft werden.

### 4.2 Versuchsaufbau

#### 4.2.1 Schweißtechnische Ausrüstung

Als Strahlquelle wird ein diodengepumpter Scheibenlaser TruDisk6001 der Firma Trumpf verwendet (siehe Abbildung 17). Diese Strahlquelle weist folgende technische Spezifikation auf:

- Laserleistung: 120 – 6000 W
- Min. Strahldurchmesser: 100  $\mu\text{m}$
- Wellenlänge: 1030 nm
- Strahlqualität: 4 mm\*mrad



Abbildung 16: Laserquelle TruDisk 6001

Da es sich bei dem verwendeten Laser um einen Festkörperlaser handelt, kann die Strahlführung von der Strahlquelle zur Bearbeitungsoptik über ein Lichtleitkabel realisiert werden, wobei ein LLK mit einem Durchmesser von  $100\ \mu\text{m}$  verwendet wurde. Für die Durchführung der Schweißversuche wurde eine Scanneroptik vom Typ Trumpf PFO 33/D2 mit folgenden, in Tabelle 2, aufgelisteten Kennwerten verwendet

Tabelle 2: Kennwerte der Scanneroptik Trumpf PFO33/D2

Kollimation	150
Brennweite	345
Abbildungsverhältnis	1:2,3
Scanbereich	240 mm x 140 mm

Die Verwendung der Scanneroptik ermöglicht es unabhängig vom Werkzeugträgersystem sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten wiederholgenau, frei programmierbar und exakt positionierbar durchzuführen und so die Reproduzierbarkeit der Schweißversuche zu gewährleisten.

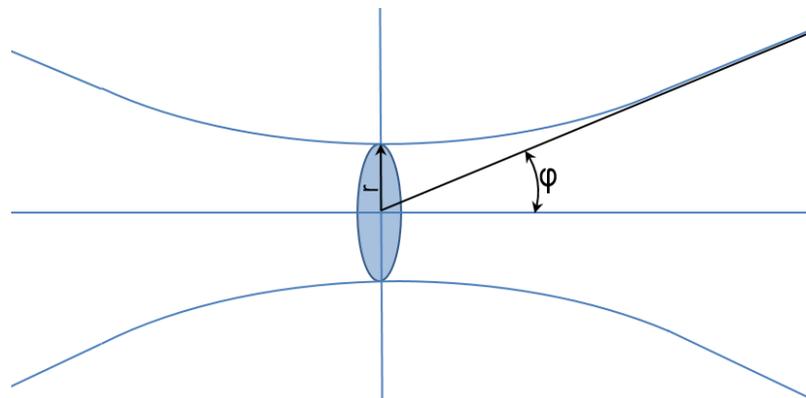


Abbildung 17: Schematische Darstellung des nicht parallelen realen Laserverlaufs mit den Kennwerten des Strahlparameterprodukts

### 4.2.2 Handlungsequipment

Für die Durchführung der Schweißversuche wurde, zum Zweck der groben Vorpositionierung, als Werkzeugträgersystem ein Schweißroboter vom Typ NJ100 der Firma Comau verwendet. Dieser weist in Abhängigkeit der Achspositionen einen max. Traglast von 110Kg am Flansch und einem Aktionsradius von etwa 3 Metern auf. Die Fixierung der Lage der Schweißproben wurde mit Hilfe einer pneumatischen Spannvorrichtung realisiert, auf der die beiden zu fügenden Werkstoffe (Inconel 600 Oben und Edelstahl 1.4571) im Überlappstoß angeordnet wurden. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass die Folien knitterfrei auf dem Probenkörper aus Edelstahl positioniert wurde.

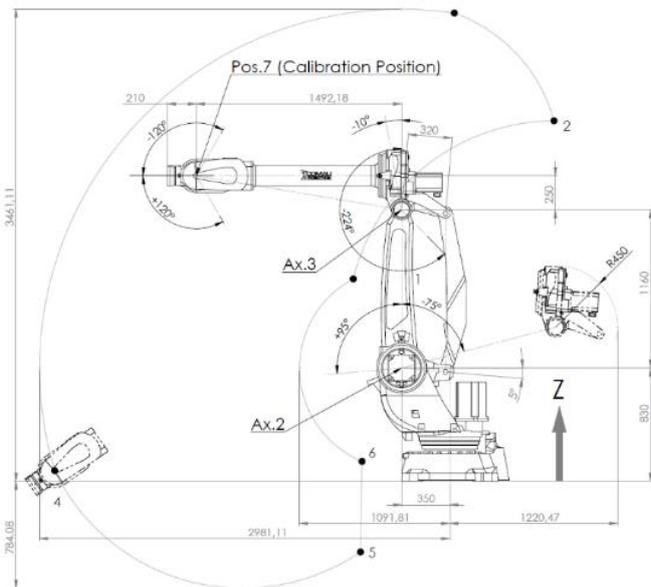


Abbildung 18: Roboter Comau MJ110 (Links) und dessen Arbeitsbereich (Rechts)

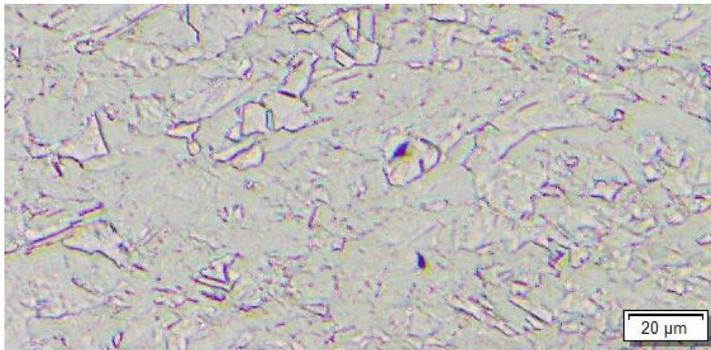
### 4.2.3 Versuchswerkstoffe

#### NiCr15Fe - 2.4816

Bei diesem Werkstoff, welcher auch unter den Namen Inconel 600, Alloy 600 oder Nicrofer 7216 geführt wird, handelt es sich um eine Nickel-Chrom-Eisen Legierung mit sehr guter Warmfestigkeit, Zähigkeit und ausgezeichneten Resistenzen gegen Oxidation. Aufgrund dieser exzellenten Eigenschaften und der horrenden Preise für diese Werkstoffe, werden sie auch Superlegierungen genannt. Für die Versuchsreihen A und B wird mit einer 0,1 mm dicken und 70 mm breiten kaltgewalzten Inconel 600 Folie gearbeitet. Das Trägerblech der betrachteten Hochtemperaturdehnmessstreifen KHCX-10-120-G13 der Firma Kyowa von besteht aus einem 0,1 mm dicken Inconel 600 Streifen.

**Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von Inconel 600**

	<i>Fe</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>P</i>	<i>Al</i>
<i>Min.</i>	6,0	14,0	Rest	0,05							
<i>Max.</i>	10,0	17,0		0,15	0,015	1,0	0,5	0,3	0,5	0,02	0,3

**Abbildung 19: Gefüge des Inconel 600**X3NiCoMoTi18-9-5 – 1.2709

Die im SLS-Verfahren hergestellten Bauteile bestehen aus 1.2709. Dabei handelt es sich um einen martensitisch aushärtendem Werkzeugstahl, den es in Pulverform oder als Rohr zu erwerben gibt. Da jedoch für die generelle Betrachtung der Möglichkeit zur Herstellung einer Schweißverbindung die Versuche mit 2 Blechen durchgeführt werden sollen, musste an dieser Stelle auf ein Ausweichmaterial zurückgegriffen werden.

X6CrNiMoTi17-12-2 – 1.4571

Der Werkstoff 1.4571 ist ein hochlegierter Sonderedelstahl der aufgrund seiner annähernd chemischen Ähnlichkeit zu 1.2709 und der Verfügbarkeit als Blech ausgewählt wurde. Laut dem Datenblatt der deutschen Edelstahlwerke handelt es sich hierbei um einen austenitischen Stahl mit sehr guter Schweißbeignung, welche laut Stahlhändlern sehr ähnlich jener von 1.2709 ist.

**Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von 1.2709 (oben) und 1.4571 (unten)**

<i>1.2709</i>	<i>C</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Co</i>
<i>Min</i>		4,55	17	0,80						8,5
<i>Max</i>	0,03	5,20	19	1,20	0,25	0,25	0,15	0,01	0,01	10,0
<i>1.4571</i>	<i>C</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Ti</i>	<i>Cr</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	
<i>Min.</i>		2,0	10,5	5 x C	16,5					
<i>Max.</i>	0,08	2,5	13,5	0,7	18,5	1,0	2	0,3	0,045	

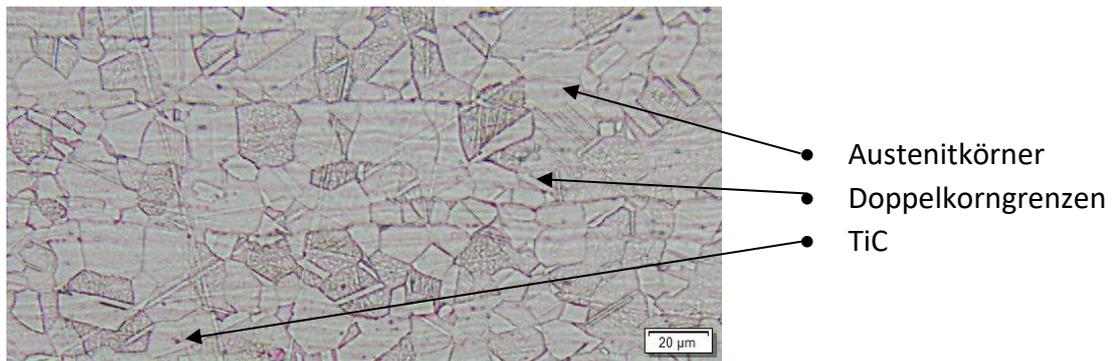


Abbildung 20: Austenitisches Gefüge des 1.4571

### 4.3 Versuchsdurchführung

Das Schweißen der Versuchsreihen A und B erfolgt innerhalb einer Spannvorrichtung. Die Laseroptik wird mittels der Handsteuerung des Roboters exakt in den Nullfokus über die zu verschweißenden Bleche gelenkt.

#### 4.3.1 Versuchsreihe A – Nachweis Machbarkeit

In der Versuchsreihe A wird zunächst die Machbarkeit für die Herstellung von Schweißverbindungen aus Inconel 600 Folie der Dicke 0,1 mm und massiven Bauteilen aus 1.4571 untersucht. Dazu wurden in einem ersten Schritt für beide Werkstoffe Probenkörper mit den Abmessungen von 100 mm x 100 mm hergestellt.

Für die Durchführung der Versuche wurde die Inconelfolie auf die Probenkörper aus 1.4571 aufgelegt und mit Hilfe der pneumatischen Spannvorrichtung fixiert. Dabei wurde besonders darauf geachtet, dass die Folie möglichst eben und ohne knittern durch die Vorrichtung fixiert wird, um daraus resultierende Einflüsse auf die Anbindung der Schweißnaht zu minimieren. Um den Einfluss der thermischen Ausdehnung und des Verzuges der Folie in Folge des Schweißprozesses zu minimieren, wurden immer nur max. 3 Schweißnähte auf einem Probenkörper erzeugt, die sich in einem ausreichenden Abstand zu einander befinden.

Im Anschluss an die exakte Positionierung und Fixierung der Proben wurden 3 verschiedene Schweißstrategien untersucht:

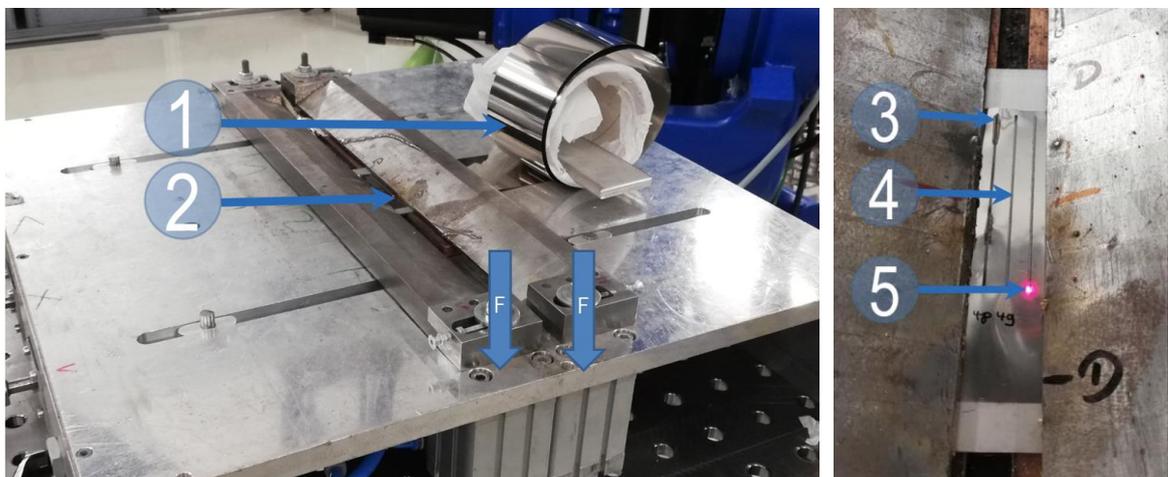
- CW-Schweißen Linear: Das continuous-wave Schweißen beschreibt einen Schweißvorgang welcher durch einen dauerhaft auf der Oberfläche auftreffenden Laserstrahl durchgeführt wird. Der erste Teilversuch sieht vor geradlinige, mit CW-Laserstrahlschweißen hergestellte Nähte zu erzeugen.
- Pulsschweißen Linear: im Gegensatz zum CW-Schweißen trifft der Laser beim Pulschweißen nicht permanent auf der Oberfläche des Werkstoffes auf. Er wird gepulst

mit der Frequenz  $f$  und der Pulsdauer  $t_s$  emittiert und reduziert so die Streckenenergie durch Zeiten in welchen nicht geschweißt wird.

- CW-Schweißen Kreise: Aufgrund dessen, dass man den Schweißvorgang der Hochtemperaturdehnmessstreifen in der Bearbeitungszelle einer SLS-Anlage durchführen möchte wird das „Kreise Schweißen“ als Ersatz für ein Widerstandspunktschweißen erprobt, welches sich durch geringe thermische Belastung des Materials nahe der geschweißten Punkte auszeichnet. Hauptaugenmerk liegt bei dieser Schweißstrategie auf den Festigkeitsuntersuchungen in der Versuchsreihe B, da die Nahtgeometrien gleich derer des CW-Schweißens sind.

Für die Durchführung aller Versuche wurde die Laserleistung auf einen Bereich von 120 W bis 1000 W limitiert. Dies begründet sich in der minimal einstellbaren Laserleistung der verwendeten Strahlquelle von 120 W, sowie der max. Leistung, der im SLS-Verfahren zur Anwendung kommenden Strahlquelle von 1000 W.

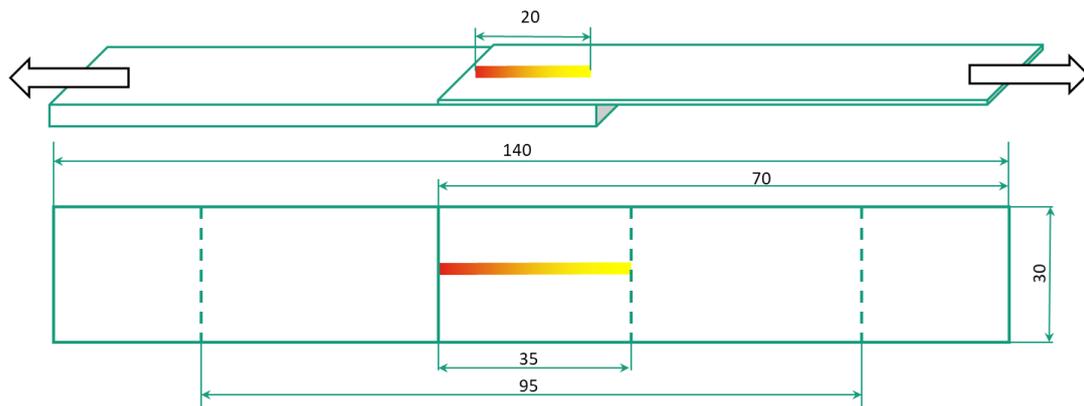
Zur Ermittlung des Einflusses der Schweißparameter auf die Schweißnahtqualität wurde der Einfluss der jeweiligen Schweißparameter für das CW-Schweißen (Laserleistung und Schweißgeschwindigkeit) sowie für das gepulste Laserstrahlschweißen (Pulsleistung, Pulsdauer, Frequenz) untersucht. Das Ziel dabei war es Parameter zu finden, die einen minimalen Energieeintrag bei gleichzeitiger Ausbildung einer ausreichenden Anbindung gewährleisten.



