



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Behzad Nabil

# **Entwicklung einer Prozessstrategie zur Erzeugung von Nickel-Titan Dichtflächen mittels Laser-Pulver- Auftragschweißen**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science  
Department of Automotive and  
Aeronautical Engineering*

**Behzad Nabil**

**Entwicklung einer Prozessstrategie zur  
Erzeugung**

**von Nickel-Titan Dichtflächen**

**mittels Laser-Pulver-Auftragschweißen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Flugzeugbau  
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:  
Fraunhofer-Einrichtung für Additive  
Produktionstechnologien IAPT  
Am Schleusengraben 14  
21029 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Martin Wagner  
Zweitprüfer: Dr.-Ing. Dirk Herzog

Abgabedatum: 22.03.2022

# **Zusammenfassung**

**Behzad Nabil**

## **Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung einer Prozessstrategie zur Erzeugung von Nickel-Titan Dichtflächen mittels Laser-Pulver-Auftragschweißen

## **Stichworte**

Formgedächtnis-Effekt, Laser-Pulver-Auftragschweißen, Nickel-Titan, Nitinol, NiTi, Auftragschweißen, Superelastizität,

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit umfasst eine Ausarbeitung einer Prozessstrategie zum qualitätssicherem Auftrag von Nickel-Titan Strukturen auf Titan Untergrund mithilfe des Laser-Pulver-Auftragschweißen.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es durch den Auftrag einer Nickel-Titan Legierung Formgedächtnis-Effekte, wie die Superelastizität, für metallische Dichtungen zugänglich zu machen.

Dabei werden alle relevanten physikalischen und werkstofftechnischen Grundlagen erläutert und zur Auslegung von Versuchen genutzt.

**Behzad Nabil**

## **Title of the paper**

Development of a process strategy for generating nickle-titanium seals by laser-metal-deposition

## **Keywords**

Shape memory effects, laser metal deposition, nickle-titanium, nitinol, NiTi, overlay welding, superelasticity

## **Abstract**

Inside this report is a elaboration of a process strategy for a quality controlled application of nickle-titanium structures on a titanium substrate by laser metal deposition.

The objective of this study is to make shape memory effects, like superelasticity, accessible for metallic seals by application of a nickle-titanium alloy.

All relevant physical and material-technical basics are explained and used for the design of experiments.

## Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>  | <b>III</b>  |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>VIII</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>  | <b>IX</b>   |
| <b>Nomenklatur</b>  | <b>10</b>   |
| <b>1 Motivation und Einleitung</b>  | <b>11</b>   |
| 1.1 Das Laser-Pulver-Auftragschweißen im gesellschaftlichen Kontext.....                                  | 11          |
| 1.2 Vorgehensweise und Zielsetzung .....  | 15          |
| <b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b>   | <b>16</b>   |
| 2.1 Technische Erläuterungen zum Laser-Pulver-Auftragschweißen .....                                      | 16          |
| 2.2 Die Eigenschaften der Werkstoffe .....  | 26          |
| 2.2.1 Legierungsbestandteil Nickel.....   | 26          |
| 2.2.2 Legierungsbestandteil Titan.....  | 28          |
| 2.2.3 Nickel-Titan-Legierung bzw. Nitinol.....  | 30          |
| 2.3 Metallische Dichtflächen und ihre Anforderungen .....   | 33          |
| 2.4 Die Formgedächtnis-Effekte und ihre physikalischen Hintergründe.....                                  | 38          |
| 2.4.1 Materialwissenschaftliche Grundlagen .....  | 38          |
| 2.4.2 Thermodynamische Hintergründe der Gitterumwandlung.....   | 40          |
| 2.4.3 Die 3 Formgedächtnis-Effekte .....  | 41          |
| 2.4.4 Kontrollierbarkeit der Umwandlungstemperatur.....   | 47          |
| 2.5 Werkstoffwissenschaftliche und physikalische Einflüsse auf das Laser-Pulver-<br>Auftragschweißen..... | 49          |
| 2.5.1 Die Entstehung von intermetallischen Phasen und ihr Einfluss auf das LPA.....                       | 49          |
| 2.5.2 Wärmeausdehnung und Schweißspannungen als Folge eines inhomogenen<br>Gefüges.....                   | 51          |
| 2.5.3 Zusammenfassung und Interpretation der Effekte im Gesamtkontext der<br>Abschlussarbeit .....        | 54          |
| <b>3 Systematische Entwicklung einer Versuchsstrategie</b>  | <b>55</b>   |
| 3.1 Analyse der zu verwendenden Systemtechnik sowie der Systemgrenzen.....                                | 55          |
| 3.2 Der Standard-Prozessparametersatz.....  | 58          |
| 3.3 Prozess-Instabilität durch das Auftreten von Delaminationen als Folge einer Rissbildung .             | 60          |
| 3.4 Evaluation von auftretenden Materialdefekten im Prozess.....  | 64          |
| 3.4.1 Der Delaminationspunkt.....   | 64          |
| 3.4.2 Der Anbindungspunkt.....  | 66          |
| 3.4.3 Varianz der Aufbauhöhen und Angabe der Schichtanzahl .....  | 67          |
| 3.4.4 Farbeindringprüfung zur Bewertung von Dichtflächen .....  | 67          |
| 3.5 Ableitung von Zielkriterien aus den Anforderungen an metallische Dichtflächen.....                    | 68          |
| 3.6 Festsetzung von Versuchsinhalten unter Zuhilfenahme der physikalischen Hintergründe .                 | 70          |
| <b>4 Durchführung von Versuchsreihen sowie Nachuntersuchung von Proben</b>                                | <b>73</b>   |
| 4.1 Auslegung von Versuchsreihen.....   | 73          |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.1    | Vergrößerte Anbindungsfläche.....  | 73         |
| 4.1.2    | Vorwärmen mittels Laser.....   | 75         |
| 4.1.3    | Vorwärmen im Veraschungssofen .....  | 77         |
| 4.2      | Experimentelle Versuchsdurchführung von Prozessparametern in der Aufbaustrategie.... | 78         |
| 4.2.1    | Vergrößerte Anbindungsfläche.....  | 78         |
| 4.2.2    | Vorwärmen mittels Laser.....   | 80         |
| 4.2.3    | Vorwärmen im Veraschungssofen .....  | 81         |
| 4.3      | Farbeindringprüfung der erzeugten Proben zur Bestätigung der Ergebnisse .....        | 84         |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse und Diskussion</b>   | <b>87</b>  |
| 5.1      | Vergrößerte Anbindungsfläche.....  | 87         |
| 5.1.1    | Untersuchung auf Zielkriterium 1.....  | 87         |
| 5.1.2    | Untersuchung auf Zielkriterium 2.....  | 88         |
| 5.1.3    | Optimierung der vergrößerten Anbindungsfläche: .....                                 | 92         |
| 5.2      | Vorwärmen mittels Laser.....   | 95         |
| 5.2.1    | Untersuchung auf Zielkriterium 1.....  | 97         |
| 5.2.2    | Untersuchung auf Zielkriterium 2.....  | 100        |
| 5.2.3    | Optimierung der Laserparameter .....   | 100        |
| 5.3      | Vorwärmen im Veraschungssofen .....  | 104        |
| 5.3.1    | Untersuchung auf Zielkriterium 1.....  | 104        |
| 5.3.2    | Untersuchung auf Zielkriterium 2.....  | 106        |
| 5.3.3    | Steigerung der Aufbauhöhe.....   | 107        |
| 5.3.4    | Gewichtung der Schutzgasatmosphäre gegenüber der gespeicherten Wärme.....            | 109        |
| 5.3.5    | Optimierung des Temperaturbereichs .....   | 110        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>  | <b>114</b> |
| <b>7</b> | <b>Literatur</b>   | <b>117</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>  | <b>VI</b>  |
| A.1      | Titel Anhang 1.....  | VI         |
| A.2      | Titel Anhang 2.....  | VIII       |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Links ist das 2-dimensionale Schichtsystem zum Aufbau der rechts dargestellten 3-dimensionalen Figur zu sehen.....  | 11 |
| Abbildung 2: Der Einfluss des Laser-Auftragsschweißens auf verschiedene gesellschaftliche Bereiche.....  | 13 |
| Abbildung 3: Erzeugung von gekrümmten Strukturen in Schichtbauweise mithilfe des Laser-Pulver-Auftragsschweißens. [TRUMPF] .....   | 16 |
| Abbildung 4: Erzeugung einer umlaufenden Beschichtung auf einer sich drehenden Welle. [HÄFNER] .....   | 17 |
| Abbildung 5: Wiederhergestellte Vorderkante einer Turbinenschaufel mithilfe des Laser-Pulver-Auftragsschweißens. [TRUMPF] .....  | 18 |
| Abbildung 6: Lokale Materialverstärkungen gegen das Ausbeulen eines Bauteils. [KLB].....   | 19 |
| Abbildung 7: Die Abbildung zeigt die verwendete Systemtechnik.....   | 20 |
| Abbildung 8: Dargestellt ist der Schweißkopf innerhalb der Schutzgaskammer.....  | 21 |
| Abbildung 9: Zu erkennen sind der Pulverförderer (links) und der Pulverbehälter sowie der Auffangteller mit Nut (rechts).....  | 21 |
| Abbildung 10: Dargestellt sind (von links nach rechts) die Regelventile für das Schutzgas der Düse, das Schutzgas der Kammer und das Trägergas des Pulvers.....  | 22 |
| Abbildung 11: Prinzipdarstellung des Schweißkopfs und einer Substrat-Platte. In Anlehnung an [LEANDER]. .....  | 23 |
| Abbildung 12: Dargestellt ist die Bedieneroberfläche des Programms Orlas Suite (rot) zur Bedienung des Lasers. Es ist eine orange, rechteckige Geometrie zu erkennen. Sie entspricht der Bewegung des Lasers während des Schweißens..... | 24 |
| Abbildung 13: In der Abbildung ist das sekundäre Bedienelement für den Laserparameter Laserfokus zu sehen. Durch Drehbewegungen wird der Laserdurchmesser eingestellt.....   | 25 |
| Abbildung 14: Nickel als Kubus (links) und in Knollenform (rechts). Die Knollenform wurde hergestellt durch Elektrolyse. [PNIOK].....  | 26 |
| Abbildung 15: Abgebildet ist reines Titan in Zylinderform. [PNIOK] .....   | 28 |
| Abbildung 16: Das verwendete Nickel-Titan-Pulver im Aufbewahrungsbehälter.....   | 30 |
| Abbildung 17: Abgebildet ist das Ni-Ti-Phasendiagramm. [KAACK].....  | 32 |
| Abbildung 18: Ölablassschraube mit Kupferdichtung in Ringform.....   | 33 |
| Abbildung 19: Zylinderkopfdichtung vor der Montage auf einen Motorblock. [SCHREINER]..   | 34 |
| Abbildung 20: Abgebildet ist das Gehäuse eines zylinderförmigen Gasbehälters. [STOECKEL2] .....  | 35 |
| Abbildung 21: Dargestellt ist ein Deckel und ein Behälter, die planar aufliegen (oben) sowie ein Behälter mit unebener Kontaktfläche (unten). Der Leckverlust ist im unteren Beispiel höher als bei planaren Kontaktflächen.....         | 36 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 22: Dargestellt ist die Umwandlung einer kubisch raumzentrierten Elementarzelle (links) zu einer kubisch flächenzentrierten Zelle (rechts) aufgrund von Temperaturänderungen.....  | 38 |
| Abbildung 23: Zu sehen ist die Reversibilität der Gitterumformung durch das Erwärmen bzw. Abkühlen.....  | 38 |
| Abbildung 24: Dargestellt ist der Zyklus zwischen Erwärmen und Abkühlen der eine Mehrfachanwendung in technisch relevanter Anzahl ermöglicht. ....   | 39 |
| Abbildung 25: Die Gittertypen der verwendeten Legierung Nitinol sind in der Hochtemperaturphase kubisch raumzentriert (a) und in der Tieftemperaturphase monoklin primitiv (b). ....   | 39 |
| Abbildung 26: Das kubisch primitive Atomgitter ohne Winkelverdrehung kann durch ein geordnetes Gefüge aus Quadraten vereinfacht dargestellt werden.....  | 41 |
| Abbildung 27: Martensit mit Zwillingen (links) und verformter, entzwillingter Martensit (rechts).....  | 42 |
| Abbildung 28: Dargestellt ist ein Temperatur-Zeit-Verlauf (unten) mit zugehöriger Gefügestruktur (oben). Der anfängliche, geordnete Austenit wandelt sich durch Abkühlen (blau) in den Martensit mit Zwillingsebenen um. Im Zuge einer Verformung (grün) entsteht daraufhin entzwillingter Martensit. Dieser kann durch Erwärmen (rot) in das anfängliche Austenit-Gefüge zurückgewandelt werden.....        | 43 |
| Abbildung 29: Dargestellt ist: 1. Links: Ein unbelasteter Zylinder bestehend aus Austenit, da die Temperatur, die der Hochtemperaturphase entspricht. 2. In der Mitte: Der Zylinder, der unter Krafteinfluss über die Streckgrenze hinaus verformt wurde. Er besteht nun aus spannungsinduziertem Martensit. 3. Rechts: Die sofortige Rückumwandlung bei Wegnahme der Kraft aufgrund der Austenittemperatur. | 44 |
| Abbildung 30: Die Abbildung zeigt einen blauen Klotz aus Martensit. Durch Erwärmen bildet sich die austenitische Form wie zuvor beim Einweg-Effekt. Im Unterschied zum Einweg-Effekt kann man zusätzlich die Umformung beim Abkühlen in eine festgelegte, martensitische Form beobachten.....  | 45 |
| Abbildung 31: Zu sehen ist der Vergleich zwischen Einweg-Effekt und Zweiweg-Effekt. Der Einweg-Effekt hat im Gegensatz zum Zweiweg-Effekt kein Formgedächtnis beim Abkühlen.....   | 46 |
| Abbildung 32: Das Zustandsdiagramm für Nickel-Titan (a) und ein Ausschnitt mit dem Bereich der notwendigen Phasenumwandlung (b). In Anlehnung an [KAACK]...  | 47 |
| Abbildung 33: Dargestellt ist die Veränderung der Umwandlungstemperatur mit steigendem Nickel-Gehalt. [ROOS] .....   | 48 |
| Abbildung 34: Zu erkennen ist die intermetallische Phase $Ti_2Ni$ innerhalb einer Nickel-Titan-Matrix. In Anlehnung an [Großmann].....   | 49 |
| Abbildung 35: Dargestellt ist eine Schweißspur mit verschiedenen Graustufen in Gebieten mit unterschiedlicher Werkstoffzusammensetzung. In Anlehnung an [SCHEITLER]..  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 36: Abgebildet sind Inhomogenitäten der aufgetragenen Schichten (gelber und grüner Bereich). Der hellblaue Bereich, die Substrat-Platte, besteht aus Titan. Im grünen Übergangsbereich kann man die Zunahme vom Titangehalt, mit zunehmendem Wert in der Nähe der Titan-Platte, erkennen. Dabei ist für den Übergangsbereich (grüne Kurve im Diagramm) nicht bekannt ob tatsächlich ein linearer Verlauf auftritt. Die grüne Kurve soll nur den Sachverhalt der Zunahme des Titangehalts veranschaulichen. .... | 52 |
| Abbildung 37: Die Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen. Der für uns relevante Bereich ist der elastische Bereich (hellblau).  | 52 |
| Abbildung 38: Der Schweißkopf innerhalb der Prozesskammer. ....   | 56 |
| Abbildung 39: Sensor zur Messung von Sauerstoffpartikeln. [SENSORE].....  | 56 |
| Abbildung 40: Veraschungssofen der Firma Nabertherm. ....   | 57 |
| Abbildung 41: Zu erkennen ist ein rissfreier Auftrag (oben) und die Rissentstehung zwischen dem Substrat und den aufgetragenen Schichten (unten). ....  | 60 |
| Abbildung 42: Dargestellt ist die Zielgeometrie (links) sowie die Verdrehung und Ablösung der aufgetragenen Schichten im Zuge des Verfahrens (rechts). Die blauen Linien zeigen das „verdrehte Plättchen“ das nach dem Schweißprozess resultiert.....   | 61 |
| Abbildung 43: Zu erkennen ist die Delamination der Struktur. Die roten Punkte markieren den Delaminationspunkt. Der Winkel $\alpha$ zeigt die Verdrehung der Endquerschnitte in der Vorderansicht. Die Höhe H wird in nachfolgenden Abschnitten relevant.....   | 61 |
| Abbildung 44: Mit einem roten Punkt ist der Anbindungspunkt markiert. Er entsteht während des Schweißprozesses und weist die geringste Delamination der gesamten Struktur auf. ....   | 62 |
| Abbildung 45: Abgebildet ist die verdrehte Struktur (links) und die sich bildende Wandüberhöhung in grün (rechts).....  | 62 |
| Abbildung 46: Dargestellt sind die markanten Punkte sowie die Wandüberhöhung. ....  | 63 |
| Abbildung 47: Für den weiteren Verlauf sind der Delaminationspunkt sowie der Anbindungspunkt relevant. ....   | 64 |
| Abbildung 48: Höhenmessung am Delaminationspunkt durch einen Messschieber. Im unteren Bild kann man die Anpassung an die Höhe des Delaminationspunktes erkennen. ....   | 65 |
| Abbildung 49: Messung der Auftragsdicke von 5 Schweißschichten am Anbindungspunkt. ....   | 66 |
| Abbildung 50: Eine Zusammenstellung von Zielkriterien und zuvor festgelegten Anforderungen. In blau sind die Materialdefekte zu sehen. Die Vermeidung dieser führt zur Erfüllung von Anforderungen aus Abschnitt 2.3 und zur Zielgeometrie.....   | 69 |
| Abbildung 51: Strukturbaum der OrlasSuite Anwendung. Dargestellt sind beispielhaft 2 Einträge für Befehlspakete bzw. Jobs. ....   | 73 |
| Abbildung 52: Zu erkennen ist die Darstellung der zu erzeugenden Geometrien. Das innere, orangene Rechteck ist die Geometrie nach Standard-Parametern. Das äußere,  |    |