**Abbildung 21:** Versuchsaufbau Reihe A: 1) Aufgewickelter Inconel 600 Blechstreifen, 2) eingespanntes Ende der Inconel 600 Rolle auf dem Werkstoff 1.4571, 3) 1. Schweißnaht, 4) 2. Schweißnaht, 5) 3. Schweißnaht

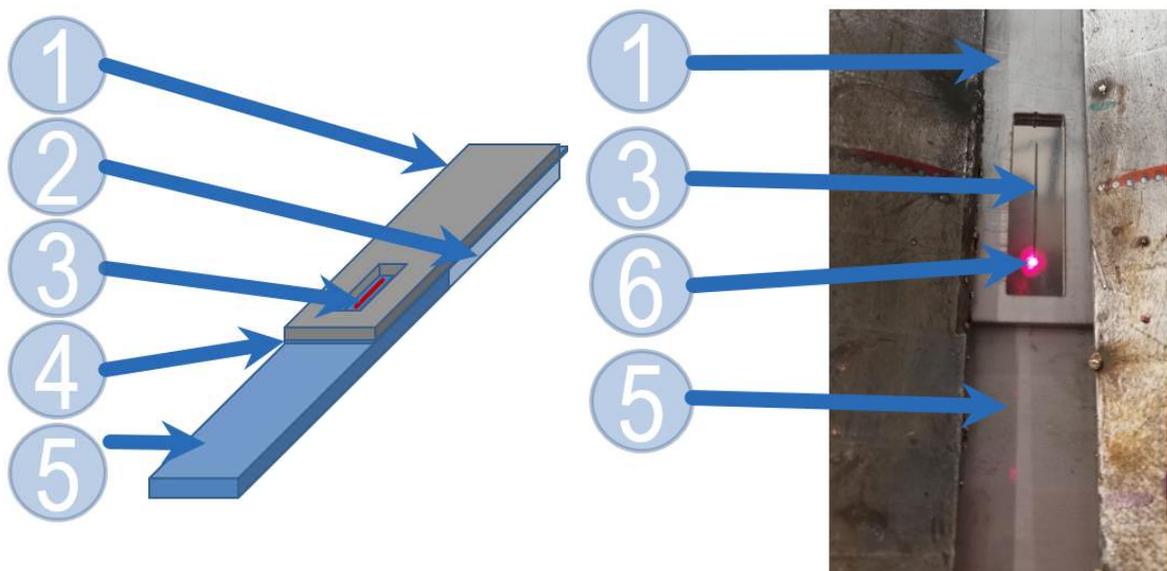
#### 4.3.2 Versuchsreihe B – Zugscherversuch

Zu Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der hergestellten Proben, wurden Scherzugversuche durchgeführt. Die geometrische Gestaltung der Proben erfolgte dabei in Anlehnung an die Vorgaben der DIN 14273.



**Abbildung 22:** Probengeometrien für Scherzugversuch mit längs verlaufender Naht in Anlehnung an die DIN 14273

Während in der Versuchsreihe A die Inconelfolie erst einseitig eingespannt, von Hand quer gespannt und dann mit der 2. Spannbacke fixiert worden ist, wird die Herangehensweise bei der Versuchsreihe B abgeändert. Die geschilderte Arbeitsweise in der Reihe A ergibt zu häufig noch kleinere Welligkeiten und somit Anbindefehler. Das Schweißen der ersten Naht veränderte zudem durch die entstehenden Schrumpfspannungen die Ebenheit der Folie weiter, sodass häufiger nachgespannt werden musste. Daher wird zum Herstellen der Schweißnähte an den Zugscherproben eine Schweißmaske aus 2 mm dickem Stahl verwendet. Diese soll die Spannkkräfte näher an den zu schweißenden Bereich führen und in diesen, die zu verbindenden Bleche mit einem idealerweise technischen Nullspalt versehen.



**Abbildung 23:** Darstellung des Prinzips des Schweißens mit Schweißmaske (Links) und der eingebauten Schweißmaske (Rechts): 1) Schweißmaske, 2) Unterlegblech zum verhindern des Durchknickens der Inconel-Folie, 3) Schweißnaht 4) Inconel 600 Folie, 5) Grundwerkstoff, 6) Pilotlaser

Die so entstandenen Zugproben werden im Prüflabor des Fraunhofer IWU in Dresden an der Zugmaschine „retrolit inspect 50 desk“ getrennt.

## 4.4 Bewertung der Schweißverbindung

### 4.4.1 Sichtprüfung

Die optische Prüfung der Nahtqualität wurde in Anlehnung an die Kriterien der Norm DIN EN ISO 13919-1:2018-11 durchgeführt. Aufgrund der sehr kleinen Nähte (Nahtbreiten bis  $\sim 300 \mu\text{m}$ ) ist eine Sichtprüfung der Schweißnähte nur in Bezug auf gröbere Schweißnahtunregelmäßigkeiten in Form von Spritzern mit dem menschlichen Auge möglich. Von sämtlichen Schweißnähten wurden Nahaufnahmen mittels des Mikroskopes SZX10 angefertigt um die Schweißnahtgeometrien besser vermessen und Schweißnahtunregelmäßigkeiten näher begutachten zu können. Die Kriterien zur Beurteilung der Schweißnahtqualität sind:

- Nahtenfall / Nahtunterwölbung
- Bindefehler Ja / Nein
- Spritzer
- Poren / Porennester
- Risse

### 4.4.2 Metallografische Untersuchung

Für die genauere Beurteilung der Nahtgeometrie, des Nahtquerschnittes und des Gefüges werden aus den geschweißten Blechen Querschliffproben entnommen, entsprechend der in Tabelle 5 beschriebene Präparationsanleitung präpariert und mikroskopisch untersucht.

**Tabelle 5: Vorgehensweise beim Präparieren der Metallografieproben**

Präparationsschritt	Vorgehensweise
Trennen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ausschneiden der Proben an der Maschine „Discotom 100“</li> </ul>
Einbetten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Epoxidharz „Technovit Epox Resin“ + Härter „Technovit Hardener Regular“ im Verhältnis 2:1</li> <li>• Aushärtezeit: <math>\sim 10 \text{ h}</math></li> </ul>
Schleifen/Polieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schleifen in 3 Stufen:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- P320 <math>\rightarrow</math> P1000 <math>\rightarrow</math> P2000</li> <li>- Suspension: Wasser</li> </ul> </li> <li>• Polieren in 3 Stufen               <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>3 \mu\text{m} \rightarrow 1 \mu\text{m} \rightarrow \frac{1}{4} \mu\text{m}</math></li> <li>- Suspension: „Diapro <math>3 \mu\text{m}</math>, <math>1 \mu\text{m}</math>, <math>\frac{1}{4} \mu\text{m}</math>“</li> </ul> </li> </ul>
Ätzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 60 s, bei <math>60 \text{ }^\circ\text{C}</math> mit V2A-Beize</li> </ul>

Die metallografische Untersuchung findet an den Mikroskopen Olympus SZX10 und Olympus BC53M statt. Mit Hilfe der Software „Olympus Stream Motion“ ist es möglich die entstandenen Schiffe in der jeweiligen Vergrößerung digital zu vermessen und als fertige Bilder abzuspeichern.

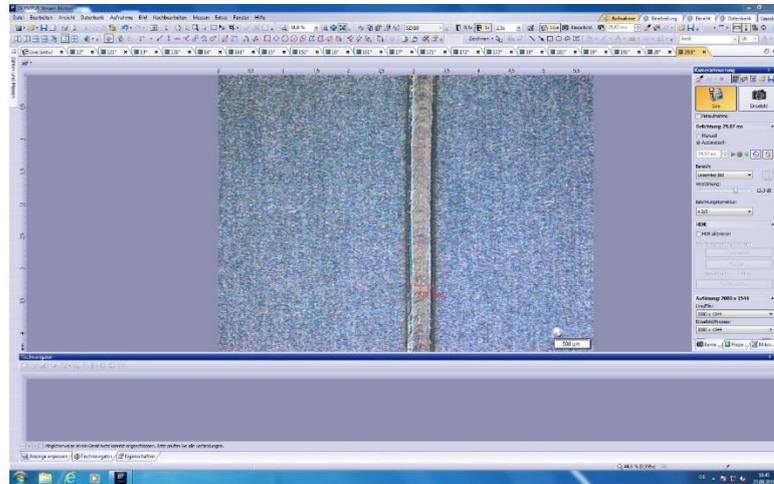


Abbildung 24: Softwareoberfläche von „Olympus Stream Motion“ zur Schweißnahtvermessung

#### 4.4.3 Zugscherversuch

Die Zugversuche werden im Fraunhofer Institut IWU Dresden an der Maschine „retrolit inspect 50 desk“ durchgeführt. Dabei wird mit einem Vorschub von 10 mm/min gearbeitet. Die Ergebnisse liegen in Form einer .txt vor, wobei der Versuch abgebrochen wird, wenn ein Versagen eines der Werkstoffe bzw. der Schweißnaht durch einen Kraftabfall realisiert wird, auch wenn es so nicht zwangsweise zu einem kompletten zerreißen der Zugproben kommt.



Abbildung 25: Zugprüfmaschine „retrolit inspect 50 desk“

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Versuchsreihe A

#### 5.1.1 CW-geschweißte Schweißnähte und Kreisnähte

Im ersten Teil der Versuchsreihe A, galt es die Schweißtechnologie CW-Laserstrahlschweißen zu untersuchen. Das Ziel besteht darin den Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter auf die Ausbildung der Schweißnaht und die resultierende Nahtqualität zu beurteilen.

Alle in dieser Versuchsreihe geschweißten Nähten sind mit den eingestellten Parametern in den Versuchstabellen in den Anlagen AII einzusehen.

Eine Naht wird als Gut beurteilt, wenn sie folgende Kriterien in Anlehnung an DIN EN ISO 13191-1:2018-11 erfüllt:

- Geringer Nahteneinfall / Nahtunterwölbung
- Keine Bindefehler
- Wenig / Keine haftenden Spritzer
- Wenig / Keine Poren / Porennester
- Keine Risse erkennbar
- Sehr kleine / Keine Einbrandkerbe vorhanden
- kein Durchbrennen

Die Streckenenergie stellt in allen durchgeführten Versuchen eine der wichtigsten Kenngrößen dar. Sie beschreibt wie viel Energie (Ws bzw. Joule) pro Millimeter in die Schweißnaht eingetragen wird. Die Streckenenergie lässt sich sowohl für das CW-Schweißen als auch für das Pulsschweißen berechnen und stellt daher das Vergleichskriterium zwischen den unterschiedlichen Schweißtechnologien dar. Dies äußert sich in der Einschweißtiefe, der Nahtbreite und auch der thermischen Belastung des Materials nahe der Schweißnaht. Letzteres ist besonders dahingehend wichtig, da ein Wegschmelzen der Nahtflanken der Inconel-folie als auch eine Schädigung des Sensors vermieden werden soll. Da es sich bei der Streckenenergie um keinen Wert handelt, welcher an der Steuerung des Laserbearbeitungszentrums eingestellt werden kann, wird sie mittels der Formel (3) und (4) für das CW-Schweißen und der Formel (10) für das Pulsschweißen berechnet.

$$\text{Schweißzeit} \quad t_s = \frac{l}{v_s} = \frac{20 \text{ mm}}{60 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 0,33 \text{ s} \quad (3)$$

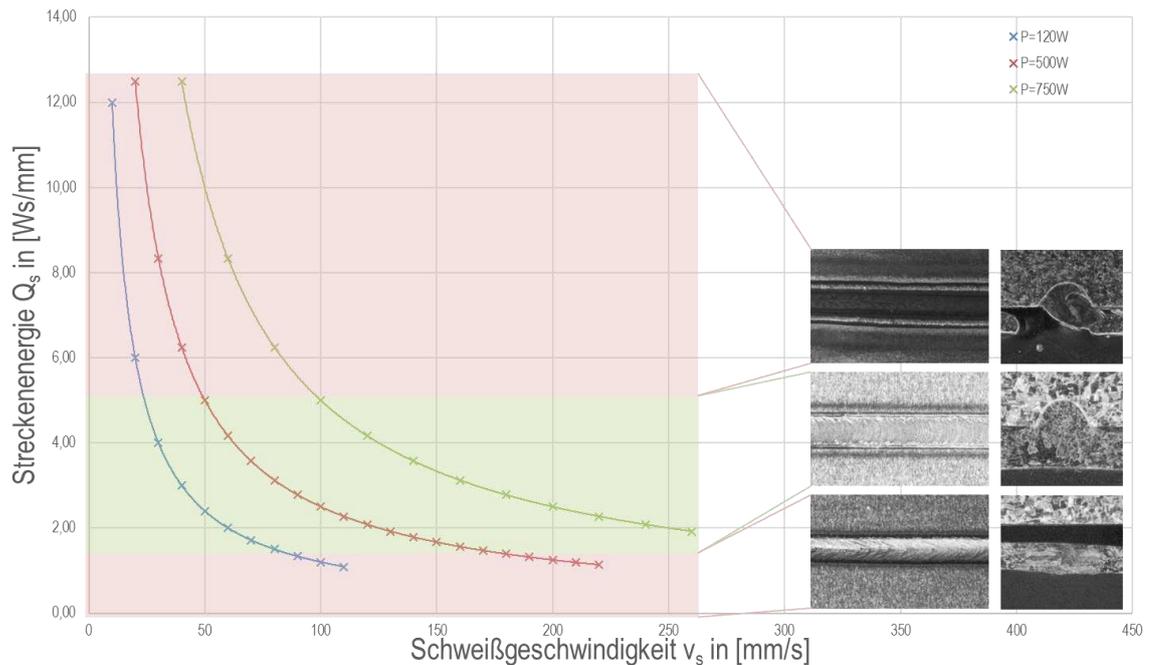
$$\text{Streckenenergie} \quad Q_s = \frac{P \cdot t_s}{l} = \frac{120 \text{ W} \cdot 0,33 \text{ s}}{20 \text{ mm}} = 2,0 \frac{\text{Ws}}{\text{mm}} \quad (4)$$

In der nachfolgenden Tabelle werden die nach der Sichtprüfung als Gut-Nähte bewerteten CW-Laserschweißnähte, welche zugleich die Grundlage für die in der Versuchsreihe B zu schweißenden Proben darstellen, aufgelistet. Alle Nähte wurden mit einer 100 µm Faser, und einem Fokus von 0 mm geschweißt. Dies entspricht bei dem vorliegenden Abbildungsverhältnis von 1:2,3 einem Laserspotdurchmesser von 230 µm. Die Schweißnahtlänge entspricht der Trägerblechlänge des Hochtemperaturdehnmessstreifens von 20 mm.

**Tabelle 6:** Schweißparameter der CW-geschweißten Zugproben – l = 20 mm. Fokus = 0, Faser = 100 µm

Bez.	Leistung P in [W]	Geschwindigkeit v in [mm/s]	Schweißzeit t <sub>s</sub> in [s]	Streckenenergie Q <sub>s</sub> in [Ws/mm]
L1	120	60	0,33	2,00
L2	120	70	0,29	1,71
L3	250	140	0,14	1,79
L4	250	150	0,13	1,67
L5	250	160	0,13	1,56
L6	250	170	0,12	1,47
L7	250	180	0,11	1,39
L8	250	190	0,11	1,32
L9	250	200	0,10	1,25
L10	250	210	0,10	1,19

Aus der Abbildung 26 ergibt sich der mathematische Sachverhalt, dass mit den steigenden Schweißgeschwindigkeiten, reduzierte Schweißzeiten und damit verbunden ein geringerer Energieeintrag einhergehen, grafisch hervor. Der Bereich der Streckenenergie, in welchem die Nähte den Gut-Nähten zugeordnet wurden, ist grün hervorgehoben.

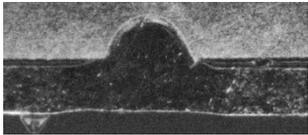
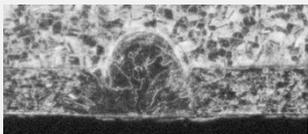
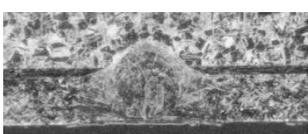
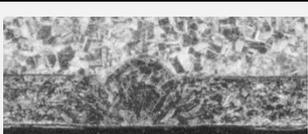


**Abbildung 26:** Darstellung der Streckenergie über verschiedene Schweißgeschwindigkeiten bei den Leistungswerten  $P = 120 \text{ W}$ ,  $250 \text{ W}$  und  $500 \text{ W}$

Jedoch ist es notwendig eine Mindestmenge an Energie in den Fügeprozess einzubringen um den Fügevorgang zu realisieren. Dadurch ist auch die Schweißgeschwindigkeit begrenzt, da eine Verdopplung der Schweißgeschwindigkeit eine Halbierung der Streckenergie  $Q_s$ , aber auch eine Verkleinerung der Nahtabmessungen in Tiefe und Breite und damit verbunden des tragenden Nahtquerschnittes darstellt.

Aus den Proben A, E, F und H der Tabelle 7 geht hervor, dass bereits kleinste Spalte zwischen der Inconelfolie und dem Grundwerkstoff zu einer signifikanten Nahtunterwölbung führen. Dies folgt aus der zusatzwerkstofffreien Fertigung der Schweißnähte, da das durch das Aufschmelzen der Inconelfolie erzeugte Schmelzvolumen zuerst den Spalt überbrücken muss, bevor es sich mit dem Grundwerkstoff zu einer Schmelze vereinigen kann. Liegen die Werkstoffe eben, knitter- und spaltfrei aufeinander, wie es bei den Proben B, C, D und G der Fall ist, bildet sich eine ebene Nahtoberfläche aus.

**Tabelle 7: Darstellung der Schweißnahtgeometrien in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit beim CW-Laserstrahlschweißen – P = 250 W, Fokus 0,100 µm-Faser**

		$v_s$ in [mm/s]	$Q_s$ in [Ws/mm]	Anbindebreite in [µm]	Einschweißtiefe in [µm]
A		100	2,5	182	105
B		110	2,27	154	85
C		130	1,92	171	68
D		140	1,79	148	46
E		150	1,67	154	50
F		160	1,56	137	30
G		170	1,47	125	40
H		180	1,39	102	18
I		190	1,32	-	-

Ebenso zeigt insbesondere der Vergleich der Proben G, H und I der Tabelle 7, dass mit steigender Schweißgeschwindigkeit die Nahtbreite und Einschweißtiefe abnehmen. Dies folgt aus der bei steigenden Schweißgeschwindigkeiten sinkenden Streckenenergie  $Q_s$ , welche bei der Probe H mit 1,39 Ws/mm gerade noch ausreichend gewesen ist um eine minimale

Anbindung zu erzeugen. Bei der Probe I war die Streckenenergie mit 1,32 Ws/mm so gering, dass nur noch die Inconelfolie aufgeschmolzen werden konnte. Da die Probe G mit einer Streckenenergie von 1,47 Ws/mm eine sehr kleine, jedoch um 25 % breitere und doppelt so tiefe Naht aufweist wie H, kann davon ausgegangen werden, dass der untere Wert zur Erzeugung einer Qualitätsgerechten CW-Schweißnaht bei etwa 1,5 Ws/mm liegt.

Die Verkleinerung der Schweißnahtabmessungen bei höheren Schweißgeschwindigkeiten begründet sich darin, dass eine verkürzte Verweildauer des Lasers an einem Punkt dem Edelstahlgrundwerkstoff wesentlich weniger Energie zuführen und damit weniger Material aufschmelzen kann. Das Erzeugen der Schmelze erfolgt von der Position des Lasersspots sowohl in radialer als auch in axialer Richtung. Entfernt sich der Laser nun schneller von seiner Position, steht weniger Energie und Zeit zur Verfügung um die Naht weiter in die Breite oder in die Tiefe zu vergrößern.

Zu große Schweißgeschwindigkeiten, und Energieeinträge als auch Welligkeiten beeinflussen das Schweißergebnis in unterschiedlicher Weise. Die Auswirkungen einzelner Faktoren werden in Tabelle 8 dargestellt.

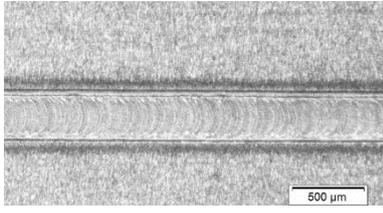
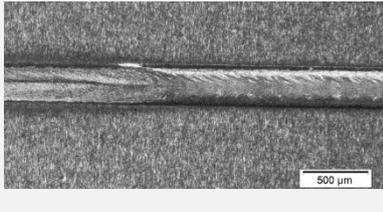
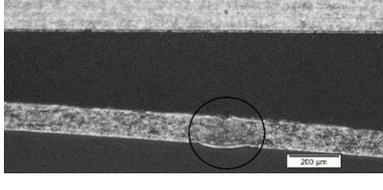
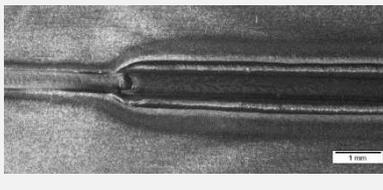
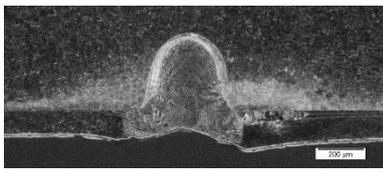
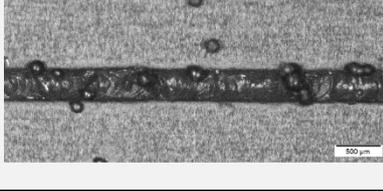
Ist der Energieeintrag zu gering, führt dies, wie bei der Probe C der Tabelle 8, entweder zu keiner, oder nur zu einer teilweisen Anbindung der Inconelfolie an den Edelstahlgrundwerkstoff. Ein zu hoher Energieeintrag durch zu viel Leistung und / oder einer zu geringen Schweißgeschwindigkeit kann wiederum zum Durchbrennen der Inconelfolie oder zu einer verstärkten Spritzerbildung führen (Tabelle 8D+F). Neben den Parametern des Lasers ist auf ein sauberes Anliegen der dünnen Inconelfolie zu achten. Bereits kleine Spalte können zu einer mangelnden Anbindung der Schweißnaht oder zu einer starken Nahtunterwölbung führen (Tabelle 8F).

Zusätzlich zu den Liniennähten wurde als alternative Anbindung eine Kreisnahtgeometrie untersucht. Für diese Schweißversuche mit den Kreiskonturen wurden 10 Kreise à 0,6mm Durchmesser geschweißt, da diese von ihrem Gesamtumfang in etwa den 20 mm Schweißnaht entsprechen und somit besser mit den linearen CW- und gepulsten Schweißnähten der Zugversuche in Bezug auf Schweißnahtlänge und tragendem Querschnitt vergleichbar sind.

$$10 \cdot \pi \cdot 0,6 \text{ mm} = 18,9 \text{ mm} \quad (5)$$

Sowohl die Schweißnahtbreiten als auch die -tiefen werden, aufgrund der identischen Schweißparameter, gleich derer der lineargeschweißten CW-Nähte gesetzt.

**Tabelle 8: Darstellung der unterschiedlichen Schweißergebnisse des Versuchsteils A**

	Merkmal	Beispielbild	Streckenenergie/ Sonstiges
A	Sauber ausgeführte Schweißnaht		Optimaler Bereich
B	Teilweise keine Anbindung		
C	Komplett fehlende Anbindung		Zu Niedrig
D	Abgeschmolzene Inconelfolie		Zu Hoch
E	Großer Nahteinfall		Verschmutzung auf dem Grundwerkstoff
F	Viele Spritzer		Zu Hoch

### 5.1.2 gepulste Schweißnähte

Neben dem CW-Schweißen wurde auch die Technologie des gepulsten Laserschweißens untersucht. Die ersten Proben wurden mit einer Pulsdauer von  $t_p = 1$  ms geschweißt (Siehe Anlagen Teil 2), wobei die Laserquelle mit dieser Einstellung maximal eine Frequenz von 600 Hz ermöglicht. Daher wird ab der Probennummer 46 die Pulsdauer auf einem Wert von  $t_p = 0,3$  ms reduziert um die maximal mögliche Frequenz der Anlage von 1 KHz auszureizen

zu können. Ebenso sichert diese Maßnahme die Möglichkeit des Schweißens einer durchgehenden Naht mit der Überlappung der einzelnen Schweißpunkte in Höhe eines halben Spotdurchmessers.

**Tabelle 9:** Schweißparameter der pulsgeschweißten Zugproben –  $l = 20 \text{ mm}$ . Fokus = 0, Faser =  $100 \mu\text{m}$ , Pulsdauer  $t_p = 0,3 \text{ ms}$ ,  $P = 500 \text{ W}$ ,  $Q_s = 1,76 \text{ Ws/mm}$

Bez.	Pulsdaten		Geschwindigkeit $v$ [mm/s]	Pulsenergie $Q_p$ in Ws
	f in [Hz]	Schweißzeit $t_s$ in [s]		
P1	235,29	1,00	20	35,29
P2	352,94	0,67	30	35,29
P3	470,59	0,50	40	35,29
P4	588,24	0,40	50	35,29
P5	705,88	0,33	60	35,29
P6	823,53	0,29	70	35,29
P7	941,18	0,25	80	35,29

Für die Versuche mit einem gepulsten Laser wurden die Werte zur Eingabe in die Steuerung unter der Annahme, dass der Durchmesser eines Schweißpunktes =  $170 \mu\text{m}$  beträgt mittels der Formeln (6) bis (10) berechnet. Aufgrund der gleichbleibenden Pulsanzahl bei steigenden Schweißgeschwindigkeiten wird die Pulsfrequenz stetig erhöht, wobei zu beachten ist, dass die maximale mögliche Frequenz der Anlage bei einer Pulsdauer von  $0,3\text{ms}$   $1000\text{Hz}$  beträgt.

$$\text{Schweißpunktanzahl} \quad n = \frac{l}{d_p} \cdot 2 = \frac{20 \text{ mm}}{0,17 \text{ mm}} \cdot 2 = 235 \quad (6)$$

$$\text{Frequenz} \quad f = \frac{n}{t_s} = \frac{235}{1} = 235 \text{ Hz} \quad (7)$$

$$\text{Pulsenergie} \quad P_p = P \cdot t_p = 500 \text{ W} \cdot 0,3 \text{ ms} = 0,15 \text{ Ws} \quad (8)$$

$$\text{Durchschnittliche Leistung} \quad \bar{P} = P_p \cdot f = 0,15 \text{ Ws} \cdot 235 \text{ Hz} = 35 \text{ W} \quad (9)$$

$$\text{Streckenenergie} \quad Q_s = \frac{\bar{P} \cdot t_s}{l} = \frac{35 \text{ W} \cdot 1 \text{ s}}{20 \text{ mm}} = 1,76 \frac{\text{Ws}}{\text{mm}} \quad (10)$$

Aufgrund der Tatsache, dass die Frequenz des gepulsten Lasers so variiert worden ist, dass bei jeder Schweißgeschwindigkeit, gleich viele Pulse auf gleicher Strecke freigegeben werden ist die Streckenenergie bei identischer Pulsdauer, Schweißnahtlänge und Leistung konstant.

Da ein gepulster Laser nicht permanent Energie in das Material einbringt ist die eingebrachte Streckenenergie bei gleichen Leistungsparametern und gleichen Schweißgeschwindigkeiten

wie bei einer CW-Lasergeschweißten Naht, deutlich niedriger, wobei dahingehend ein großer Einfluss der Pulsdauer  $t_p$  besteht. Wird die Pulsdauer auf 30 % reduziert sinkt damit auch die Streckenenergie auf 30 %.

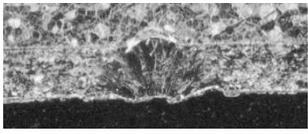
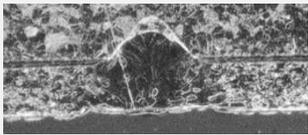
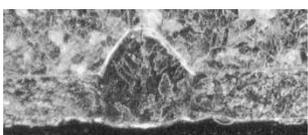
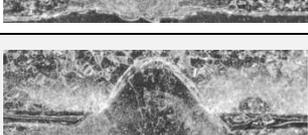
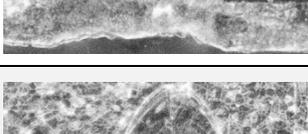
**Tabelle 10: Vergleich der Streckenenergien von CW- geschweißten Nähten und gepulsten Nähten**

Cw-geschweißte Naht: $P = 500 \text{ W}$ , $v_s = 40 \text{ mm/s}$	$E = 12,5 \text{ Ws/mm}$
Gepulste Naht: $P = 500 \text{ W}$ , $t_p = 1 \text{ ms}$ , $v_s = 40 \text{ mm/s}$	$E = 5,88 \text{ Ws/mm}$
Gepulste Naht: $P = 500 \text{ W}$ , $t_p = 0,3 \text{ ms}$ , $v_s = 40 \text{ mm/s}$	$E = 1,76 \text{ Ws/mm}$

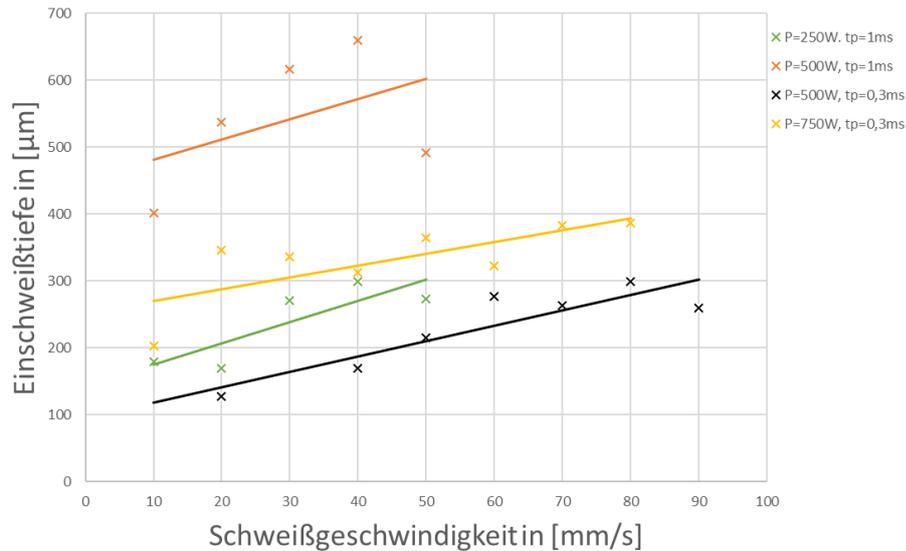
Die Schweißversuche der gepulsten Nähte ergaben, dass bei steigenden Schweißgeschwindigkeiten sowohl die Nahtbreite als auch die Einschweißtiefe tendenziell steigen. Während beim CW-Schweißen die Nähte mit steigender Schweißgeschwindigkeit, bei gleichbleibender Leistung, immer schmaler und weniger tief werden, tritt dieser Effekt bei den gepulsten Nähten umgekehrt auf. Dies begründet sich zum einen in den verkürzten Pulspausen, welche wie bereits beschrieben, aufgrund einer kontinuierlichen Erhöhung der Frequenz kürzer werden, und zum anderen in dem besseren Einkoppelverhalten des Lasers in jene Schweißpunkte welcher weniger lang auskühlten.

Wie ein Vergleich der Proben A-D in Tabelle 11 zeigt, nehmen sowohl die Nahtbreite als auch die Einschweißtiefe signifikant mit steigenden Frequenzen des gepulsten Lasers zu. Die Frequenz wurde von der Probe A zur Probe D vervierfacht, wodurch die Schweißnahtbreite um Faktor 3, und die Einschweißtiefe um den Faktor 4 vergrößert wurde. Zwischen den einzelnen Pulsen des Lasers, während derer je ein Punkt aufgeschmolzen wird, liegen Pausen in welchen die geschweißten Punkte auskühlen. Je Länger die Pausen zwischen den Pulsen ist, desto länger ist die Auskühl- und Erstarrzeit für die vorher geschweißten Linsen. Werden diese Pulspausen jedoch durch eine gleichmäßige Erhöhung der Frequenz und der Schweißgeschwindigkeit verkürzt, folgt daraus, dass die Schweißpunkte jeweils auf dem etwas weniger ausgekühlten vorherigen Schweißpunkt aufgebracht werden.