|   |    |
|---|----|
| orangene Rechteck ist die vergrößerte Anbindungsfläche. Der graue Hintergrund ist Teil der Computer-Anwendung. ....   | 74 |
| Abbildung 53: Stahlblock zur Erhöhung der Gesamtmasse sowie zur Aufnahme der Substrat-Platte. ....  | 77 |
| Abbildung 54: Ausgangssituation vor jedem Schweißbeginn. ....   | 78 |
| Abbildung 55: Zu erkennen sind sicherheitsrelevante Bedienelemente. ....  | 79 |
| Abbildung 56: Die Abbildung zeigt den Beginn des Schweißprozesses. Die grüne Färbung stammt von der Färbung des Schutzglases. ....  | 80 |
| Abbildung 57: Der geöffnete Ofen, das Blocksystem mit der Substrat-Platte sowie eine Hebevorrichtung sind zu erkennen. ....   | 81 |
| Abbildung 58: Die Abbildung zeigt das Gesamtsystem vor dem Erwärmen. ....   | 82 |
| Abbildung 59: Die Abbildung zeigt die Ausgangssituation in der Schutzgaskammer vor Beginn des Schweißvorgangs. ....   | 82 |
| Abbildung 60: Zu sehen ist links das Farbeindringmittel und rechts die Entwicklerflüssigkeit. ....  | 84 |
| Abbildung 61: Ausgewählte Proben wurden mit einem Farbeindringmittel benetzt. ....  | 85 |
| Abbildung 62: Proben mit vergrößerter Anbindungsfläche unter der magentafarbenen Eindringmittel. ....   | 85 |
| Abbildung 63: Die Entwicklerflüssigkeit verfärbt sich ins milchig-weiße während des Trocknens. ....   | 86 |
| Abbildung 64: Eine Probe mit vergrößerter Anbindungsfläche in der räumlichen Ansicht sowie in der Vorderansicht. ....   | 87 |
| Abbildung 65: Dargestellt sind die Ergebnisse aus 2 Farbeindringprüfungen. ....   | 88 |
| Abbildung 66: Das Bild zeigt den für die Rissentstehung kritischen Ort der Anbindungsfläche. ....   | 89 |
| Abbildung 67: Die Gesamthöhe der Struktur beträgt 1,75 mm ohne Beachtung der Wandüberhöhungen. Es wurden 15 Schichten mit einer Höhe von 1,42 Millimeter aufgebaut (ohne die Anbindungsschichten gezählt). .... | 90 |
| Abbildung 68: Zu sehen sind beide Farbeindringprüfungen. Das Ergebnis der ersten Prüfung ist links zu sehen. ....   | 90 |
| Abbildung 69: Dargestellt ist eine Probe mit 15 Schichten unter dem Mikroskop. Eine Rissbildung ist nicht zu erkennen. ....   | 91 |
| Abbildung 70: Dargestellt ist eine Aufbauhöhe von 1,42 mm mit reduzierter Schichthöhe von 0,33 mm. ....   | 92 |
| Abbildung 71: Dargestellt von links nach rechts: 3 mm Offset, 2 mm Offset und 1 mm Offset. ....   | 93 |
| Abbildung 72: Zu erkennen sind Proben (106.2.1/106.2.2) mit reduzierten Anbindungsflächen. ....   | 93 |
| Abbildung 73: Eine reduzierte Anbindungsfläche unter dem Mikroskop. Die gefährdete Schicht zeigt keine Rissbildung. ....  | 94 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 74: Die Platte 104.3 dargestellt in der Draufsicht. Von links nach rechts:<br>Vergleichsprobe nach Standardparametersatz, 2 Vorbelichtungen, 4<br>Vorbelichtungen, 6 Vorbelichtungen, 8 Vorbelichtungen und 10<br>Vorbelichtungen. ....   | 95  |
| Abbildung 75: Platte 104.3 in der Seitenansicht. ....   | 95  |
| Abbildung 76: Delaminationshöhe einer Probe (104.3.2) mit 2 Vorbelichtungen. ....   | 96  |
| Abbildung 77: Delamination der Probe mit 4 Vorbelichtungen. ....  | 97  |
| Abbildung 78: Erhöhung der Delamination an den Proben 104.3.4/.5/.6. ....   | 98  |
| Abbildung 79: Es sind deutliche Verfärbungen auf der Platte 104.2 zu erkennen. Von links<br>nach rechts: Probe 104.2.1/.2/.3/.4. ....   | 101 |
| Abbildung 80: Die Platte 104.2 in der Seitenansicht. Die zweite Probe von rechts wurde mit<br>einem fremden Parametersatz geschweißt und ist deshalb nicht weiter zu<br>beachten. Es können deutliche Delaminationen festgestellt werden. ....  | 102 |
| Abbildung 81: Platte 115 in der Draufsicht. ....  | 104 |
| Abbildung 82: Von links nach rechts: Probe 115.1, Probe 115.2 und Probe 115.3. ....   | 104 |
| Abbildung 83: Die Probe 115.1 in der Nahaufnahme. ....  | 105 |
| Abbildung 84: Probe 113.1 zeigt den gleichen Sachverhalt wie Probe 115.1, eine Rissbildung<br>ohne Delamination. ....   | 106 |
| Abbildung 85: Die Abbildung zeigt die Probe 113.1 ohne Delamination jedoch mit deutlicher<br>Rissbildung sowie Farbresten aus der Farbeindringprüfung. ....   | 106 |
| Abbildung 86: Dargestellt ist eine Timelapse der Proben mit abnehmender Temperatur nach<br>rechts. ....   | 109 |
| Abbildung 87: Delaminationen an Proben unter Temperatureinfluss. Von links nach rechts:<br>Probe 107.1, 107.2 und 107.3. ....   | 109 |
| Abbildung 88: Dargestellt ist die Platte 114, die mit 550°C geschweißt wurde. ....  | 110 |
| Abbildung 89: Proben 108.2 und 108.3 wurden bei 600°C vorgewärmt. ....  | 111 |
| Abbildung 90: Die Probe 108.1 zeigt einen Aufbau mit 400°C Vorwärmung. ....   | 112 |
| Abbildung 91: Dargestellt sind die Delaminationshöhen in Abhängigkeit von der<br>Vorwärmtemperatur. Das Diagramm zeigt aus Gründen der Einfachheit lineare<br>Kurvenverläufe zwischen gemessenen Daten. Die Distanzen zwischen den<br>Messwerten sind nicht einheitlich, für die Veranschaulichung des Sachverhalts<br>jedoch ausreichend. .... | 112 |
| Abbildung 92: Eine Zusammenfassung über die Erfüllung der Zielkriterien. ....   | 116 |

## Tabellenverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Nickel. [WEIßBACH] [CZICHOS] .....   | 27  |
| Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften von $\alpha$ -Titan. [WEIßBACH] [ROOS].....  | 29  |
| Tabelle 3: Dargestellt sind wichtige Materialeigenschaften für Nickel-Titan sowie die<br>charakteristische Sprungtemperatur der Phasenumwandlung. [SKROBANEK]<br>[WEARENITINOL] [IAPT] .....  | 31  |
| Tabelle 4: Die Unterschiede der Werkstoffeigenschaften für Nickel, Titan und NiTi sind<br>übersichtlich zusammengefasst. Die Wärmeleitfähigkeit sowie die<br>Wärmekapazität sind als Materialwerte aufgeführt, um die Unterschiede der<br>Werkstoffe im Thermomanagement zu verdeutlichen. .... | 51  |
| Tabelle 5: Zusammenfassung der Systemtechnik sowie der Systemgrenzen.....   | 57  |
| Tabelle 6: Zusammenfassung des Standard-Parametersatzes. ....   | 58  |
| Tabelle 7: Die Tabelle stellt die Vorbelichtungsparameter übersichtlich da. ....  | 75  |
| Tabelle 8: Aufbauhöhen in einer übersichtlichen Zusammenfassung.....  | 99  |
| Tabelle 9: Neuer Parametersatz zur Erhöhung der Wärmemenge in der Platte. ....  | 100 |
| Tabelle 10: Zusammenfassung der gemessenen Werte für die Platte 104.2.....  | 102 |
| Tabelle 11: Zusammenfassung der Aufbauhöhen für Platte 113. ....  | 107 |
| Tabelle 12: Zusammenfassung der Aufbauhöhen für Platte 115. ....  | 107 |
| Tabelle 13: Zusammenfassung der Aufbauhöhen für Platte 107. ....  | 108 |
| Tabelle 14: Zusammenfassung der Aufbauhöhen der Platte 114. ....  | 110 |

## Abkürzungsverzeichnis

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>                 | <b>Deutsche Übersetzung</b> |
|------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| hdp              | hexagonal-dichteste Kugelpackung | -                           |
| kfz              | kubisch-flächenzentriert         | -                           |
| kp               | kubisch-primitiv                 | -                           |
| krz              | kubisch-raumzentriert            | -                           |
| LPA              | Laser-Pulver-Auftragschweißen    | -                           |
| mp               | monoklin-primitiv                | -                           |
| NiTi             | Nickel-Titan                     | -                           |

## Nomenklatur

| Symbol        | Bedeutung                   | Einheit                       |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|
| $E$           | Elastizitätsmodul           | $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ |
| $\Delta T$    | Temperaturänderung          | K                             |
| $\Delta V$    | Volumenänderung             | $\text{m}^3$                  |
| $V_0$         | Anfangsvolumen              | $\text{m}^3$                  |
| $\alpha$      | Wärmeausdehnungskoeffizient | $\frac{1}{\text{K}}$          |
| $\varepsilon$ | Dehnung                     | -                             |
| $\sigma$      | Spannung                    | $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ |

## 1 Motivation und Einleitung

Eine kurze Einordnung des Prozess und der Anwendungsbereiche sowie Motivation zur Erstellung der Arbeit sollen dem Leser im folgenden Abschnitt vermittelt werden. Im weiteren soll der rote Faden durch die Erklärung der Vorgehensweise und Zielsetzung ersichtlich werden.

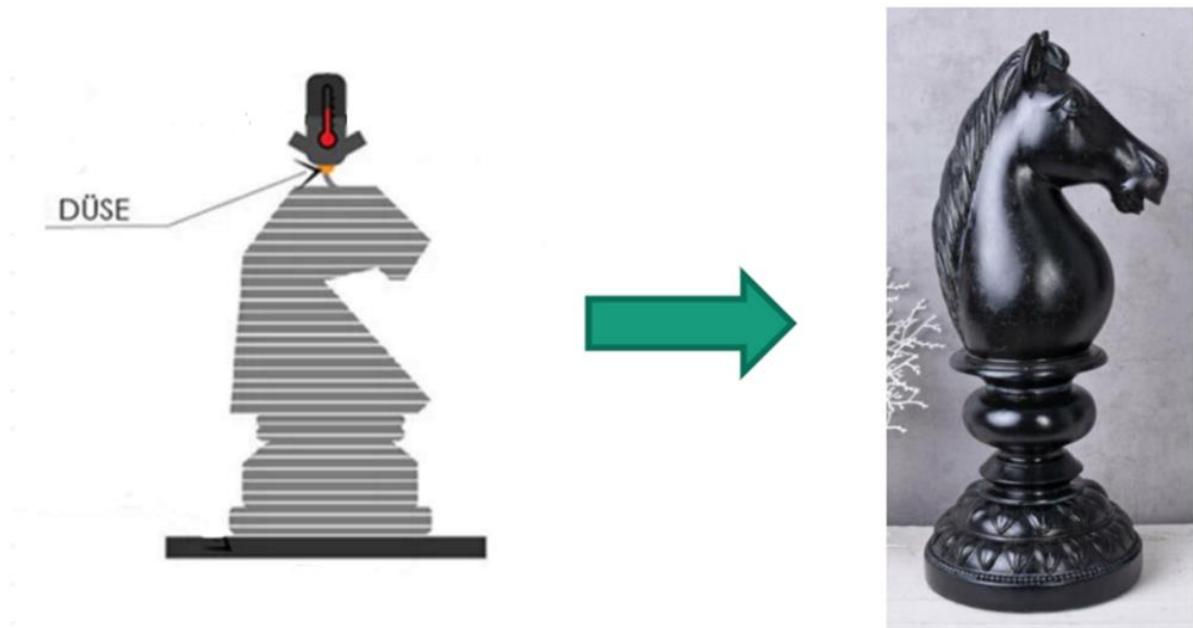
### 1.1 Das Laser-Pulver-Auftragschweißen im gesellschaftlichen Kontext

Die fortschreitenden Innovationen in der Technik eröffnen der Industrie neue Produktionstechniken. Ein Wechsel der Arbeitsweisen und Produktionsverfahren ist nicht nur erwünscht, sondern notwendig, um im wirtschaftlichen Wettbewerb konkurrieren zu können.

Das Laser-Pulver-Auftragschweißen bietet dieses Innovationspotenzial, sodass im Anwendungsfall ein Bauteil durch das Laser-Pulver-Auftragschweißen (abgek. LPA) schneller hergestellt werden kann oder das Herstellungsverfahren ändert sich derart, dass komplexe Bauteile mit deutlich weniger Aufwand und damit wirtschaftlicher produziert werden können.

Durch das LPA werden Bauteile Schicht für Schicht aufgebaut.

Das Prinzip des schichtweisen Materialauftrags ist in der Abbildung 1 anhand eines Modells einer Springer-Schachfigur, zu erkennen.



**Abbildung 1:** Links ist das 2-dimensionale Schichtsystem zum Aufbau der rechts dargestellten 3-dimensionalen Figur zu sehen.

Bauteile unterliegen oft einer Vielzahl von Bearbeitungsschritten nach ihrer Herstellung. Besonders Bauteile die subtraktiv Hergestellt werden, müssen im Anschluss oft noch weiterbearbeitet werden.

Die Produktivität kann gesteigert werden, wenn sie aus Ihrem Herstellungsprozess heraus die nötigen Endmaße besäßen und die Nachbearbeitungsschritte wegfielen.

Diese so genannten endkonturnahen Bauteile können mit dem LPA erzeugt werden. Sie haben nach der Fertigung Maße, die nicht oder nur relativ gering von den Endmaßen abweichen. Dadurch wird der

Verschnitt reduziert und von Materialersparnis über Zeitersparnis bis hin zur besseren Energieeffizienz sind Vorteile zu erkennen.

Ökologische sowie ökonomische Gesichtspunkte sind in diesem Zusammenhang bedeutsam. Nicht nur die Materialersparnis verbessert die ökologisch-ökonomische Bilanz, sondern ebenfalls die gezielte Energieaufwendung, durch den Laserfokus.