**Tabelle 11:** Darstellung der Schweißnahtgeometrien in Abhängigkeit der Schweißgeschwindigkeit und der Frequenz beim Puls-Schweißen –  $P = 500 \text{ W}$ , Fokus 0,  $t_p = 0,3 \text{ ms}$ ,  $Q_s = 1,76 \text{ Ws/mm}$ ,  $100 \mu\text{m}$ -Faser

		$v_s$ in [mm/s]	$f$ in [Hz]	Anbindebreite in [ $\mu\text{m}$ ]	Einschweiß- tiefe in [ $\mu\text{m}$ ]
A		10	117	57	25
B		20	235	85	69
C		30	352	87	89
D		40	470	154	107
E		50	588	160	161
F		60	705	200	128
G		70	823	211	170
H		80	941	200	173

Werden die gemessenen Nahttiefen aller gepulst geschweißten Nähte in ein Diagramm, wie in Abbildung 27 zu sehen, eingetragen ist ebenso erkennbar, dass bei höheren Pulsdauern die Zunahme der Einschweißtiefe stärker erfolgt als bei geringeren Pulsdauern, was auf die längere Einwirkzeit des Lasers auf das Material zurückzuführen ist.



**Abbildung 27:** Darstellung der gemessenen Nahttiefen an den gepulsten Schweißnähten

Für den Versuchsteil A kann zusammengefasst werden:

- CW-Geschweißte Nähte weisen bei vergleichbaren Schweißparametern wie gepulste Nähte eine höhere Streckenenergie auf
- Aus steigenden Schweißgeschwindigkeiten resultieren bei CW-Lasergeschweißten Nähten kleinere Schweißnahtgeometrien bei einer sinkenden Streckenenergie
- Bei gepulsten Nähten tritt dieser Effekt umgekehrt auf, und die Schweißnahtgeometrien vergrößern sich mit steigenden Frequenzen bei erhöhten Schweißgeschwindigkeiten bei gleichbleibender Streckenenergie

## 5.2 Versuchsreihe B

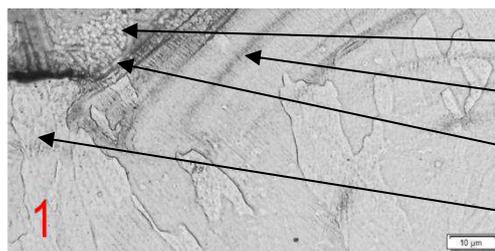
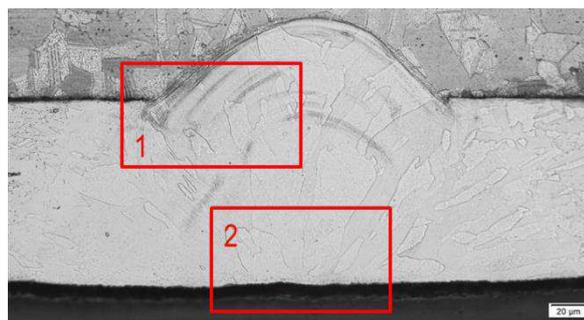
In dieser Versuchsreihe werden Zugscherproben mittels der in der Versuchsreihe A ermittelten Parametern hergestellt und geprüft. Das Schweißen unter Zuhilfenahme der in 4.3.2 beschriebenen Schweißmaske führt zu einem generell besseren knitterfreieren Anliegen der Inconelfolie auf dem Grundwerkstoff und somit zu weniger Schweißnahtunregelmäßigkeiten in Form von z.B. einer starken Nahtunterwölbung.

### 5.2.1 Metallurgische Eigenschaften

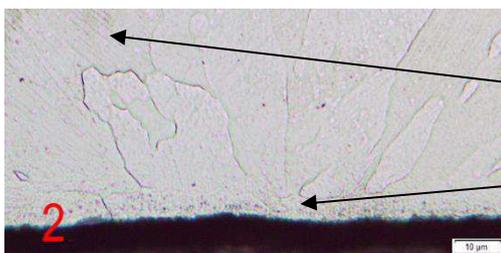
Die Nähte, welche in der Versuchsreihe B an der Zugprüfmaschine geprüft worden, werden an den Mikroskopen Olympus SZX10 und Olympus BC53M nach dem wie im Punkt 4.4.2. beschriebenen Einbetten und Ätzen metallografisch untersucht.

Da innerhalb der verschiedenen Schweißmodi keine Unterschiede innerhalb der Gefüge festgestellt werden konnten, wird im Folgenden je eine CW-geschweißte Naht (Abbildung 28) und eine gepulst geschweißte Naht (Abbildung 29) betrachtet

In der Abbildung 28 ist die CW-Lasergeschweißte Naht 24 (K3 bzw. L3) in einer 500-fachen Vergrößerung dargestellt. Das Ätzen erfolgte auf Empfehlung der Firma STRUERS mit einer V2A Beize und einer Einwirkzeit von 30 Sekunden. Leider war es in den durchgeführten Versuchen nicht möglich das Gefüge des Inconel so anzuätzen, dass ein vollständig sichtbares Gefüge zu sehen ist. Auch durch die Erhöhung der Einwirkdauer auf 60 Sekunden sowie durch Vorwärmen der Ätzlösung auf 60 °C wurde das Inconel nur mäßig angegriffen und das Gefüge nur an vereinzelten Stellen sichtbar. Deutlich erkennbar ist, dass alle geätzten Proben einen grauen bis schwarzen Schatten in der Übergangszone von der Nickellegierung zum Grundwerkstoff aufweisen (siehe Abbildung 28\_1)



- Austenitischer Grundwerkstoff
- Dendritisches Gefüge
- Schatten in der Übergangszone
- Nickelgrundwerkstoff



- Dendritisches Gefüge
- Erstarrte Nahtoberfläche

Abbildung 28: Schweißnahtaufnahme einer CW-Geschweißten Naht

Es kann aufgrund der Unschärfe des Schattens, und der Festigkeit der Schweißnaht davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei nicht um einen Riss handelt, sondern um einen Angriff der Säure auf die Übergangszone auf Grund der Übermäßigen Einwirkdauer des Ätzmittels.

Neben dem Schatten ist auch vereinzelt das für lasergeschweißte typische dendritische Gefüge der Schweißnaht sehr gut zu erkennen, welche durch die schnelle und gerichtete Erstarung der Schmelze vom Bauteilrand zur Schweißnahtmitte entsteht (siehe Abbildung 28\_2).

Das Gefüge der gepulst geschweißten Nähte unterscheidet sich nur marginal von den der CW-Geschweißten Proben. Bei diesen Nähten existieren die vom Ätzen verursachten Schatten an der Übergangszone ebenso wie die dendritischen Gefüge. Ein weiteres Merkmal der gepulsten Nähte ist, dass in der Regel mehr als ein Schweißpunkt betrachtet wird (siehe Abbildung 29\_1). Aufgrund der Überlappung der Schweißpunkte werden beim Zuschneiden der Proben mehrere Schweißpunkte geschnitten. Bei einer der gepulsten Nähte (Probennummer 58 – P3) ist ein durch die schnelle Abkühlung hervorgerufenenes sehr feines Gefüge innerhalb der Schweißnaht, mittels des Ätzens mit der V2A-Beize erkennbar (siehe Abbildung 29\_2).

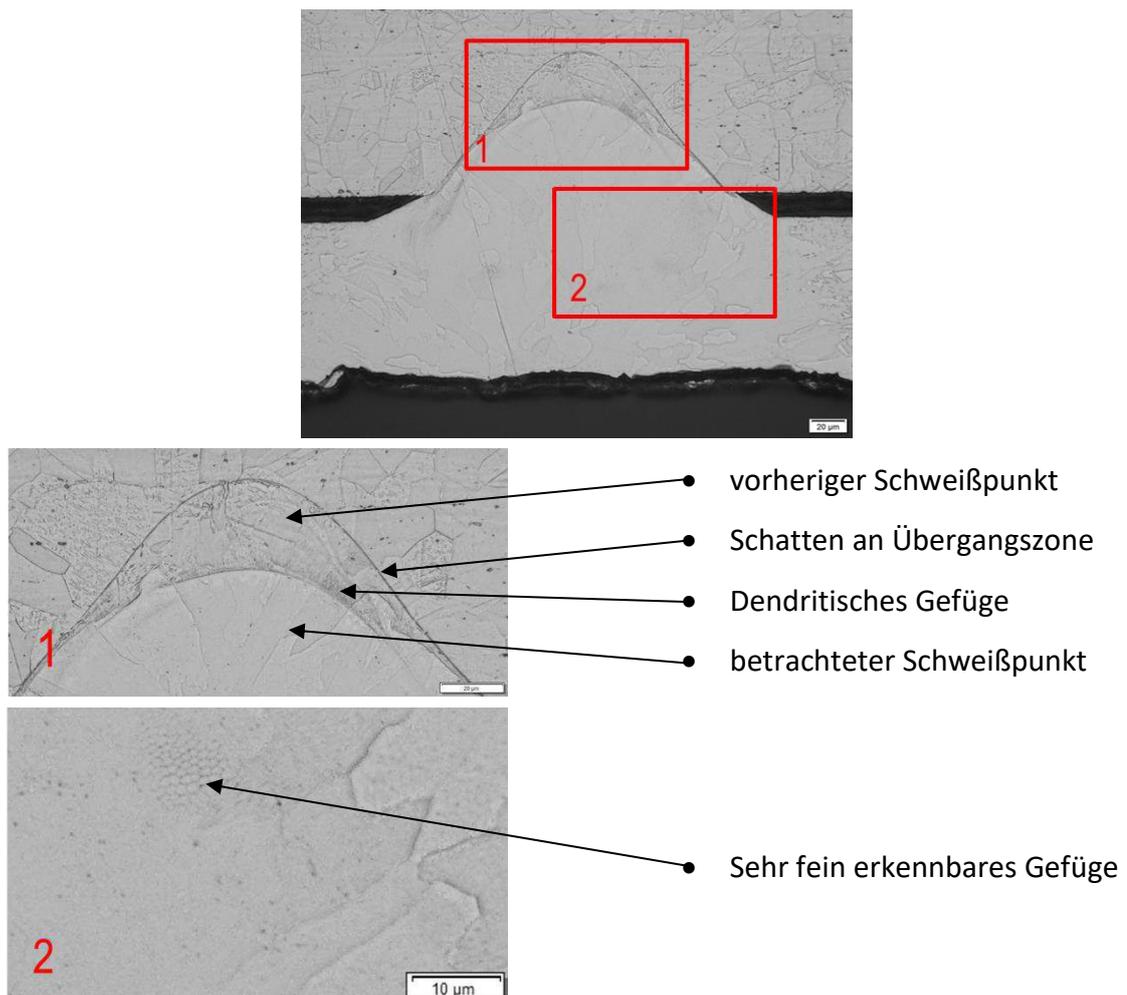


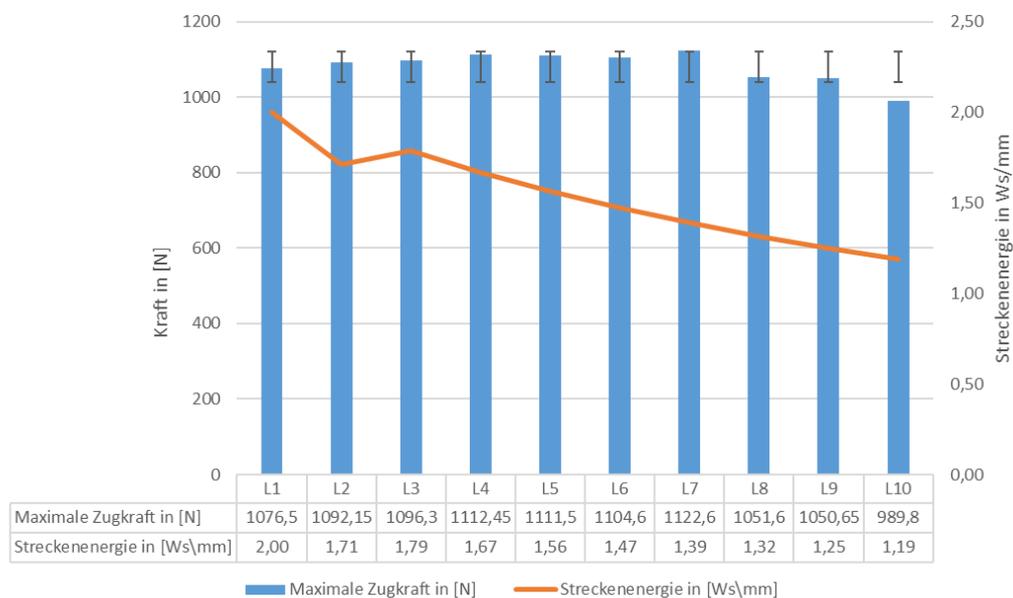
Abbildung 29: Schweißnahtnaufnahme einer Puls-Geschweißten Naht

Da es jedoch im zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht möglich gewesen ist eine genauere Untersuchung des vorliegenden Gefüges mittels eines Rasterelektronenmikroskop durchzuführen, kann nicht genau gesagt werden um welche Phase es sich explizit handelt.

## 5.2.2 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften

### CW-geschweißte Proben

Bei den CW-geschweißten Proben (L-Proben) sind von den Parametersätzen L1-L9 im Durchschnitt ähnliche Zugkräfte erreicht worden, bevor es zum Material- bzw. Schweißnahtversagen gekommen ist (Siehe Abbildung 30).



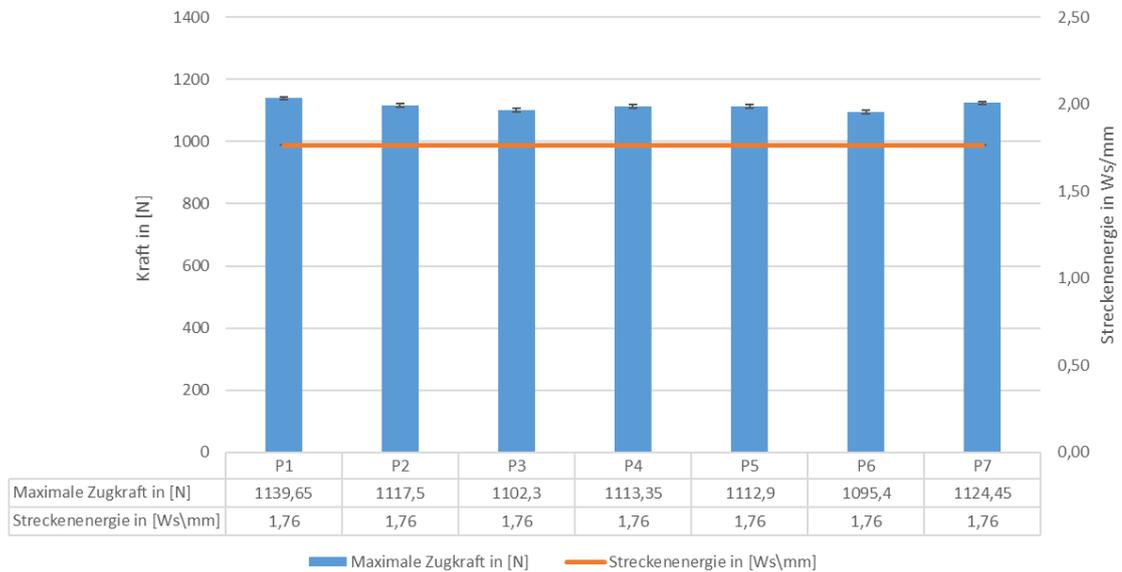
**Abbildung 30: Durchschnittlich erreichte maximale Zugkräfte der CW-Geschweißten Nähte**

Die Sätze L1-L5 sind durchgehend mit je allen 5 Schweißnähten des Satzes im Nickelgrundwerkstoff auf Höhe des Nahtendes gerissen. Bei der Reihe L6 ist es vermehrt und bei den Reihen ab L7 ausschließlich zum Versagen der Schweißnaht in Form eines Abschälens vom Grundwerkstoff gekommen (siehe auch Anlagen AIII). Diese Versagensart lässt sich auf einen zu geringen tragenden Nahtquerschnitt aufgrund mangelnder Streckenenergie zurückführen.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass zum Herstellen einer CW-geschweißten Naht mit der Leistung von  $P = 250 \text{ W}$  die Streckenenergie nicht unter  $1,56 \text{ Ws/mm}$  liegen sollte. Dies entspricht einer Schweißgeschwindigkeit von maximal  $170 \text{ mm/s}$ . Unterhalb dieser Streckenenergie kommt es nicht mehr zu einer Ausbildung eines ausreichend großen Nahtquerschnittes, wodurch keine ausreichende Festigkeit der Schweißverbindung mehr gewährleistet werden kann.