Die Suche nach umweltschonenden Verfahren wächst mit zunehmendem Umweltbewusstsein in der Gesellschaft. Aufgrund dessen hat die europäische Union seit September 2017 Restriktionen für besonders aggressive Chemikalien (beispielsweise Chrom 6) beim Galvanisieren beschlossen. Damit gewinnt die Beschichtung, die mittels LPA ebenfalls möglich ist, an Wichtigkeit im ökologischen, gesellschaftlichen Kontext.

Am Fraunhofer Institut für Lasertechnik wurde 2018 ein Verfahren vorgestellt, dass für das Beschichten die Vorschubgeschwindigkeit deutlich erhöht und damit das Verfahren, vor dem Hintergrund der Einschränkungen, attraktiver macht als das konkurrierende Galvanisieren im Tauchbad. Statt ein Becken mit mehreren hundert Litern aggressiver Chemikalien zu füllen, können verschleiß- und korrosionsfeste Werkstoffe durch das LPA direkt aufgetragen werden.

Es ist ersichtlich wie das Laser-Pulver-Auftragschweißen die Wirtschaftlichkeit und den Umweltschutz verbindet.

Diese und weitere Gesichtspunkte sind in der Abbildung 2 zusammengefasst.



**Abbildung 2: Der Einfluss des Laser-Auftragsschweißens auf verschiedene gesellschaftliche Bereiche.**

Die Möglichkeiten des Verfahrens sind vielfältig. Es können Reinelemente aber auch Legierungen aufgetragen werden.

Um das Potential des Laser-Pulver-Auftragsschweißens auszuschöpfen ist es vorteilhaft das Verfahren mit dem Auftrag von Legierungen zu koppeln, deren Eigenschaften außergewöhnlich sind.

Eine solche Legierung ist die Formgedächtnislegierung aus Nickel-Titan (NiTi). Ihre besondere Eigenschaft, plastische Verformung über den Wärmeeintrag umzukehren, bietet viele Vorteile und Anwendungsmöglichkeiten.

Ein Anwendungsfall ist die Möglichkeit superelastische Dichtflächen herzustellen. Dichtflächen, die eine hohe reversible Verformbarkeit (bis zu 10 %) und gleichzeitig hohe Festigkeit besitzen, können mit dem LPA flächig, linienförmig oder punktuell aufgetragen werden.

Beschichtungen sowie dünnwandige Elemente sind automatisiert und damit schnell und kostengünstig herstellbar.

Insbesondere die niedrigen Kosten sind hervorzuheben, da die verwendeten Werkstoffe wie Nickel und Titan vergleichsweise kostenintensiv sind. Die Kosten des Verfahrens müssen insgesamt reduziert sein um eine Wirtschaftlichkeit sicherzustellen. Der Auftrag von NiTi-Legierungen mittels LPA trägt dazu bei.

## **1.2 Vorgehensweise und Zielsetzung**

In der folgenden Abschlussarbeit soll eine Optimierung eines LPA-Prozesses mit einer Nickel-Titan-Legierung stattfinden.

Es sollen verschiedene Prozessparameter und besonders der Einfluss von Wärmeenergie für den Prozess untersucht werden. Das Ziel ist es den Auftrag von Nickel-Titan, im Hinblick auf die Erzeugung von superelastischen Dichtflächen mit dem LPA, in eine wirtschaftliche Nähe zu rücken und die Prozessvorgänge zu kontrollieren.

Dazu sollen Versuche mit Variationen im Thermomanagement von Proben stattfinden.

Im ersten Schritt werden die physikalischen Hintergründe zur Versagensstruktur erläutert sowie die Nachweisbarkeit der Materialdefekte analysiert. Die Erkenntnisse sollen dazu genutzt werden systematisch Versuchsreihen auszulegen.

Im Hinblick auf die Verwendung der gewonnenen Erkenntnisse zur Herstellung von metallischen Dichtflächen wird im weiteren Verlauf Anforderungen an metallische Dichtflächen aufgestellt. Aus diesen können Zielkriterien abgeleitet werden die für die Bewertung der Ergebnisse relevant sind.

Die Untersuchung der Erfüllung der Zielkriterien soll eine Aussage über eine stabile Prozessstrategie und der Eignung zum Einsatz als Dichtflächen ermöglichen.

Um dem Leser die Sachverhalte zu vermitteln wird zusätzlich die verwendete Systemtechnik, eingesetzte Materialien sowie die Formgedächtnis-Effekte erläutert.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

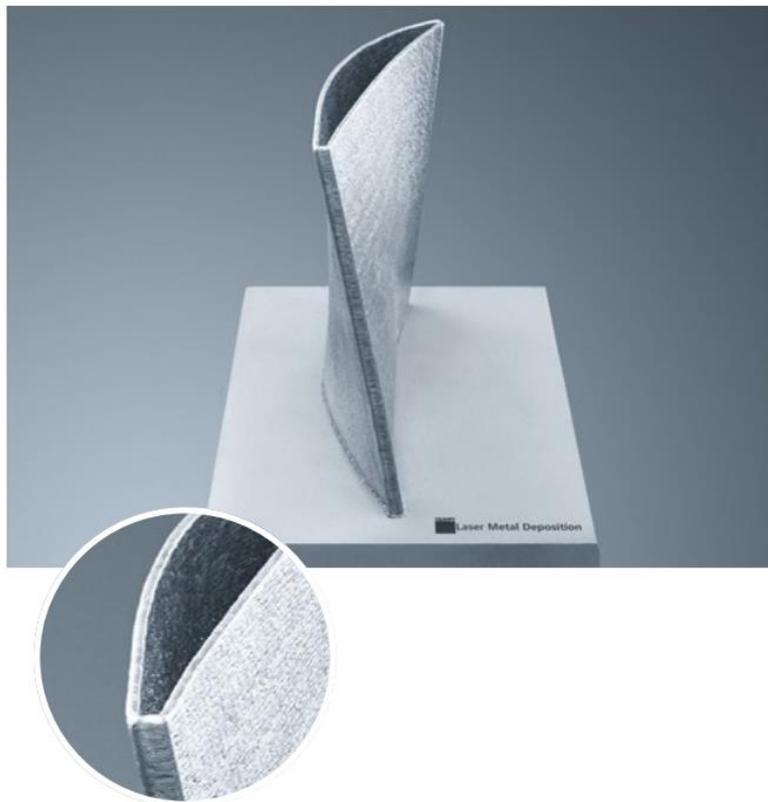
Der Fokus der Abschlussarbeit liegt auf den Materialauftrag einer Nickel-Titan-Legierung auf einem Titan-Untergrund. Im Gesamtkontext soll dabei eine metallische Dichtung mit besonderen physikalischen Eigenschaften resultieren. Im folgenden Abschnitt soll dafür der Kenntnisstand über den Prozess, die verwendeten Werkstoffe und metallische Dichtungen im Allgemeinen untersucht werden.

### 2.1 Technische Erläuterungen zum Laser-Pulver-Auftragsschweißen

Kategorisierung und Anwendung:

Das Laser-Pulver-Auftragsschweißen gehört, mit seinen aufeinander aufbauenden Materialschichten, zu den additiven Fertigungsverfahren. Das Verfahren wird vorwiegend zum Erzeugen von Bauteilen und Strukturen angewendet.

In der Abbildung 3 sieht man die Anwendung des Laser-Pulver-Auftragsschweißen zur Erzeugung von metallischen Strukturen. [LEANDER]



**Abbildung 3:** Erzeugung von gekrümmten Strukturen in Schichtbauweise mithilfe des Laser-Pulver-Auftragsschweißen. [TRUMPF]

Alternative Anwendungen:

Das Laser-Pulver-Auftragsschweißen kann zusätzlich zur Erzeugung von Bauteilen auch als Beschichtungsverfahren eingesetzt werden. Beispielsweise kann ein Verschleiß- und Korrosionsschutz flächig aufgetragen werden.

In Abbildung 4 ist der Auftrag einer Beschichtung auf einer Welle zu sehen. [GEBHARDT]



**Abbildung 4: Erzeugung einer umlaufenden Beschichtung auf einer sich drehenden Welle. [HÄFNER]**

Darüberhinaus kann das LPA ebenfalls als Reparaturverfahren, zum präzisen Auffüllen von lokalen Schadstellen, genutzt werden. Abgeriebenes oder abgeplatztes Material z.B. an Turbinenschaufeln wird mit dem Laser-Pulver-Auftragsschweißen aufgefüllt. [HÄFNER]

Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt die veränderte Geometrie einer Turbinenschaufel.



**Abbildung 5: Wiederhergestellte Vorderkante einer Turbinenschaufel mithilfe des Laser-Pulver-Auftragsschweißens. [TRUMPF]**

Durch Reibung mit Partikeln in der Atmosphäre hat sich die Querschnittsgeometrie verändert. Leistungs- und Effizienzverluste sind die Folge. Mit dem Laser-Pulver-Auftragsschweißen wurde das fehlende Material und die gewünschte Vorderkante der Schaufel wieder aufgebaut. In einem Nachbearbeitungsschritt wird das Material in die gewünschte Geometrie geschliffen. [HÄFNER]

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die örtliche Verstärkung von Bauteilen. Es ist möglich unterdimensionierte Bauteile zu verstärken, sodass ein Versagen unter Lasteinwirkung verhindert wird. Versteifungen zum Verhindern von zu großen Dehnungen oder gegen das Ausbeulen eines Bauteils sind ebenfalls möglich und in der Abbildung 6 zu erkennen. [KLB]



**Abbildung 6: Lokale Materialverstärkungen gegen das Ausbeulen eines Bauteils. [KLB]**

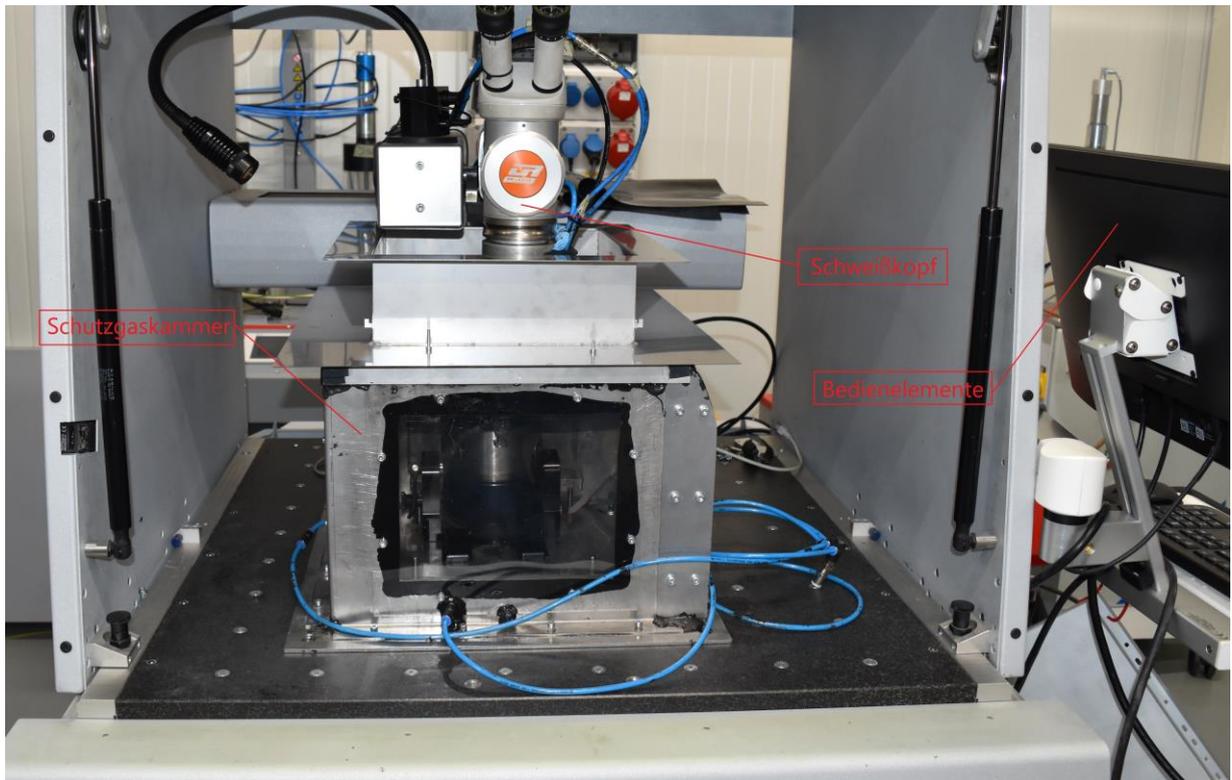
Zielsetzung:

Das Laser-Pulver-Auftragsschweißen beabsichtigt, sphärische Pulverkugeln und die oberste Schicht eines Bauteils aufzuschmelzen. Die notwendige thermische Energie wird dabei von einem Laser erzeugt. [LEANDER] [GEBHARDT]

Dadurch entsteht auf dem Bauteil ein sogenanntes Schmelzbad. Das Schmelzbad besteht aus der Mischung des aufgeschmolzenem Grundmaterials des Bauteils (auch Substrat genannt) und dem Werkstoff der Pulverkugeln. Die Abbildung 11 zeigt das Schmelzbad in einer Prinzipdarstellung. Nach dem Abkühlen und Erhärten bilden die Werkstoffe einen festen Stoffschluss. [LEANDER] [GEBHARDT]

Prozessverlauf:

Der übersichtshalber sind die Hauptkomponenten der Systemtechnik in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7:** Die Abbildung zeigt die verwendete Systemtechnik.

Im Zentrum des Verfahrens steht der Schweißkopf mit allen, für das Verfahren notwendigen, technischen Aufbauten. Er vereint ein Fördersystem für das Pulver, den Laser zur Wärmeerzeugung sowie ein System zur Herstellung einer Schutzgasatmosphäre.

Die folgende Abbildung 8 zeigt den Schweißkopf des verwendeten Lasers. [LEANDER]

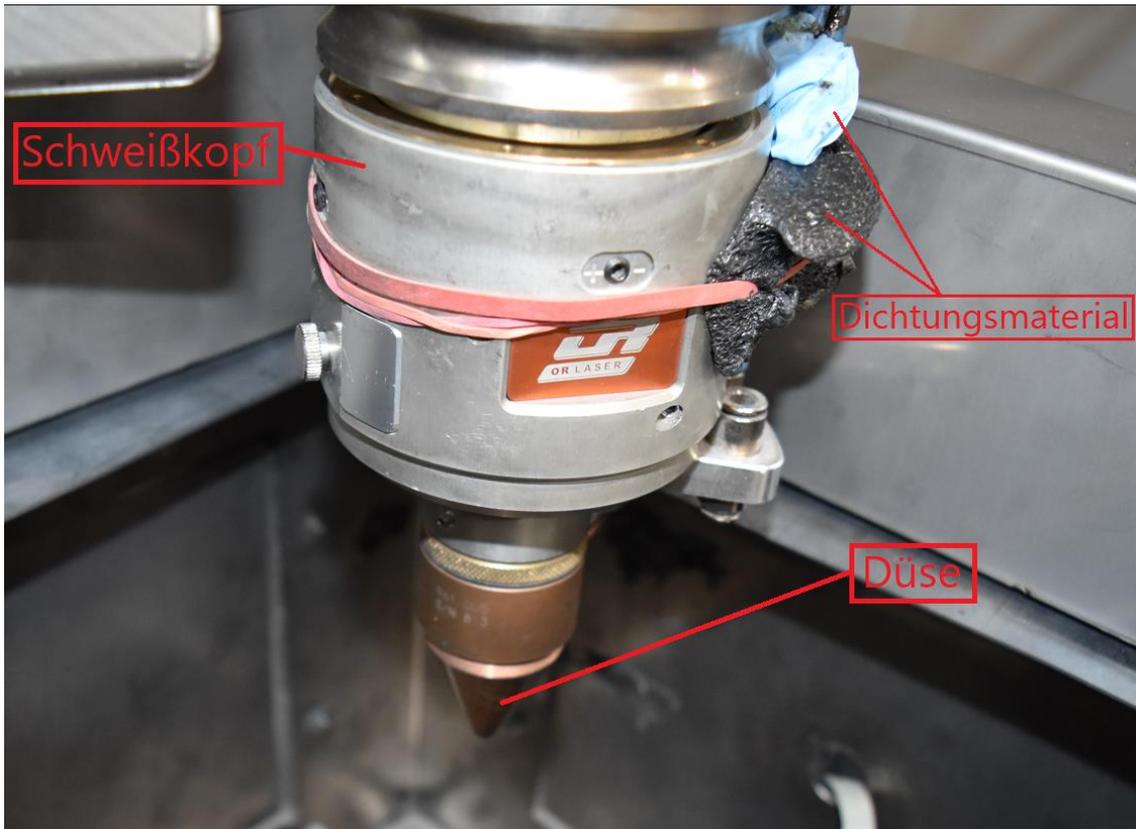


Abbildung 8: Dargestellt ist der Schweißkopf innerhalb der Schutzgaskammer.

Im Ausgangszustand befindet sich das Pulver in einem Behälter im Pulverförderer. Er ist in Abbildung 9 zu sehen.

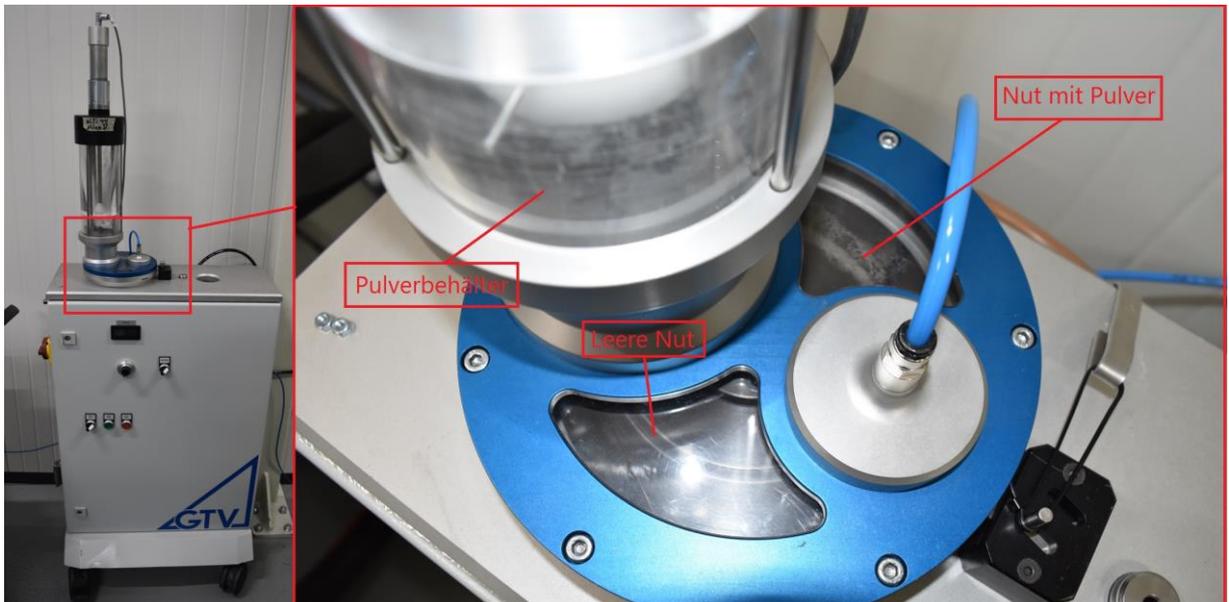
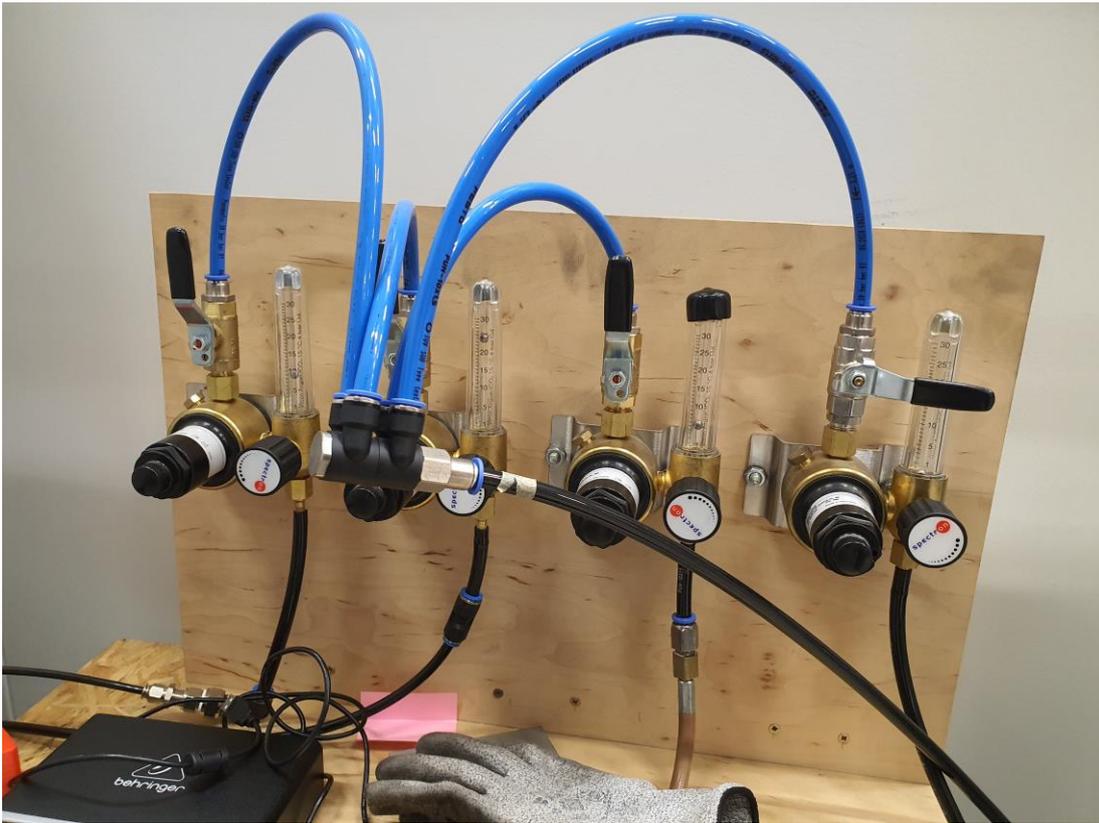


Abbildung 9: Zu erkennen sind der Pulverförderer (links) und der Pulverbehälter sowie der Auffangteller mit Nut (rechts). Das Pulver fällt durch den Behälter auf die Nut des Tellers. Am Absaugpunkt wird das Pulver aus der Nut gesaugt und weiter befördert. Dazu wird, durch den Aufbau von Gasdruck, ein sogenanntes Trägergas aus Helium oder Argon bewegt. [GEBHARDT] [LEANDER]

Abbildung 10 zeigt die Regelventile für das im Rahmen der Abschlussarbeit benutzte Argongas.