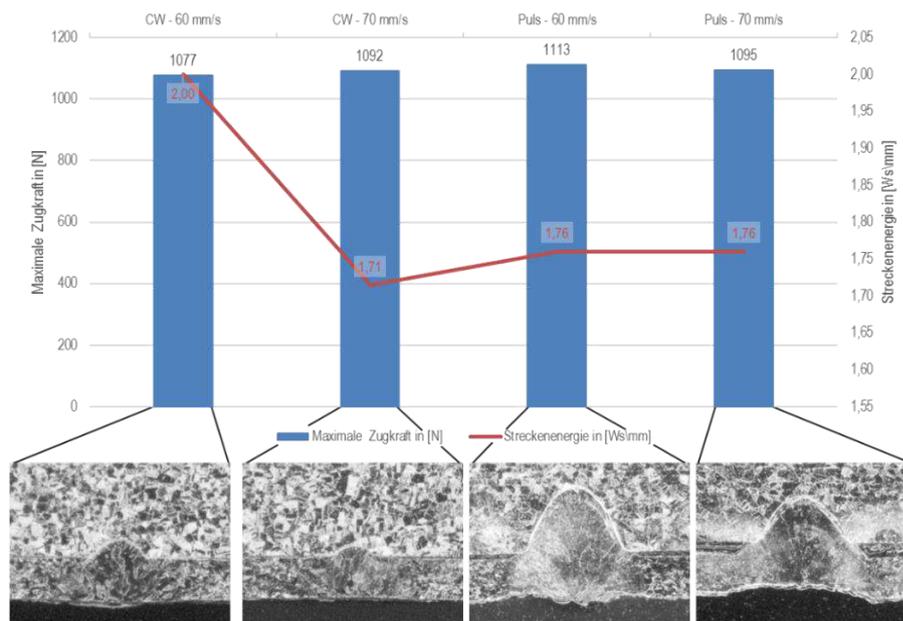
Pulsgeschweißte Proben

Bei den pulsgeschweißten Verbindungen sind alle Proben an der Inconelfolie am Ende der Schweißnaht horizontal eingerissen. Wie bereits im Punkt 5.1.2 beschrieben bleibt die Streckenergie beim Pulsschweißen über verschiedene Schweißgeschwindigkeiten, bei angepasster Frequenz, identisch.



**Abbildung 31: Durchschnittlich erreichte maximale Zugkräfte der Puls-Geschweißten Nähte**

Da die Schweißnähte mit angepassten Frequenzen breiter werden erhöht sich der tragende Querschnitt der Nähte simultan. Die Geschweißten Zugscherproben haben über alle Parametersätze hinweg eine ähnliche durchschnittliche maximale Zugkraft widerfahren bevor sie im Inconel gerissen sind (siehe Abbildung 31 + Anlagen AIII).

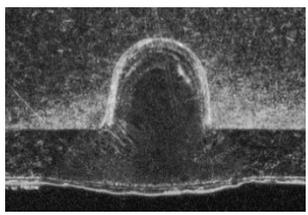
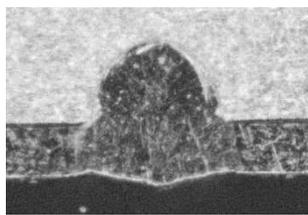
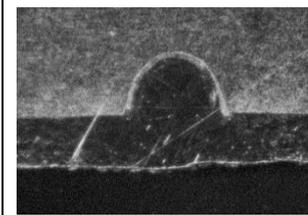


**Abbildung 32: Vergleich der maximal erreichten Zugkräfte, Streckenergien und Nahtprofile von CW-Nähten (L1 + L2) mit gepulsten Nähten (P5 + P6)**

Während eine mit 1,71 Ws/mm und 70 mm/s geschweißte Naht im CW-Mode sehr filigrane Geometrie aufweist und eine entsprechend geringe Einschweißtiefe hat, ist es möglich mit dem Puls-Mode des Lasers wesentlich größere Schweißnahtabmessungen bei nahezu identischer Schweißenergie zu realisieren (siehe Abbildung 32).

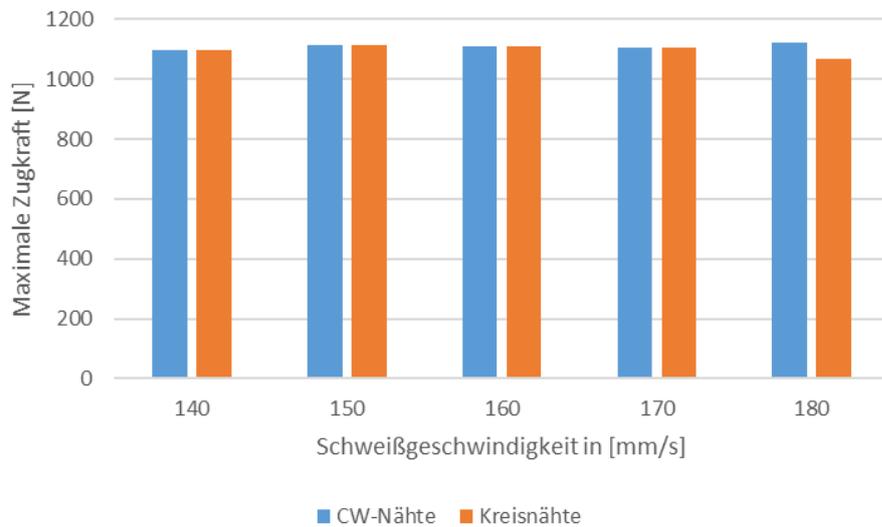
Im nächsten Schritt werden nun Nahtgeometrien von Parametern betrachtet, bei welchen jedoch neben der Schweißgeschwindigkeit auch die eingestellte Leistung identisch ist.

**Tabelle 12:** Vergleich Nahtgeometrien von CW- und Puls -Geschweißten Nähten – P = 250 W,  $v_s = 50$  mm/s

	Probe 15 - CW	Probe 49 - Puls	Probe 18 – CW
Probe			
$Q_s$ in [Ws/mm]	5,0	2,94	3,13
Tiefe in [ $\mu$ m]	188	175	105
Breite in [ $\mu$ m]	217	234	200

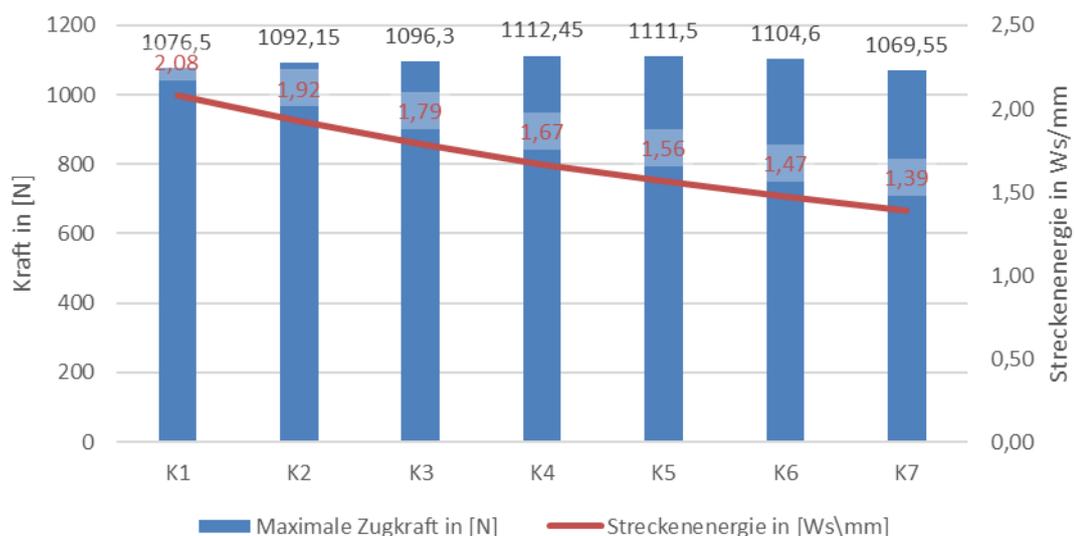
Wie aus Tabelle 12 ersichtlich, ist es mit dem Pulsschweißen bei gleicher Leistung und gleicher Schweißgeschwindigkeit möglich mit einer wesentlich geringeren Schweißenergie eine ähnlich tiefe Schweißnaht zu erzeugen (Probe 15 und 49). Ist es notwendig beim CW-Laserstrahlschweißen die Streckenenergie auf ein ähnliches Maß, bei gleicher Leistung, durch Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit, zu reduzieren wie es beim Pulsschweißen der Fall ist, werden wesentlich schmalere Nähte mit geringeren Nahttiefen erzeugt (Siehe Tabelle 12 Probe 49 und 18).

Bei den gezogenen Proben der CW-Geschweißten Kreisnähte kann festgehalten werden, dass diese in jeglicher Hinsicht den Ergebnissen der CW-Lineargeschweißten Nähten entsprechen (Siehe Abbildung 33).



**Abbildung 33: Vergleich der maximal erreichten Zugkräfte in N von CW-Linear geschweißten und kreisgeschweißten Nähten.**

Die bereits nach Formel 4 berechneten Streckenenergien stimmen aufgrund der fast identischen Schweißnahtlänge von  $l_{CW} = 20 \text{ mm}$  zu  $l_{Kreis} = 18,8 \text{ mm}$  nahezu überein (siehe Abbildung 34) und auch die Ergebnisse der Scherzugversuche ähneln sich von den durchschnittlichen Werten denen der CW-Linearproben. Der Hauptunterschied zwischen den CW-Lineargeschweißten und den CW-Kreisgeschweißten Nähten besteht darin, dass bei ähnlichen Parametern (z.B. L6 = K6) bei den lineargeschweißten Proben ab Probennummer 6 ein Versagen der Schweißnaht auftrat, die Kreisgeschweißten Nähte jedoch durchweg im Grundwerkstoff rissen.



**Abbildung 34: Durchschnittlich erreichte maximale Zugkräfte der CW-geschweißten Kreisnähte**

### Betrachtung der auftretenden Spannungen

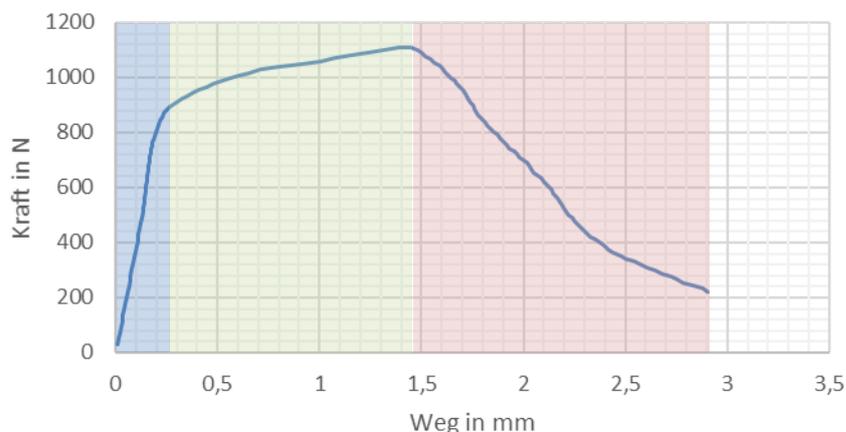
Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich einzig auf die wirkenden Kräfte, jedoch nicht auf die Spannungen. Diese Herangehensweise ist jedoch erforderlich, um die Wirkung der Kräfte auf die Schweißnähte besser miteinander vergleichen zu können.

Der Hochtemperaturdehnmessstreifen KHCX der Firma Kyowa, welcher letztendlich in die additiv gefertigten Bauteile appliziert werden soll, ist im Falle einer wechselnden Belastung mit einer Frequenz von 6 Hz, bis zu einer maximalen Dehnung von  $\pm 100 \mu\text{m}/\text{m}$  dauerhaft. Dies entspricht einer Längenänderung von 0,02%. Dieser Wert stellt zu gleich die maximale Dehnung des Trägerblechs dar, auf welchem der Dehnmessstreifen aufgebracht ist.

Die Zugspannung innerhalb eines Bauteiles aus Stahl welches eine Dehnung von 0,02 % erfährt wird mit der Formel (1) auf  $42 \text{ N}/\text{mm}^2$  berechnet. Dieser Wert entspricht aufgrund des ähnlichen E-Moduls (214 GPa bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 209 GPa bei  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in etwa der Spannung innerhalb eines Nickelbleches welches diese Dehnung erfährt.

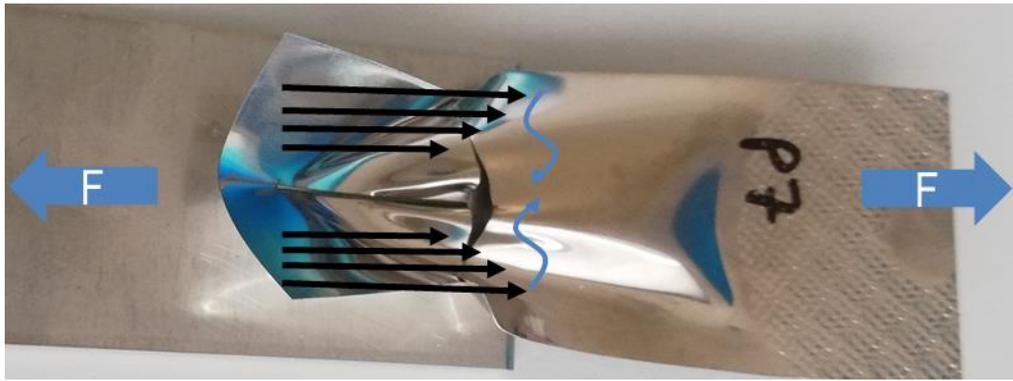
$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 210.000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,0002 = 42 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (11)$$

Anhand des exemplarischen Kraft-Weg Diagramms einer Probe der Reihe L1 in der Abbildung 35 wird das Verhalten der Proben beim auseinanderziehen erklärt.



**Abbildung 35: Kraft Weg Diagramm einer Probe der Reihe L1**

Der erste Bereich des Diagramms stellt den elastischen Dehnungsbereich dar, in welchem eine reversible Dehnung der Probe stattfindet. Im zweiten Bereich fanden 2 Vorgänge gleichzeitig an den Proben statt. Aufgrund der Lage der Schweißnaht in Richtung der Zugrichtung, und der Breite der Probe wurde zuerst das Material seitlich der Schweißnaht plastisch verformt, was sowohl am oberen Ende der Schweißnaht zur starken Bildung von Wellen geführt hat. Die zweite Beobachtung ist, dass am unteren Ende der Schweißnaht diese, durch die starke plastische Verformung der Ränder der Inconelfolie, sich allmählich abhebt. Dies mündet in dem Abschälen des Bleches an der Schweißnaht, wobei die Naht selber fest mit dem Blech verbunden bleibt.



**Abbildung 36: Gerissene Zugscherprobe aus der Reihe P7**

Da Anhand der Diagramme nicht exakt gesagt werden kann, wann genau das Abschälen der Inconelfolie beginnt wird angenommen, dass dies passiert sobald der Bereich der elastischen Dehnung verlassen wird und der Zugscherversuch sich im 2. Abschnitt des Diagramms aus Abbildung 35 befindet. Um genauere Aussagen zu diesem Verformungsverhalten machen zu können, könnten zukünftige Scherzugversuche zeitlich getriggert bzw. mit Videoaufnahmen verbunden werden. Nach dem Begutachten einiger Kraft-Weg Diagramme der verschiedenen Messreihen in den Versuchsreihen wurde festgelegt, dass dieser Bereich bei den geschweißten Zugscherproben zumeist bei etwa 820 N Zugkraft beginnt, wobei dies bei weiteren Untersuchungen genauer bestimmt werden muss. Diese Kraft bezogen auf die Anbindeflächen der unterschiedlichen Nähte, resultiert aus einer nach der Formel  $\tau = \frac{F}{A}$  berechneten Scherspannung, welche in einem Bereich zwischen 250 und 450 N/mm<sup>2</sup> liegt. Alle errechneten Werte befinden sich in den Anlagen AIII.

Am Ende des zweiten Bereichs des Diagramms in Abbildung 35 erfolgt das Versagen der Probe in horizontaler Richtung am Ende der Schweißnaht. Die Zugspannungen  $\sigma$  liegen zwischen 262 und 280 N/mm<sup>2</sup>. Aufgrund des starken Wellens der Folie im zweiten Bereich des Scherzugversuches, und des daraus resultierenden mehrachsigen Spannungszustandes im Bereich des Risses, werden die theoretischen Werte der Zugfestigkeit von bis zu 700 N/mm<sup>2</sup> nicht erreicht (Siehe Datenblatt Inconel 600 in den Anlagen Teil 3). Ebenso ist eine Minderung der Festigkeit in diesem Bereich durch die thermische Beeinflussung während des Schweißens, bzw. eine Minderung des tragenden Querschnitts durch starken Nahteinfall nicht ausgeschlossen.