**Abbildung 10:** Dargestellt sind (von links nach rechts) die Regelventile für das Schutzgas der Düse, das Schutzgas der Kammer und das Trägergas des Pulvers.

Das Trägergas soll die Pulverpartikeln vom Pulverförderer zum Schweißkopf transportieren. Zusätzlich wird ein weiteres Gas als Schutzgas eingesetzt (die Verwendung des gleichen Gases für beide Funktionen ist ebenfalls möglich). [GEBHARDT]

Die Namensgebung des Schutzgases ist auf die Funktion zurückzuführen. Das Schutzgas soll die flüssige Schmelze vor chemischen Reaktionen mit den Atmosphärgasen schützen. Da unter Temperatureinwirkung chemische Reaktionen beschleunigt verlaufen muss die Schmelze vor Oxidation und chemischer Verunreinigung geschützt werden. [LEANDER]

Um die Schutzgasatmosphäre zu erhalten wird eine Kammer aus Stahlblechen genutzt. Die Kammer wird durch Kunststoffelemente abgedichtet und es befinden sich Bohrungen für die Leitungen des Gases an den Kammerwänden.

Es entsteht im Prozessverlauf ein Massenstrom, der das Pulver aus dem Behälter fördert. Das Gemisch aus Pulver und Schutzgas wird über Leitungen zum Schweißkopf befördert. Am Austritt bündelt eine Pulverdüse das Gemisch auf den Brennpunkt des Lasers. [LEANDER]

Eine Prinzipdarstellung des Prozessverlaufs ist in Abbildung 11 zu sehen.

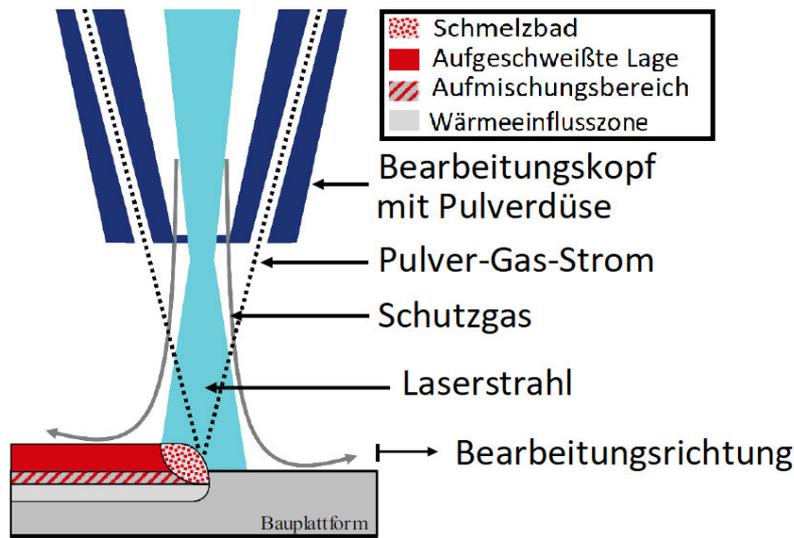


Abbildung 11: Prinzipdarstellung des Schweißkopfs und einer Substrat-Platte. In Anlehnung an [LEANDER].

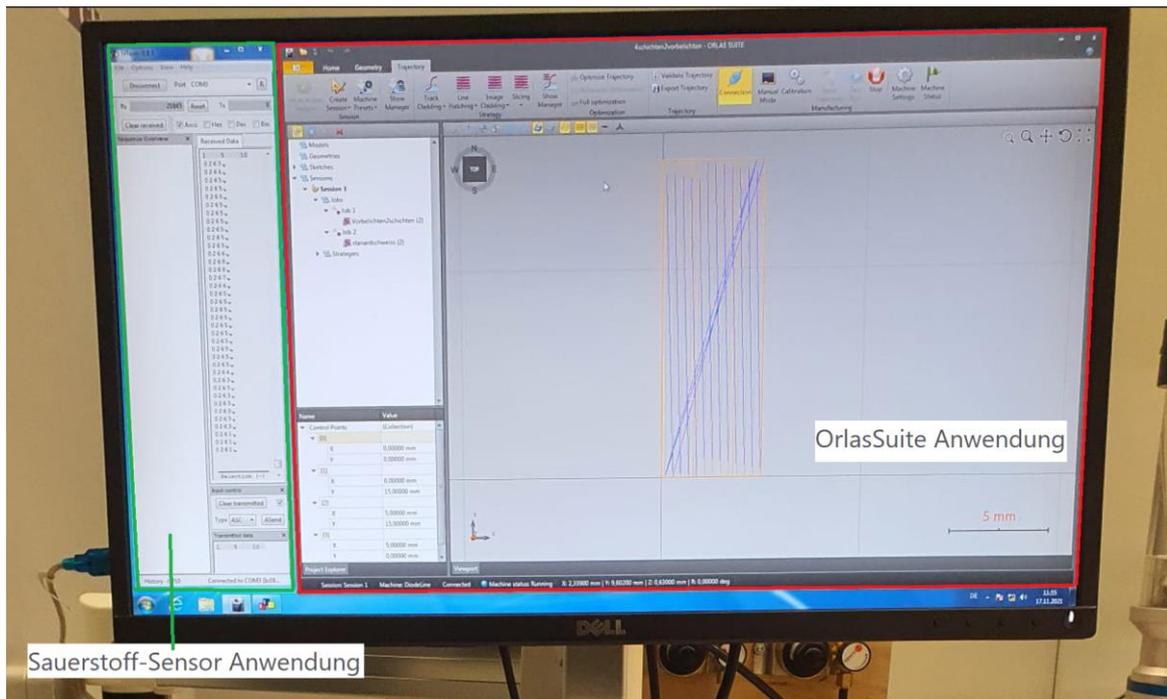
Die Intensität des Lichts ist ausreichend um Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes der in der Industrie üblichen Metalle zu erreichen. Metalle die verwendet werden können sind z.B. schweißbare Stähle, Eisen-Legierungen, Nickel-Legierungen, Aluminium-Legierungen, Cobalt-Legierungen und Titan-Legierungen. [LEANDER]

Durch die flüssige Metallschmelze im Schmelzbad besteht die Möglichkeit einer Vermischung unterschiedlicher chemischer Elemente. Dadurch resultiert die Möglichkeit einer Legierungsbildung bzw. einer Bildung von intermetallischer Phasen. [CZICHOS]

Nach dem Erstarren sind die Werkstoffe fest über einen Stoffschluss verbunden. Im weiteren Verlauf kann der Vorgang wiederholt und eine weitere Schicht aufgetragen werden. [LEANDER]

Die Schweißformen und Schweißparameter werden über eine Software eingegeben.

Abbildung 12 zeigt die Eingabemaske der verwendeten Computer-Anwendung.



**Abbildung 12:** Dargestellt ist die Bedieneroberfläche des Programms Orlas Suite (rot) zur Bedienung des Lasers. Es ist eine orange, rechteckige Geometrie zu erkennen. Sie entspricht der Bewegung des Lasers während des Schweißens.

Zur Eingabe der Geometrien wird im Hauptprogramm Orlas Suite ein CAD-Tool verwendet. Im CAD-Tool kann eine Zeichenfläche auf einer planaren Ebene erzeugt werden. Die gezeichneten Strukturen entsprechen dem Verfahrensweg des Schweißkopfes. Im Anschluss an die Erzeugung der Geometrie werden im Hauptprogramm die Schweißparameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Laserleistung oder Schichtstärke definiert.

Im weiteren Verlauf wird über eine berührungsempfindliche Anzeige (Touchscreen) der Laserfokus eingestellt, dargestellt in Abbildung 13.



Abbildung 13: In der Abbildung ist das sekundäre Bedienelement für den Laserparameter Laserfokus zu sehen. Durch Drehbewegungen wird der Laserdurchmesser eingestellt.

## 2.2 Die Eigenschaften der Werkstoffe

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften der Werkstoffe erläutert. Die in dieser Abschlussarbeit relevanten Werkstoffe sind Nickel und Titan sowie ihre Verbindung als Nickel-Titan-Legierung (abgek. NiTi bzw. Nitinol).

### 2.2.1 Legierungsbestandteil Nickel

#### Äußerliche Merkmale:

Das silbrig, glänzende Erscheinungsbild Nickels ist in der Abbildung 14 dargestellt.



**Abbildung 14:** Nickel als Kubus (links) und in Knollenform (rechts). Die Knollenform wurde hergestellt durch Elektrolyse. [PNIOK]

#### Vorkommen:

In seiner natürlichen Form, als Mineral z.B. Pentlandit oder als Garnierit, ist Nickel in tropischen Regionen oder in Kanada vorzufinden. Mit einem Anteil von 0,02 % in der Silikatkruste der Erde gehört es zu den 85 Elementen die zusammen nur 5,8 % des Gewichtsanteil der Erdkruste ausmachen. Seine Häufigkeit in der Silikatkruste ist also relativ gering und deutlich geringer als die Häufigkeit von Titan. [WEIßBACH]

#### Gewinnung:

Hergestellt wird Nickel meistens aus sulfidischen Erzen wie Pentlandit. Durch Röst- und Reduktionsprozesse werden Begleitelemente vom Nickel getrennt. Der relativ hohe Preis von Nickel entsteht u.a. durch das komplizierte Herstellungsverfahren. [WEIßBACH]

#### Anwendung:

Nickel in seiner Reinform wird selten technisch verwendet. Als Legierungskomponente verstärkt es Stahl oder verbessert Korrosions- und Hitzebeständigkeiten von Legierungspartnern wie Stahl. Der Einsatz als Werkstoff für Turbinenschaufeln hat sich bewährt aufgrund des hohen Schmelzpunktes und der guten mechanischen Eigenschaften unter Temperatureinfluss. [WEIßBACH]

Physikalische Eigenschaften:

Das kubisch-flächenzentrierte Gitter des Nickels ist konstant und ändert sich mit dem Anstieg der Temperatur nicht. Der Schmelzpunkt von reinem Nickel ist mit 1453°C relativ hoch, für handelsübliches Nickel beträgt er ca. 1440°C. [WEIßBACH]

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind einige wichtige physikalische Eigenschaften zusammengefasst.

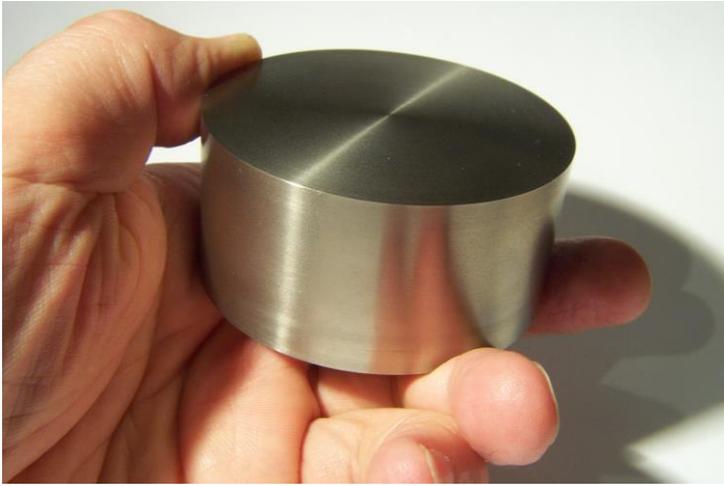
Tabelle 1: Physikalische Eigenschaften von Nickel. [WEIßBACH] [CZICHOS]

| Eigenschaft                 | Wert               | Einheit                                     |
|-----------------------------|--------------------|---|
| Dichte                      | 8,908              | $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$              |
| Schmelzpunkt                | 1453 bzw. 1728     | °C bzw. K                                   |
| E-Modul                     | 115000             | MPa   |
| Spez. Wärmekapazität        | 444                | $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ |
| Wärmeleitfähigkeit          | 86                 | $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  |
| Wärmeausdehnungskoeffizient | $13 \cdot 10^{-6}$ | $\frac{1}{\text{K}}$ (bei 20°C)             |

## 2.2.2 Legierungsbestandteil Titan

### Äußerliche Merkmale:

Titan glänzt in seiner Reinform matt und ist metallisch silbrig, wie in Abbildung 15 erkennbar ist.



**Abbildung 15: Abgebildet ist reines Titan in Zylinderform. [PNIOK]**

### Vorkommen:

Titan ist das vierthäufigste Metall der Erde. Als Erz in natürlicher Form liegt es als Rutil, Anastas oder Ilmenit vor. Länder mit natürlichem Vorkommen sind die USA, Kanada, Australien, Skandinavien und Malaysia. [ROOS]

### Gewinnung:

Zu Beginn der Titan Erzeugung wird das Erz zu Pulver zermahlen und anschließend mit Wasser vermengt. Durch das leichte Gewicht kann im ersten Schritt das Titanoxid von Begleitstoffen getrennt werden. Durch das Einschmelzen im Hochofen sowie die Zugabe von weiteren Elementen in Verbindung mit verschiedenen Wärmebehandlungen entsteht Reintitan mit einem Anteil von über 99,2 %. [WEIßBACH]

### Anwendung:

Titan in seiner Reinform wird für seine Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität geschätzt. Die meisten Anwendungsgebiete haben einen entsprechenden Bezug dahingehend z.B. als Komponenten von Meerwasserentsalzungsanlagen oder als Implantate im menschlichen Körper. [WEIßBACH]

### Physikalische Eigenschaften:

In seiner Reinform hat Titan 2 verschiedene Gittertypen. Sein Umwandlungspunkt liegt bei 882° C. Unterhalb dieser Temperatur hat es eine hexagonal-dichteste Kugelpackung (hdp), auch  $\alpha$ -Titan genannt, und oberhalb der Temperatur liegt es kubisch-raumzentriert (krz) vor, man spricht von  $\beta$ -Titan. [CZICHOS]

Ausgewählte mechanische sowie physikalische Eigenschaften von  $\alpha$ -Titan sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften von  $\alpha$ -Titan. [WEIßBACH] [ROOS]

| Eigenschaft                 | Wert                | Einheit  |
|-----------------------------|---------------------|--|
| Dichte                      | 4,5                 | $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$                   |
| Schmelzpunkt                | 1670 bzw. 1943      | $^{\circ}\text{C}$ bzw. K                        |
| E-Modul                     | 110000              | MPa  |
| Spez. Wärmekapazität        | 523                 | $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$      |
| Wärmeleitfähigkeit          | 22                  | $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$       |
| Wärmeausdehnungskoeffizient | $8,6 \cdot 10^{-6}$ | $\frac{1}{\text{K}}$ (bei $20^{\circ}\text{C}$ ) |

### 2.2.3 Nickel-Titan-Legierung bzw. Nitinol

#### Allgemeines:

Nitinol ist eine Legierung aus den oben erwähnten Werkstoffen Nickel und Titan und damit eine Formgedächtnislegierung mit besonderen physikalischen Eigenschaften.

Nitinol ist ein Markenname und bezeichnet eine Legierung mit 44-Gewichtsprozent Nickel zu 56 Gewichtsprozent Titan. Das von uns verwendete Pulver hat eine Zusammensetzung von 44,1296069-Gewichtsprozent Nickel zu 55,8703931 Gewichtsprozent Titan. [IAPT]

#### Äußerliche Merkmale:

Wie die Komponenten, aus denen die Legierung besteht, hat Nitinol ein metallisches, dunkel-silbriges Erscheinungsbild.

Abbildung 16 zeigt das Pulver im Behälter.



**Abbildung 16:** Das verwendete Nickel-Titan-Pulver im Aufbewahrungsbehälter.

#### Gewinnung:

Nitinol wird in Pulverform aus der Mischung von Nickel- und Titanpulver hergestellt oder vorlegiert und zu Pulver zermahlen.

#### Anwendung:

Nitinol wird vorwiegend in der Medizintechnik verwendet. Es werden beispielsweise Stents für den Blutkreislauf hergestellt. Eine weitere Anwendungsbeispiel sind Aktoren für Hebeseysteme. [LANGBEIN]

Physikalische Eigenschaften:

Die wichtigsten Materialwerte sind in der folgenden Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Dargestellt sind wichtige Materialeigenschaften für Nickel-Titan sowie die charakteristische Sprungtemperatur der Phasenumwandlung. [SKROBANEK] [WEARENITINOL] [IAPT]

| Eigenschaften   | Wert           | Einheit                                 |
|---|----------------|---|
| Dichte  | 6,5            | $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$          |
| Schmelzpunkt  | 1310 bzw. 1583 | °C bzw. K                               |
| E-Modul   | 41000 – 75000  | Mpa                                     |
| Spez. Wärmekapazität  | 450            | $\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}}$ |
| Wärmeleitfähigkeit  | 18             | $\frac{\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$  |
| Wärmeausdehnungskoeffizient                                     | 11·10-6        | $\frac{1}{\text{K}}$ (bei 20°C)         |
| Sprungtemperatur<br>(unterhalb Martensit,<br>oberhalb Austenit) | -16            | °C                                      |

Das Zustandsdiagramm

Die folgende Abbildung 17 zeigt das Phasendiagramm der Legierungspartner Nickel und Titan.

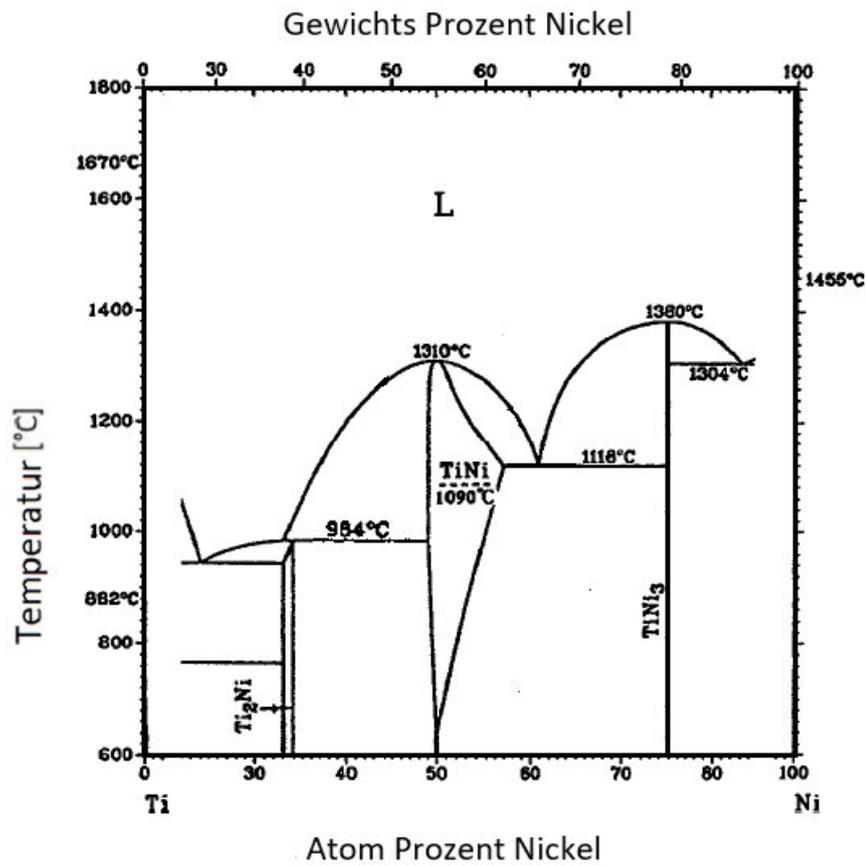


Abbildung 17: Abgebildet ist das Ni-Ti-Phasendiagramm. [KAACK]

### 2.3 Metallische Dichtflächen und ihre Anforderungen

#### Technische Erläuterungen zu metallischen Dichtflächen

In der Regel werden Kunststoff-Dichtungen gegenüber metallischen Dichtungen bevorzugt eingesetzt. Sie sind oftmals günstiger und haben eine bessere Dichtwirkung sowie Verformbarkeit bzw. Passgenauigkeit. Metallische Dichtungen werden verwendet, wenn Dichtungen aus Kunststoff, aufgrund von Betriebsbedingungen, nicht verwendet werden können. [KOEHLER] [ROLOFF]

Anwendungsbeispiele in denen Kunststoff-Dichtungen nicht verwendet werden können sind z.B. an Montageorten an denen Temperaturen oberhalb des Schmelzpunktes von Kunststoff auftreten oder wenn ein entsprechend hoher Anpressdruck herrscht. [KOEHLER]