## 6 Zusammenfassung und Fazit

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung additiv gefertigter Komponenten in der Industrie, sowie durch anhaltend sinkende Kosten zur Herstellung endkonturnaher Bauteile, wird stetig die Substituierbarkeit konventioneller Fertigungstechnologien durch additiver Fertigungsverfahren geprüft.

Ziel dieser Bachelorarbeit war es, die Machbarkeit einer Schweißverbindung mittels Laserstrahlschweißen zwischen der Nickellegierung Inconel 600 und dem Grundwerkstoff 1.4571 nachzuweisen.

Im ersten Teil der praktischen Versuche, in Versuchsreihe A, wurde eine grundlegende Machbarkeitsstudie zum Fügen von Inconelfolie mit dem Edelstahlwerkstoff 1.4571 durchgeführt. Dazu wurde der 0,1 mm dicke Nickelgrundwerkstoff mittels einer pneumatischen Spannvorrichtung eben auf den verwendeten Edelstahl fixiert und mit unterschiedlichen Schweißstrategien geschweißt. Diese umfassten das gepulste und das CW-Laserstrahlschweißen, wobei das CW-Schweißen als geradlinige und als kreisförmig geschweißte Naht ausgeführt wird. Ziel dieser Vorgehensweise war es, mit einem möglichst geringen Energieeintrag eine qualitätsgerechte Schweißnaht zu realisieren. Dabei wurden bei den gepulst geschweißten Nähten bei einer vergleichsweise niedrigen Streckenenergie von 1,76 Ws/mm die größten Anbindeflächen realisiert. Ebenso konnte die minimal notwendige Streckenenergie zur Erzeugung einer qualitätsgerechten Schweißnaht auf 1,56 Ws/mm festgelegt werden.

In der Versuchsreihe B sind ausgewählte Parametersätze aus der Versuchsreihe A verwendet worden um je fünf Zugscherproben in Anlehnung an DIN 14273 herzustellen und somit die mechanischen Eigenschaften der Verbindungen zu ermitteln. Dabei zeigt sich, dass es von essentieller Bedeutung ist, dass die Folien vollkommen eben und frei von knittern auf dem Edelstahlwerkstoff 1.4571 aufgelegt werden. Dies erfolgte durch die Zuhilfenahme einer Schweißmaske. Im Anschluss an das Schweißen wurden die Nähte einer Sichtprüfung und einer metallografischen Untersuchung unterzogen. Die in dieser Versuchsreihe geprüften Nähte erbrachten während der Scherzugprüfung ähnliche maximale Zugkräfte, wobei bei den Linear geschweißten CW-Proben mit einer Streckenenergie unter 1,56 Ws/mm ein Versagen der Schweißnaht auftrat.

Die kreisgeschweißten Nähte wiesen keine signifikanten Unterschiede zu den CW-geschweißten Nähten auf. Bei den anderen Proben ist der Zeitpunkt des Versagens der Schweißnaht nicht genau definierbar, und wurde deshalb auf den Moment des Beginns der starken plastischen Verformung des Nickelgrundwerkstoffes festgelegt. Dieser trat bei einer Zugkraft 820 N bzw. einer Zugspannung von 250 bis 450 N/mm<sup>2</sup> ein. Dies muss jedoch in weiteren Untersuchungen genauer bestimmt werden. Die maximale Spannung, welche das

Trägerblech des Hochtemperaturdehnmessstreifens im Bereich der Dauerfestigkeit wiederfahren kann, wurde mit  $42 \text{ N/mm}^2$  ermittelt. Das heißt, dass die gefertigten Schweißnähte im Bereich der Dauerfestigkeit des Dehnmessstreifens die notwendige Festigkeit erbringen.

Abschließend kann gesagt werden, dass als zu bevorzugende Schweißstrategie, das gepulste Laserstrahlschweißen genutzt werden sollte. Dies begründet sich darin, dass bei verringerter Streckenenergie, unter erhöhten Schweißgeschwindigkeiten, sowie angepassten Pulsfrequenzen, signifikant größere Anbindeflächen realisiert werden können. Dies führt bei ähnlichen Belastungen zu geringeren maximalen Scherspannungen in den geschweißten Nähten. Weiterhin führt diese Technologie dazu, dass die Komponenten bei der Fixierung eine deutlich geringere thermische Belastung erfahren.

**Literatur**

- [1] R. Berger und VDMA: "*Prognose Prognose zur Kostenentwicklung in der additiven Metallfertigung weltweit bis zum Jahr 2023 (in Euro pro Kubikzentimeter)*", URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/445058/umfrage/prognose-zur-kostenentwicklung-additiver-fertigung-weltweit/>. 18-07-2018
- [2] DATACOM Buchverlag GmbH: „*Sensor*“, URL <https://www.itwissen.info/Sensor-sensor.html>. 05-08-2019
- [3] AAMPACT e.V. The International Independent Aftermarket Association: „*Sensoren*“, URL <https://www.mein-autolexikon.de/elektronik/sensoren.html>. 05-08-2019
- [4] sens2B: „*Sensortechnologien - Messprinzipien*“, <http://www.sens2b-sensoren.com/sensorik-messtechnik/sensortechnologien-messprinzipien>. 06-08-2019
- [5] Home and Smart: „*induktiver und kapazitiver Sensor*“, URL <https://www.homeandsmart.de/sensor-induktiver-und-kapazitiver>. 06-08-2019
- [6] omega: „*PT100 Temperaturfühler*“, URL <https://www.omega.de/prodinfo/widerstandsfuehler-baugruppen.html>. 06-08-2019
- [7] Omega: „*Thermoelement*“, URL <https://www.omega.de/prodinfo/thermoelemente.html>. 06-08-2019
- [8] Zeiss: „*taktile Sensoren*“, URL <https://www.zeiss.de/messtechnik/produkte/sensoren/am-kmg/taktile-sensoren.html>. 06-08-2019
- [9] Xpertgate: „*Mechanische Sensoren*“, 2018. URL [http://www.xpertgate.de/produkte/Mechanische\\_Sensoren.html](http://www.xpertgate.de/produkte/Mechanische_Sensoren.html). 06-08-2019
- [10] Climate-Stile: „*Taktiler Sensor*“, 22-12-2017. URL <https://climat-stile.ru/taktiler-sensor/> 18-07-2019
- [11] Schülerlexikon: „*Fotozelle*“, 2010. URL <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/fotozelle> 06-08-2019

- [12] Serlo: „Photoelektrischer Effekt,“ [Online]. Available: <https://de.serlo.org/physik/quantenphysik/teilchencharakter-photons/photoelektrischer-effekt>. [Zugriff am 18 07 2019].
- [13] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG: „Kapazitive Sensoren“, URL <https://www.physikinstrumente.de/de/technologie/sensortechnologien/kapazitive-sensoren/06-08-2019>].
- [14] K. W. Bonfig: "Meßtechnik und Meßsignalverarbeitung", expert, 1996.
- [15] Autosen: „*Fachwissen induktive Sensoren*“ URL <https://autosen.com/de/fachwissen-induktive-sensoren>. 07-08-2019
- [16] Elektronik Kompendium: „*Elektrischer Widerstand R*,“ URL <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/0201112.html>. 07-08-2019
- [17] A. Schöne: "*Meßtechnik*", Springer, 1994
- [18] Renate: „*Temperaturfühler Funktion*“, 12-2016. URL <http://kidgu.ru/temperaturfuhrer-funktion/>. 1807 2019].
- [19] Verein deutscher Ingenieure e.V.: "*VDI/VDE 3511 - Technische Temperaturmessungen - Blatt 5 - Einbau von Thermometern*", 1994.
- [20] Ruhlamat: „*Laserstrahlschweißen: Vorgehensweise und Methodik*“, 2018. URL <https://www.ruhlamat.com/de/unternehmen/blog/laserstrahlschweissen-vorgehensweise-und-methodik>. 10-09-2019
- [21] Verein deutscher Ingenieure e.V.: "*VDI/VDE 2635 Experimentelle Strukturanalyse - Blatt 2 - Empfehlung zur Durchführung von Dehnungsmessungen bei hohen Temperaturen*", 2018.
- [22] Concept Laser: „*Selektives Laserschmelzen-SLM*“ Concept Laser, URL <https://www.concept-laser.de/glossar/selektives-laserschmelzen-slm.html>. [Zugriff am 22-07-2019].
- [23] S. Kahraman; Threedom 3D Druck: „*Selektives Laserschmelzen (SLM Verfahren) – 3D Metall Druck*“ URL <https://threedom.de/selektives-laserschmelzen-slm-verfahren>. 22-07-2019

- [24] Fraunhofer IWU; Dr.-Ing. Bernhard Müller: *"Generative Fertigungsverfahren"*, Chemnitz, 2012.
- [25] 3D Laserdruck: „*Leichtbau Innovation für deutsches Olympia Team*“ 2016. <https://www.3d-laserdruck.de/anwendungen/cases/leichtbau-innovation-fuer-deutsches-olympia-team>. 18-07-2019
- [26] ISNG: „*Statista: Weltweiter Verbrauch von Nickel in den Jahren von 2006 bis 2019\* (in 1.000 Tonnen)*“, 10-2018. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/193974/umfrage/raffinerieproduktion-von-nickel-seit-2006/> 22-08-2018
- [27] GDB; World Bureau of Metal Statistics: „*Statista: Verteilung der Verwendung von Nickel weltweit nach Hauptverwendungsgebieten im Jahr 2018*“ 05-2019 URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/323169/umfrage/verwendung-von-nickel-weltweit-nach-hauptverwendungsgebieten/> 22-08-2019
- [28] Chemie.de: „*Nickel*“, URL <https://www.chemie.de/lexikon/Nickel.html>. 22-08-2019
- [29] W. Dr.-Ing. Ulrich Heubner: „*Downloads: Edelstahl Rostfrei*“ 2014. URL [https://www.edelstahl-rostfrei.de/downloads/iser/MB\\_821.pdf](https://www.edelstahl-rostfrei.de/downloads/iser/MB_821.pdf). 20-08-2019
- [30] J. Klöwer und U. Heubner: *"Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedelstähle Eigenschaften - Verarbeitung - Anwendung"*, Renningen: expertverlag, 2012.
- [31] hbm: „*So finden sie den richtigen Klebstoff für die Installation*“, 2008. URL <https://www.hbm.com/de/4314/so-finden-sie-den-richtigen-klebstoff-fuer-die-installation/> 20-08-2019].
- [32] Mergenthaler: „*Laserlöten*“, URL <https://ma-info.de/laserloeten.html>. 09-08-2019
- [33] OBI: „*Richtig Löten*“, URL <https://www.obide/ratgeber/technik/werkstatt-werkzeuge-und-maschinen/richtig-loeten/> 09-08-2019
- [34] Fronius: „*Was ist Widerstandspunktschweißen*“ URL <https://www.fronius.com/de/schweisstechnik/schweisswelten/widerstandspunktschweissen>. 26-7-2019
- [35] M. Wolff: *"Sensor Technologien Band 1: Position, Entfernung, Verschiebung, Schichtdicke"*, Oldenbourg: De Gruyter, 1996.

---

**Anlagenverzeichnis****AI Datenblätter**

Hochtemperaturdehnmessstreifen KHCX-10-120-G13	II
Inconel 600	III
X6CrNiMoTi17-12-2	IV

**AII Versuchstabellen**

Lineargeschweißte CW-Nähte	V
Pulsgeschweißte Nähte	VI
Kreisgeschweißte CW-Nähte	VII

**AIII Auswertung der Zugscherprüfung**

Ermittelte Zugkräfte beim Scherzugversuch in Versuchsreihe B	VIII
Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der CW geschweißten Linearnähte	IX
Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der gepulst geschweißten Nähte	X
Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der CW geschweißten Kreisnähte	XI
Berechnete Zug- und Scherspannungen	XII

AI Datenblätter

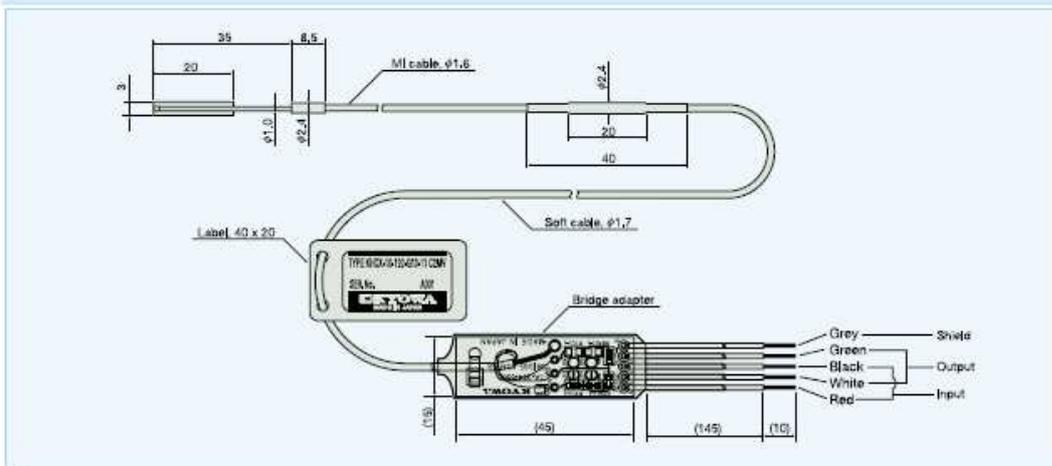
Abbildung 37: Datenblatt Hochtemperaturdehnmessstreifen KHCX-10-120-G13

Specifications

Model: KHCX-10-120-G13

Gage Type: Uniaxial half-bridge temperature-compensation type (encapsulated)  
 Resistive Element: Heat-resistant special alloy  
 Gage Length: 10 mm  
 Flange and Sheath Tube: NCF 600  
 Gage Resistance: Approx. 120 Ω  
**Leadwire Cable**  
 MI Cable: Ni conductor cable, 1,6 mm diameter by 2 m long, NCF 600 sheath  
 Soft Cable: 1.7 mm diameter by 0.5 m long  
 Operating Temperature Range: -196° to 950°C (for both static strain and dynamic strain)  
 Applicable Linear Expansion Coefficient: 11, 13 x10<sup>-6</sup>/°C or user specified  
**Gage Factor:**  
 Approx. 1.7 at 25°C  
 Approx. 1.5 at 950°C  
**Thermally-induced Apparent Strain:** Estimated curve is shown in the Test Data Sheet.  
**Compensated Temperature Range:** 25° to 950°C  
**Drift:** Within ±20 x10<sup>-6</sup>/h (950°C)  
**Strain Limit:** 10000 µm/m (950°C)  
**Fatigue Life:** 1 x10<sup>6</sup> times (950°C, load strain: ±100 µm/m, load frequency: 6 Hz)  
**Maximum Allowable Current:** 50 mA  
**Insulation Resistance:** 1000 MΩ (25°C)  
**Minimum Mountable Curvature Radius:** 75 mm (20 mm in the case of the model delivered with the flange bent at the factory)  
**Mounting Method:** Spot welding

Dimensions



Specifications are subject to change without notice for improvement.

**Safety precautions**  Be sure to observe the safety precautions given in the instruction manual, in order to ensure correct and safe operation.

Reliability through integration  
  
**KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO., LTD.**  
 Overseas Department:  
 2-4-3, Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0003, Japan  
 Phone: +81-3-5226-3553 Facsimile: +81-3-5226-3566  
 http://www.kyowa-el.com  
 e-mail: overseas@kyowa-el.co.jp  
 Cat. No. K-60-A5-E

Manufacturer's Representative  
  
**ZSE ELECTRONIC GMBH**  
 P.O. Box 1830  
 D-74308 Bietigheim-Bissingen  
 Germany  
 Phone 0049 71 42 68 45  
 Fax 0049 71 42 69 97  
 e-mail: instruments@zse.de  
 internet: www.zse.de  
 Printed in Japan 07/09

Abbildung 38: Datenblatt Inconel 600



2.4816
ALLOY 600

Geschützte Herstellerbezeichnung	Inconel 600, Microfer 7216H																														
Handelsname	Alloy 600																														
Normen	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="font-size: 0.8em;">Werkstoff-Nr.</th> <th style="font-size: 0.8em;">EN Werkstoffbezeichnung</th> <th style="font-size: 0.8em;">UNS</th> <th style="font-size: 0.8em;">Alloy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.4816</td> <td>NiCr15Fe</td> <td>N06600</td> <td>600</td> </tr> </tbody> </table>	Werkstoff-Nr.	EN Werkstoffbezeichnung	UNS	Alloy	2.4816	NiCr15Fe	N06600	600																						
Werkstoff-Nr.	EN Werkstoffbezeichnung	UNS	Alloy																												
2.4816	NiCr15Fe	N06600	600																												
Beschreibung	2.4816 / Alloy 600 ist eine Nickel-Chrom-Eisen Legierung.																														
Besondere Eigenschaften	Gute Beständigkeit gegenüber Oxidation, Aufkohlung und Aufstickung. Gute Beständigkeit gegenüber Spannungsrißkorrosion bei Raum- und erhöhten Temperaturen. Gute Beständigkeit gegen trockenes Chlor und Chlorwasserstoff.																														
Chemische Zusammensetzung	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tbody> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">C %</td> <td style="font-size: 0.8em;">Si ≤ %</td> <td style="font-size: 0.8em;">Mn ≤ %</td> <td style="font-size: 0.8em;">P ≤ %</td> <td style="font-size: 0.8em;">S ≤ %</td> </tr> <tr> <td>0,05-0,10</td> <td>0,50</td> <td>1,00</td> <td>0,02</td> <td>0,015</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Cr %</td> <td style="font-size: 0.8em;">Ni %</td> <td style="font-size: 0.8em;">Ti ≤ %</td> <td style="font-size: 0.8em;">Cu %</td> <td style="font-size: 0.8em;">Al %</td> </tr> <tr> <td>14,0-17,0</td> <td>≤ 72,0</td> <td>≤ 0,30</td> <td>≤ 0,50</td> <td>≤ 0,30</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 0.8em;">Co %</td> <td style="font-size: 0.8em;">B %</td> <td style="font-size: 0.8em;">Fe %</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>≤ 1,50</td> <td>≤ 0,006</td> <td>6,00-10,0</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	C %	Si ≤ %	Mn ≤ %	P ≤ %	S ≤ %	0,05-0,10	0,50	1,00	0,02	0,015	Cr %	Ni %	Ti ≤ %	Cu %	Al %	14,0-17,0	≤ 72,0	≤ 0,30	≤ 0,50	≤ 0,30	Co %	B %	Fe %			≤ 1,50	≤ 0,006	6,00-10,0		
C %	Si ≤ %	Mn ≤ %	P ≤ %	S ≤ %																											
0,05-0,10	0,50	1,00	0,02	0,015																											
Cr %	Ni %	Ti ≤ %	Cu %	Al %																											
14,0-17,0	≤ 72,0	≤ 0,30	≤ 0,50	≤ 0,30																											
Co %	B %	Fe %																													
≤ 1,50	≤ 0,006	6,00-10,0																													
Mechanische Eigenschaften 20°C	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="font-size: 0.8em;">0,2% Streckgrenze R<sub>s</sub> ≥ N/mm<sup>2</sup></th> <th style="font-size: 0.8em;">Zugfestigkeit R<sub>m</sub> N/mm<sup>2</sup></th> <th style="font-size: 0.8em;">Dehnung A<sub>5</sub> ≥ %</th> <th style="font-size: 0.8em;">Zunderbeständigkeit °C</th> <th style="font-size: 0.8em;">Elastizitätsmodul kN/mm<sup>2</sup></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>175</td> <td>490-640</td> <td>35</td> <td>1150</td> <td>214</td> </tr> </tbody> </table>	0,2% Streckgrenze R <sub>s</sub> ≥ N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	Dehnung A <sub>5</sub> ≥ %	Zunderbeständigkeit °C	Elastizitätsmodul kN/mm <sup>2</sup>	175	490-640	35	1150	214																				
0,2% Streckgrenze R <sub>s</sub> ≥ N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	Dehnung A <sub>5</sub> ≥ %	Zunderbeständigkeit °C	Elastizitätsmodul kN/mm <sup>2</sup>																											
175	490-640	35	1150	214																											
Physikalische Eigenschaften 20°C	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="font-size: 0.8em;">Dichte g/cm<sup>3</sup></th> <th style="font-size: 0.8em;">Spezifische Wärme J/kg K</th> <th style="font-size: 0.8em;">Wärmeleitfähigkeit W/m K</th> <th style="font-size: 0.8em;">Elektr. Widerstand Ω mm<sup>2</sup>/m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8,5</td> <td>460</td> <td>14,8</td> <td>0,98</td> </tr> </tbody> </table>	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Spezifische Wärme J/kg K	Wärmeleitfähigkeit W/m K	Elektr. Widerstand Ω mm <sup>2</sup> /m	8,5	460	14,8	0,98																						
Dichte g/cm <sup>3</sup>	Spezifische Wärme J/kg K	Wärmeleitfähigkeit W/m K	Elektr. Widerstand Ω mm <sup>2</sup> /m																												
8,5	460	14,8	0,98																												
Schweißzusatzwerkstoffe	2.4648; 2.4620																														
Anwendungsgebiete	Industriefenbau, chemische Industrie, Reaktorbau,																														
Lieferbare Produktformen für 2.4816 / ALLOY 600	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="font-size: 0.8em;">Bleche</th> <th style="font-size: 0.8em;">Stangen</th> <th style="font-size: 0.8em;">Drähte</th> <th style="font-size: 0.8em;">Rohre</th> <th style="font-size: 0.8em;">Fittings</th> <th style="font-size: 0.8em;">Schmiede-/Gussstücke</th> <th style="font-size: 0.8em;">Fertigteile (Zeichnung)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Bleche	Stangen	Drähte	Rohre	Fittings	Schmiede-/Gussstücke	Fertigteile (Zeichnung)																							
Bleche	Stangen	Drähte	Rohre	Fittings	Schmiede-/Gussstücke	Fertigteile (Zeichnung)																									
																															

© Metakcor GmbH | Heidhauser Str. 89a | D-45239 Essen | Deutschland  
 Tel. +49 (201) 310 77 52 | Fax +49 (201) 310 77 47 | info@metakcor.de | www.metakcor.de  
 Alle Angaben sind ohne Gewähr und dienen nur der Beratung. Dieses Datenblatt bildet kein vertragliches Dokument.  
 Eine Haftung für sämtliche Angaben sowie für Ergebnisse in der Verarbeitung und Anwendung der Produkte ist ausgeschlossen.

Abbildung 39: Datenblatt X6CrNiMoTi17-12-2



1.4571

AISI 316 Ti

Normen	Werkstoff-Nr.	EN Werkstoffbezeichnung	AISI/SAE	UNS
	1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316 Ti	S31635

**Beschreibung** | 1.4571 ist ein nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Edelstahl mit Titanstabilisierung

**Besondere Eigenschaften** | Gute Korrosionsbeständigkeit bei niedrigen Salpeter- und organischen Säuren.

Chemische Zusammensetzung	C %	Si ≤ %	Mn ≤ %	P ≤ %	S ≤ %
	≤ 0,08	1,00	2,00	0,045	0,015
	Cr %	Mo %	Ni %	Ti ≤ %	
	16,5-18,5	2,00-2,50	10,5-13,5	5 x C	

Mechanische Eigenschaften 20°C	Härte HB 30 ≤ HB	0,2% Streckgrenze R <sub>s</sub> ≥ N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	Dehnung A <sub>5</sub> ≥ %	Elastizitätsmodul kN/mm <sup>2</sup>
	215	200	500-700	40/30	200

Physikalische Eigenschaften 20°C	Dichte g/cm <sup>3</sup>	Spezifische Wärme J/kg K	Wärmeleitfähigkeit W/m K	Elektr. Widerstand Ω mm <sup>2</sup> /m
	8	500	15	0,75

**Schweiß-zusatzwerkstoffe** | 1.4430; 1.4576

**Anwendungsgebiete** | Chemische Industrie, Textilindustrie, Zelluloseherstellung

Lieferbare Produktformen für 1.4571 / AISI 316 Ti	Bleche	Stangen	Drähte	Rohre	Fittings	Schmiede-/Gussstücke	Fertigteile (Zeichnung)

## AII Versuchstabellen

Tabelle 13: Versuchstabelle der CW Geschweißten Nähte

Pos.	Bez.	Leistung [W]	Geschwindigkeit [mm/s]	Schweißnahtlänge l in mm	Schweißzeit t in s	Streckenenergie [Ws/mm]	Gut / Schlecht
1		120	10	50	5,00	12,00	S
2		120	20	50	2,50	6,00	S
3		120	30	50	1,67	4,00	S
4		120	40	50	1,25	3,00	S
5		120	50	50	1,00	2,40	G
6	L1	120	60	50	0,83	2,00	G
7	L2	120	70	50	0,71	1,71	G
8		120	80	50	0,63	1,50	G
9		120	90	50	0,56	1,33	KA
10		120	100	50	0,50	1,20	KA
11		120	110	50	0,45	1,09	KA
12		250	20	50	2,50	12,50	S
13		250	30	50	1,67	8,33	S
14		250	40	50	1,25	6,25	G
15		250	50	50	1,00	5,00	G
16		250	60	50	0,83	4,17	G
17		250	70	50	0,71	3,57	S
18		250	80	50	0,63	3,13	G
19		250	90	50	0,56	2,78	G
20		250	100	50	0,50	2,50	G
21		250	110	50	0,45	2,27	G
22		250	120	50	0,42	2,08	S
23		250	130	50	0,38	1,92	G
24	L3	250	140	50	0,36	1,79	G
25	L4	250	150	50	0,33	1,67	G
26	L5	250	160	50	0,31	1,56	G
27	L6	250	170	50	0,29	1,47	G
28	L7	250	180	50	0,28	1,39	G
29	L8	250	190	50	0,26	1,32	G
30	L9	250	200	50	0,25	1,25	G
31	L10	250	210	50	0,24	1,19	G
32		250	220	50	0,23	1,14	G
33		500	40	50	1,25	12,50	S
34		500	60	50	0,83	8,33	S
35		500	80	50	0,63	6,25	S
36		500	100	50	0,50	5,00	S
37		500	120	50	0,42	4,17	S
38		500	140	50	0,36	3,57	G
39		500	160	50	0,31	3,13	S
40		500	180	50	0,28	2,78	S
41		500	200	50	0,25	2,50	S
42		500	220	50	0,23	2,27	S
43		500	240	50	0,21	2,08	S
44		500	260	50	0,19	1,92	S
G		Gut aussehende Naht (Keine Löcher, Kein Nahteinfall, wenig / keine Spritzer)					
S		aussehende					
KA		Naht ohne Anbindung					

Schweißversuche gepulste-Nähte mit 100µm Faser, Fokus = 0												
Pos.	Bez.	Pulsdaten				Leistung in [W]	Geschwindigkeit [mm/s]	Pulsenergie je Punkt in [Ws]	Pulsenergie in [W]	Pulspunkanzahl	Streckenenergie in Ws/mm	Gut / Schlecht
		Pulsdauer t in [ms]	Frequenz in [Hz]	Schweißzeit in [s]	Schweißnahtlänge in [mm]							
45		1	117,60	5,00	50	250	10	0,25	147,00	588	2,94	S
46		1	235,20	2,50	50	250	20	0,25	147,00	588	2,94	S
47		1	352,80	1,67	50	250	30	0,25	147,00	588	2,94	S
48		1	470,40	1,25	50	250	40	0,25	147,00	588	2,94	S
49		1	588,00	1,00	50	250	50	0,25	147,00	588	2,94	G
50		1	117,60	5,00	50	500	10	0,5	294,00	588	5,88	G
51		1	235,20	2,50	50	500	20	0,5	294,00	588	5,88	S
52		1	352,80	1,67	50	500	30	0,5	294,00	588	5,88	S
53		1	470,40	1,25	50	500	40	0,5	294,00	588	5,88	G
54		1	588,00	1,00	50	500	50	0,5	294,00	588	5,88	S
55		0,3	117,60	5,00	50	500	10	0,15	88,20	588	1,76	KA
56		0,3	235,20	2,50	50	500	20	0,15	88,20	588	1,76	G
57	P1	0,3	235,20	2,50	50	500	20	0,15	88,20	588	1,76	G
58	P2	0,3	352,80	1,67	50	500	30	0,15	88,20	588	1,76	G
60	P3	0,3	470,40	1,25	50	500	40	0,15	88,20	588	1,76	G
61	P4	0,3	588,00	1,00	50	500	50	0,15	88,20	588	1,76	G
62	P5	0,3	705,60	0,83	50	500	60	0,15	88,20	588	1,76	G
63	P6	0,3	823,20	0,71	50	500	70	0,15	88,20	588	1,76	G
64	P7	0,3	940,80	0,63	50	500	80	0,15	88,20	588	1,76	G
65		0,3	117,60	5,00	50	750	10	0,225	132,30	588	2,65	G
66		0,3	235,20	2,50	50	750	20	0,225	132,30	588	2,65	S
67		0,3	352,80	1,67	50	750	30	0,225	132,30	588	2,65	S
68		0,3	470,40	1,25	50	750	40	0,225	132,30	588	2,65	S
69		0,3	588,00	1,00	50	750	50	0,225	132,30	588	2,65	S
70		0,3	705,60	0,83	50	750	60	0,225	132,30	588	2,65	S
71		0,3	823,20	0,71	50	750	70	0,225	132,30	588	2,65	S
72		0,3	940,80	0,63	50	750	80	0,225	132,30	588	2,65	S
G		Gut aussehende Naht (Keine Löcher, Kein Nahtefall, wenig / keine Spritzer)										
S		schlecht aussehende Naht ( Anbindung Vorhanden, jedoch: abgeschmolzene Folie, viele Spritzer, teilweise keine Anbindung)										
KA		Naht ohne Anbindung										

Tabelle 14: Versuchstabelle der gepulst geschweißten Nähte

**Tabelle 15: Versuchstabelle der CW Geschweißten Kreisnähte**

Schweißversuche CW geschweißte Kreisnähte mit 100µm Faser, Fokus = 0							
Pos.	Bez.	Leistung in [W]	Geschwindigkeit in [mm/s]	Schweißnahtlänge in [mm]	Schweißzeit in [s]	Streckenenergie [Ws/mm]	Gut / Schlecht
73		120	50	20	0,40	2,40	KA
74		120	60	20	0,33	2,00	KA
75		120	70	20	0,29	1,71	G
76		120	80	20	0,25	1,50	G
77		250	110	50	0,45	2,27	G
78	K1	250	120	50	0,42	2,08	G
79	K2	250	130	50	0,38	1,92	G
80	K3	250	140	50	0,36	1,79	G
81	K4	250	150	50	0,33	1,67	G
82	K5	250	160	50	0,31	1,56	G
83	K6	250	170	50	0,29	1,47	G
84	K7	250	180	50	0,28	1,39	G
85		250	190	50	0,26	1,32	KA
86		250	200	50	0,25	1,25	KA
87		500	80	50	0,63	6,25	G
88		500	100	50	0,50	5,00	G
89		500	120	50	0,42	4,17	S
90		500	140	50	0,36	3,57	S
91		500	160	50	0,31	3,13	G
92		500	180	50	0,28	2,78	G
93		500	200	50	0,25	2,50	G
94		500	220	50	0,23	2,27	G
G		Gut aussehende Naht (Keine Löcher, Kein Nahteneinfall, wenig / keine Spritzer)					
S		schlecht aussehende Naht ( Anbindung Vorhanden, jedoch: abgeschmolzene Folie, viele Spritzer, teilweise keine Anbindung)					
KA		Naht ohne Anbindung					

**AIII Auswertung der Zugscherprüfung****Tabelle 16: Ermittelte Zugkräfte beim Scherzugversuch in Versuchsreihe B**

	F1	F2	F3	F4	F5	$\bar{F}$
L1	1071,3	1085,36	1086,21	1062,6	1077,03	1076,5
L2	1086,65	1100,21	1079,68	1098,33	1095,88	1092,15
L3	1106,5	1087,98	1094,67	1099,7	1092,65	1096,3
L4	1111,71	1115,8	1102,24	1108	1124,5	1112,45
L5	1100,4	1115,44	1116,39	1105,3	1119,97	1111,5
L6	1104,9	1098,56	1107,59	1108,11	1103,84	1104,6
L7	1125,98	1119,56	1120,78	1122,27	1124,41	1122,6
L8	1045,32	1052,47	1055,88	1049,9	1054,43	1051,6
L9	1043	1052,6	1054,7	1051,3	1051,65	1050,65
L10	997,4	983,45	986,77	991,2	990,18	989,8
P1	1082,56	1072,8	1076,9	1078,51	1071,73	1076,5
P2	1100,45	1085,4	1089,66	1091,32	1093,92	1092,15
P3	1091,23	1089,6	1102,2	1097,6	1100,87	1096,3
P4	1115,11	1110	1113,58	1109,78	1113,78	1112,45
P5	1107,44	1114,6	1109,6	1114,56	1111,3	1111,5
P6	1099,97	1115,2	1097,5	1107,3	1103,03	1104,6
P7	1059,97	1065,12	1074,3	1068,99	1079,37	1069,55
K1	1089,63	1068,6	1072,32	1069,3	1082,65	1076,5
K2	1091,6	1089,33	1099,51	1094,9	1085,41	1092,15
K3	1095,87	1091	1100,1	1101,6	1092,93	1096,3
K4	1111,7	1107,69	1119,8	1120,3	1102,76	1112,45
K5	1107,58	1112,9	1099,7	1120,6	1116,72	1111,5
K6	1099,93	1108,1	1105,68	1100,39	1108,9	1104,6
K7	1061,3	1059,7	1068,8	1078,3	1079,65	1069,55

Abbildung 40: Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der CW geschweißten Linearnähte

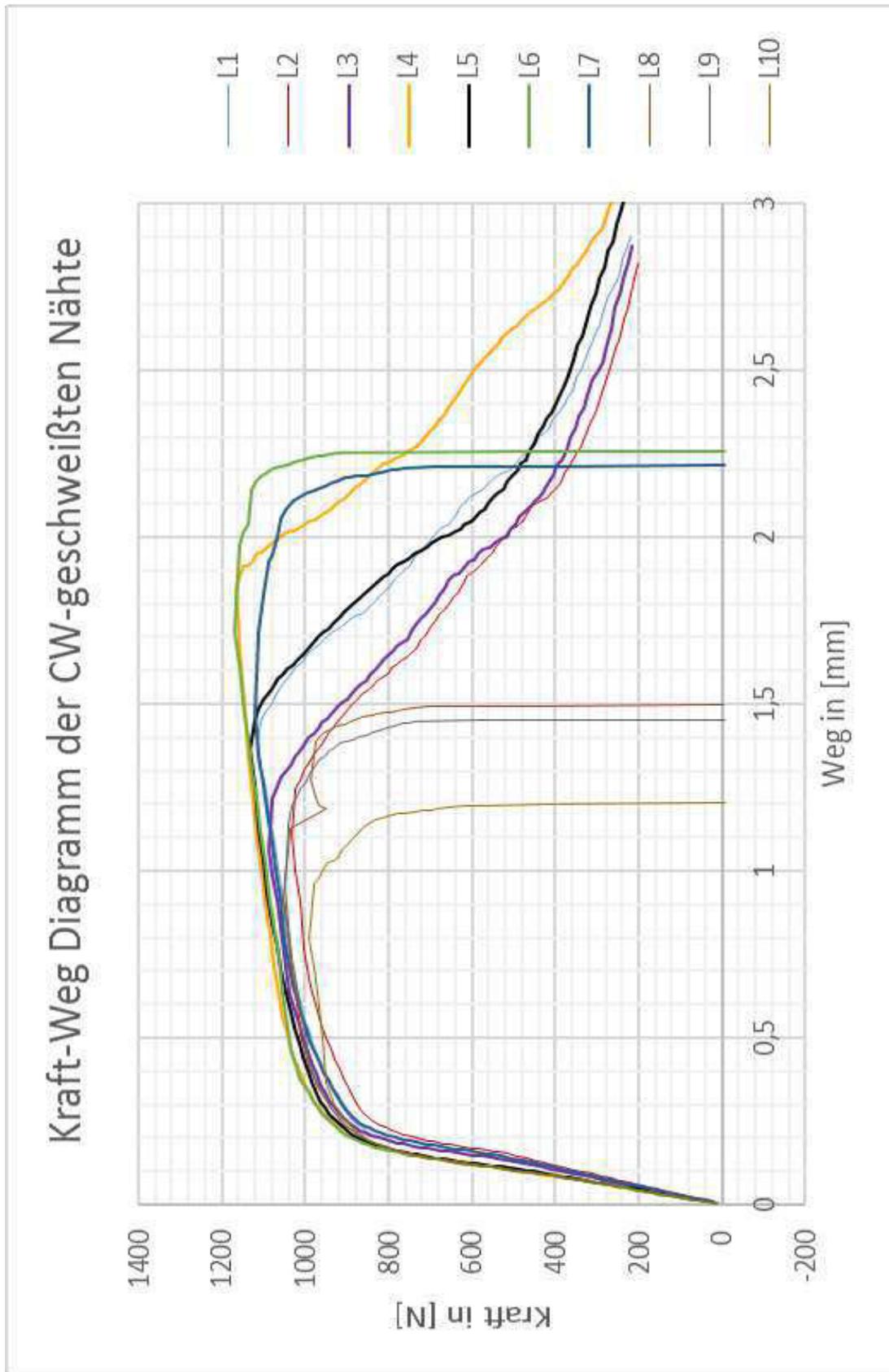


Abbildung 41: Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der gepulst geschweißten Nähte

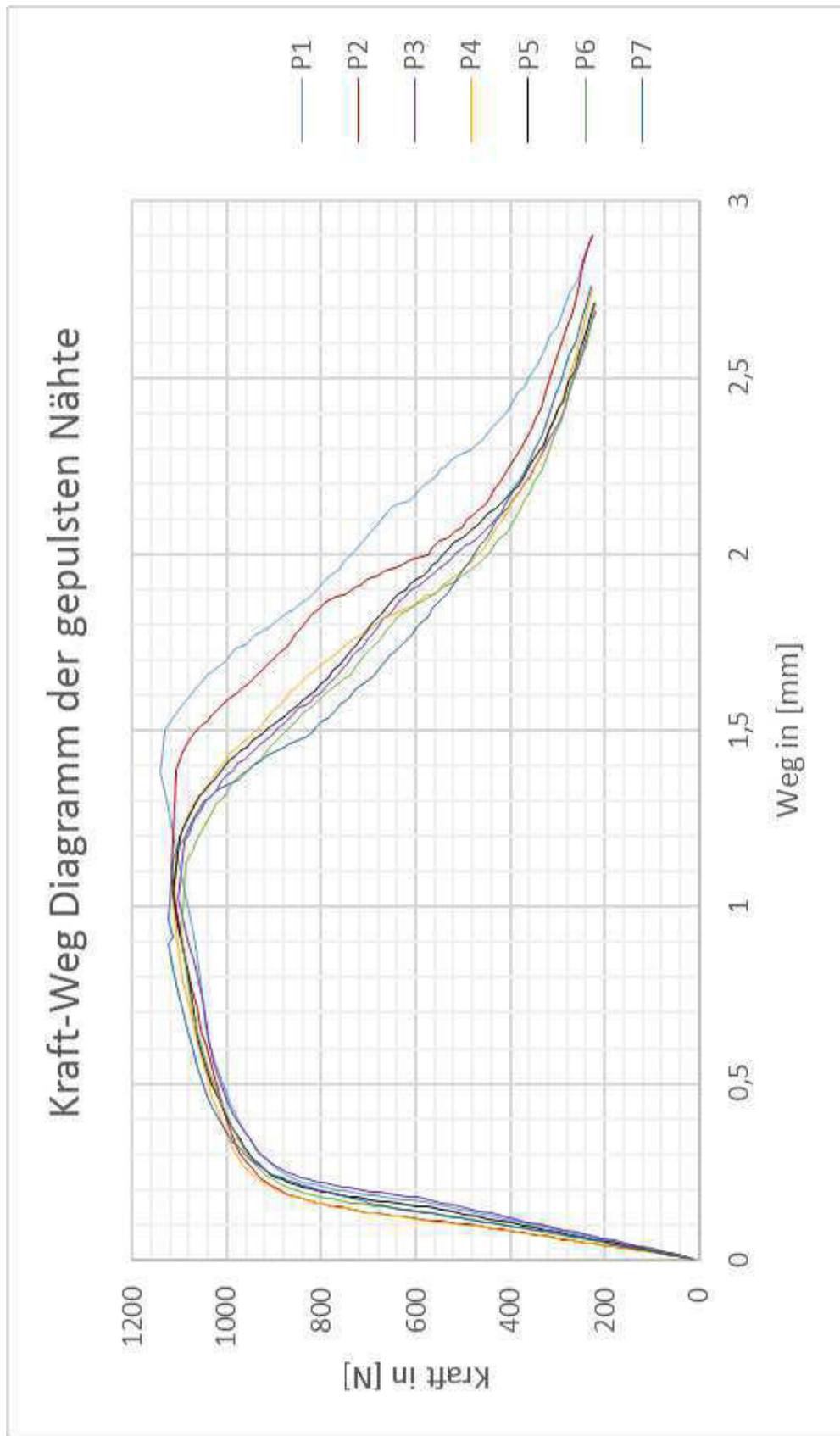
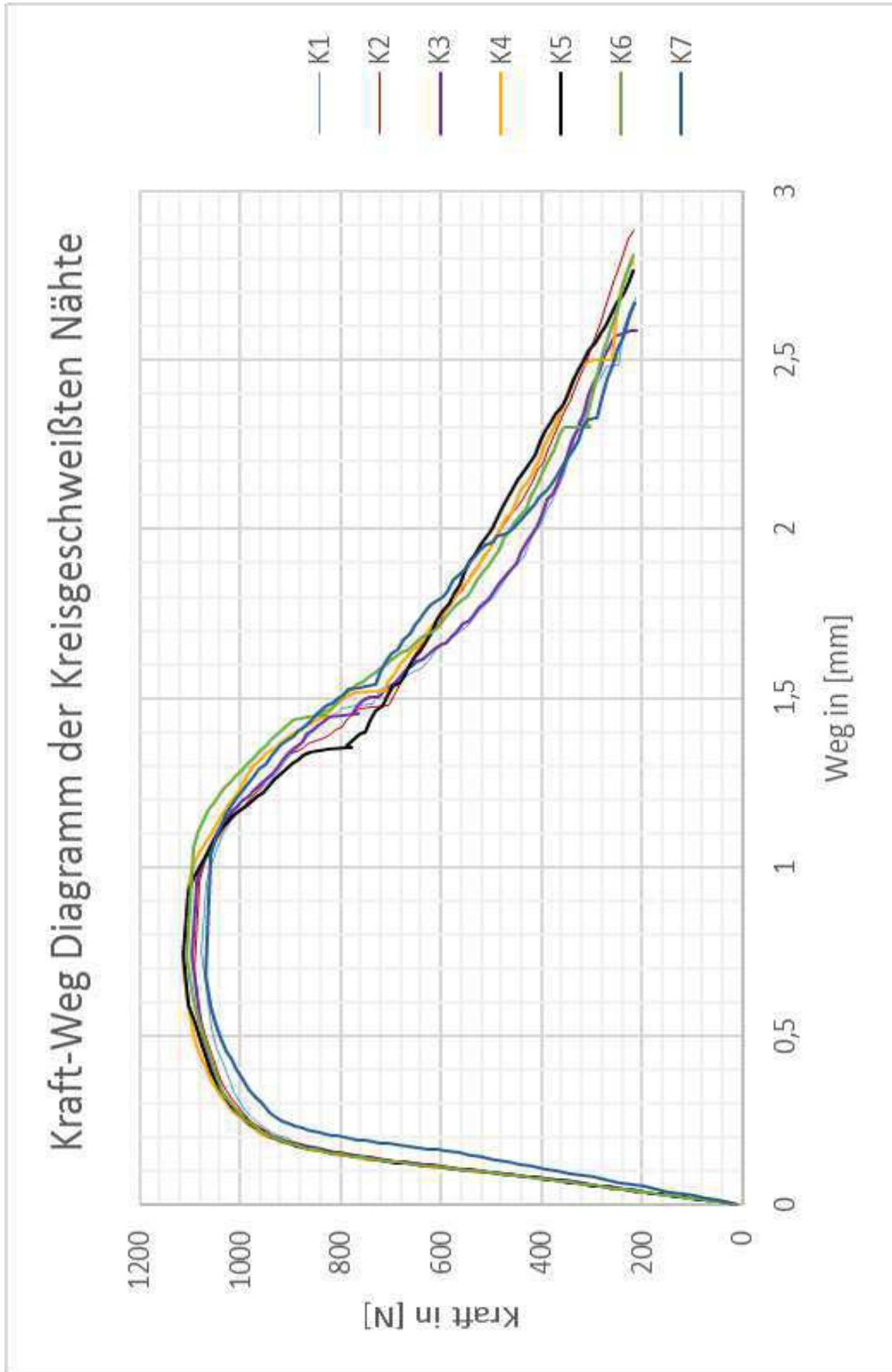


Abbildung 42: Kraftwegdiagramme je einer Probe pro Parametersatz der CW geschweißten Kreisnähte



Bez.	Leistung in [W]	Geschwindigkeit in [mm/s]	Schweißnahtlänge in [mm]	Schweißzeit in [s]	Streckenenergie in [Ws/mm]	Anbindebreite in [µm]	Anbindefläche in [mm²]	Maximale Zugkraft in [N]	Maximale Scherspannung in [N/mm²]	Maximale Zugspannung in [N/mm²]	Maximale Scherspannung bei 820N in [N/mm²]
L1	120	60	20	0,33	2,00	108,00	2,16	1076,50	498,38	269,13	379,63
L2	120	70	20	0,29	1,71	97,00	1,94	1092,15	562,96	273,04	422,68
L3	250	140	20	0,14	1,79	148,57	2,97	1096,30	368,95	274,08	275,96
L4	250	150	20	0,13	1,67	154,29	3,09	1112,45	360,52	278,11	265,74
L5	250	160	20	0,13	1,56	137,14	2,74	1111,50	405,23	277,88	298,96
L6	250	170	20	0,12	1,47	125,71	2,51	1104,60	439,33	276,15	326,14
L7	250	180	20	0,11	1,39	102,86	2,06	1122,60	545,71	280,65	398,61
L8	250	190	20	0,11	1,32	97,00	1,94	1051,60	542,06	262,90	422,68
L9	250	200	20	0,10	1,25	91,00	1,82	1050,65	577,28	262,66	450,55
L10	250	210	20	0,10	1,19	87,00	1,74	989,80	568,85	247,45	471,26
Bez.	Leistung in [W]	Schweißzeit in [s]	Schweißnahtlänge in [m]	Geschwindigkeit in [mm/s]	Streckenenergie in [Ws/mm]	Anbindebreite in [µm]	Anbindefläche in [mm²]	Maximale Zugkraft in [N]	Maximale Scherspannung in [N/mm²]	Maximale Zugspannung in [N/mm²]	Maximale Scherspannung bei 820N in [N/mm²]
K1	250	0,16	18,85	120	2,08	165,20	3,30	1076,50	325,82	269,13	248,18
K2	250	0,14	18,85	130	1,92	171,43	3,43	1092,15	318,54	273,04	239,17
K3	250	0,13	18,85	140	1,79	148,57	2,97	1096,30	368,95	274,08	275,96
K4	250	0,13	18,85	150	1,67	154,29	3,09	1112,45	360,52	278,11	265,74
K5	250	0,12	18,85	160	1,56	137,14	2,74	1111,50	405,23	277,88	298,96
K6	250	0,11	18,85	170	1,47	125,71	2,51	1104,60	439,33	276,15	326,14
K7	250	0,10	18,85	180	1,39	102,86	2,06	1069,55	519,92	267,39	398,61
Bez.	Pulsdaten		Geschwindigkeit [mm/s]	Pulsenergie in [W]	Streckenenergie in [Ws/mm]	Anbindebreite in [µm]	Anbindefläche in [mm²]	Maximale Zugkraft in [N]	Maximale Scherspannung in [N/mm²]	Maximale Zugspannung in [N/mm²]	Maximale Scherspannung bei 820N in [N/mm²]
	f in [Hz]	Schweißzeit in [s]									
P1	235,29	1,00	20	35,29	1,76	57,14	1,14	1076,50	941,94	269,13	717,50
P2	352,94	0,67	30	35,29	1,18	85,71	1,71	1092,15	637,09	273,04	478,33
P3	470,59	0,50	40	35,29	0,88	85,71	1,71	1096,30	639,51	274,08	478,33
P4	588,24	0,40	50	35,29	0,71	160,00	3,20	1112,45	347,64	278,11	256,25
P5	705,88	0,33	60	35,29	0,59	154,29	3,09	1111,50	360,21	277,88	265,74
P6	823,53	0,29	70	35,29	0,50	200,00	4,00	1104,60	276,15	276,15	205,00
P7	941,18	0,25	80	35,29	0,44	211,43	4,23	1069,55	252,93	267,39	193,92

## **Selbstständigkeitserklärung**

---

### **Selbstständigkeitserklärung**

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

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 27.09.2019

Dominic Scholze