#### Anwendungsfälle von metallischen Dichtflächen

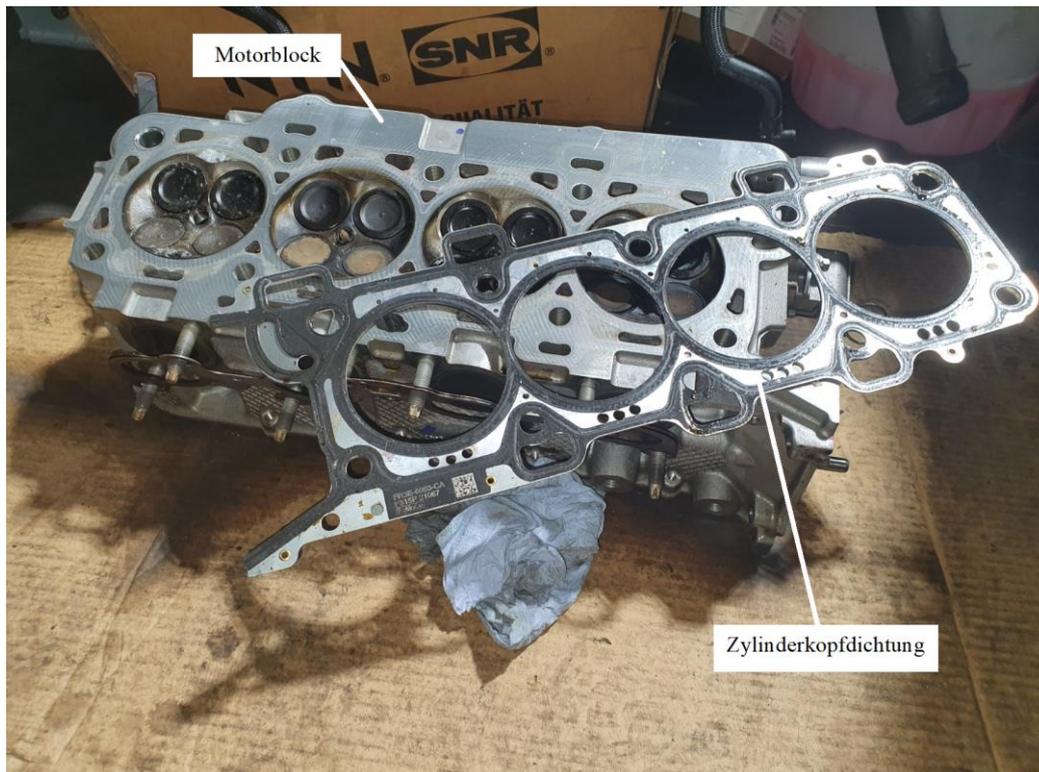
Metallische Dichtflächen werden beispielsweise in Ringform genutzt um Schraubverbindungen, durch das Nutzen eines weicheren, verformbaren Metalls, abzudichten wie z.B. eine Kupferdichtung in Verbindung mit einer Stahlschraube an der Ölwanne eines Kraftfahrzeugs. Es handelt sich dabei um einen Kraftschluss. Nachfolgend abgebildet in Abbildung 18 ist eine Ölablassschraube mit entsprechender Dichtung. [ROLOFF]



**Abbildung 18: Ölablassschraube mit Kupferdichtung in Ringform.**

Eine Kunststoff-Dichtung kann aufgrund der hohen Temperaturen und des Anpressdrucks nicht verwendet werden. [ROLOFF]

Eine weitere Anwendung ist der Zylinderkopf eines Verbrennungsmotors. Abbildung 19 zeigt eine Zylinderkopfdichtung vor der Montage. [KOEHLER]



**Abbildung 19: Zylinderkopfdichtung vor der Montage auf einen Motorblock. [SCHREINER]**

Die Dichtfläche trennt Flüssigkeiten wie Kühlwasser und Motoröl sowie das Verbrennungsgas voneinander und funktioniert, aufgrund des hohen Anpressdrucks, für unterschiedliche Aggregatzustände. Aufgrund der hohen Temperaturen und des hohen Drucks während der Zündung des Gasgemischs ist auch in diesem Fall eine metallische Dichtung nötig. [KOEHLER] [ROLOFF]

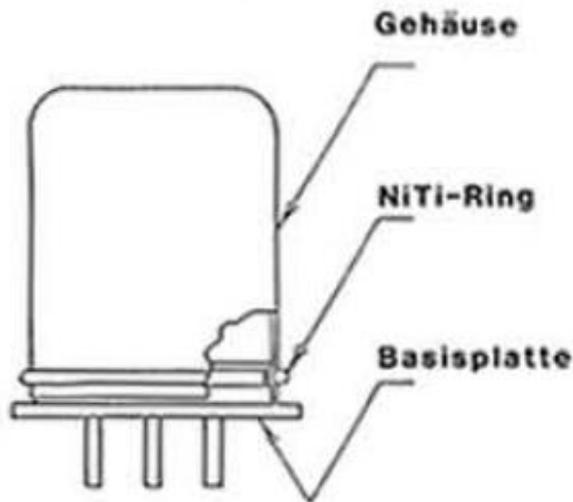
#### Dichtflächen aus Nickel-Titan:

Dichtelemente aus Nickel-Titan nutzen die reversible Dehnbarkeit von Formgedächtnislegierungen sowie die Rückverformung des Formgedächtnis-Effekts um einen Materialschluss zu erzeugen. [STOECKEL2]

Elemente, die dieses Prinzip nutzen sind beispielsweise Schrumpfringe. Sie werden gedehnt, auf eine Welle montiert und erwärmt. Im Zuge der Erwärmung verkleinert sich der Durchmesser aufgrund des Formgedächtnis-Effekts. Es entsteht Kontakt zwischen der Welle und dem Schrumpfring. [STOECKEL2]

Der gleiche Effekt wird von ringförmigen Nitinol-Dichtungen genutzt. Im Zuge einer Durchmesserengung wird beispielsweise eine Gaskammer abgedichtet.

Das Gehäuse wird durch den NiTi-Ring an eine Basisplatte gedrückt, dargestellt in der Abbildung 20.



**Abbildung 20:** Abgebildet ist das Gehäuse eines zylinderförmigen Gasbehälters. [STOECKEL2]

Dichtflächen aus Nitinol zeichnen sich durch ihre hervorragende Dichtwirkung aus. Im Zuge des Kontaktschlusses werden sehr hohe Anpressdrücke erreicht. Der Leckverlust ist relativ gering. [STOECKEL2]

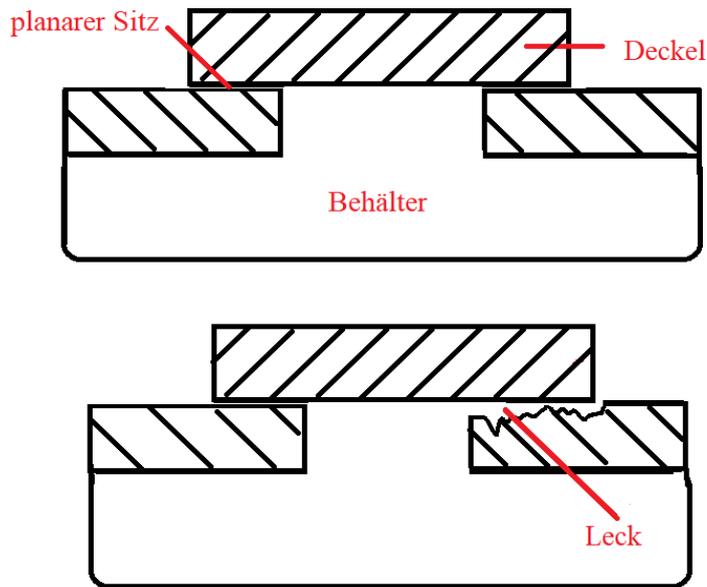
#### Anforderungen an metallische Dichtflächen

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass der Dichtungseffekt, die Trennung von Medien, die wichtigste Anforderung an metallische Dichtungen ist. In diesem Zusammenhang darf ein Leckverlust entstehen. Er darf einen zulässigen Wert nicht übersteigen. [ROLOFF]

Der Dichtungseffekt ist die Grundfunktion aller Dichtungen und bildet somit ebenfalls die Hauptanforderung an metallische Dichtflächen. Im Zuge dessen ist gefordert, dass die Dichtflächen planar an den Auflageflächen sitzen. Ein Loslösen von der Auflagefläche kann zu einer Leckage führen. [ROLOFF]

Es wird abgeleitet, dass ein passgenauer Sitz zwischen den Dichtflächen gefordert wird. Ein fehlendes bündiges Schließen z.B. durch eine nicht-planare Auflagefläche muss innerhalb einer Leckage-Toleranz stattfinden. Eine weitere Anforderung ist somit ein bündiges Schließen zwischen den Dichtflächen.

Eine Prinzipdarstellung ist in Abbildung 21 zu erkennen. [ROLOFF]



**Abbildung 21:** Dargestellt ist ein Deckel und ein Behälter, die planar aufliegen (oben) sowie ein Behälter mit unebener Kontaktfläche (unten). Der Leckverlust ist im unteren Beispiel höher als bei planaren Kontaktflächen.

Neben der Dichtfunktion sind weitere Anforderungen, aus den üblichen Einsatzgebieten von metallischen Dichtungen, bekannt wie beispielsweise die Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen. Darüber hinaus darf die Dichtwirkung auch unter hohen Temperaturen nicht nachlassen. Es ist gefordert, dass zur Dichtwirkung zusätzlich eine Dichtwirkung unter hohen Temperaturen bestehen muss. [KOEHLER]

Eine weitere Anforderung ist die Belastbarkeit gegenüber hohen mechanischen Kräften. Die Zugfestigkeit von metallischen Dichtungen ist für viele Anwendungen ausschlaggebend. In einigen Anwendungsfällen kann es zu Verschiebungen zwischen Bauteilen mit Dichtflächen kommen. Es kann also ebenfalls gefordert sein, dass ein Dichtungseffekt unter hoher Dehnung bestehen muss. [KOEHLER]

Im Hinblick auf die Übersichtlichkeit wird auf der nachfolgenden Seite eine Zusammenfassung erstellt.

Zusammenfassung der Anforderungen:

1. Der Dichtungseffekt bzw. das Trennen von Stoffen innerhalb vorgegebener Grenzen (innerhalb tolerierbarer Leckverluste).
2. Das bündige Schließen zwischen den Dichtflächen bzw. ein Leckquerschnitt innerhalb der Toleranzgrenzen.
3. Die Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen. Kein Schmelzen oder plastische Verformung aufgrund von hohen Temperaturen.
4. Beständigkeit gegenüber hohen mechanischen Kräften bzw. eine ausreichend hohe Festigkeit. Keine plastische Verformung aufgrund von mechanischen Kräften.
5. Beständigkeit gegenüber hohen mechanischen Kräften und Temperatureinfluss. Keine plastische Verformung aufgrund einer Kombination von mechanischen Kräften und hohen Temperaturen.
5. Eine Dichtwirkung im geforderten Temperaturbereich.
6. Dichtungseffekt unter starker Dehnung bzw. Dichtungseffekt trotz geringer Formhaltigkeit.

Die Anforderungen 3 bis 6 werden weniger durch aktive Einflussnahme erfüllt sondern mehr über die Wahl des Werkstoffs und dessen Materialeigenschaften.

Im weiteren Verlauf sollen deshalb die Anforderungen 1 und 2 im Fokus der Arbeit stehen.

## 2.4 Die Formgedächtnis-Effekte und ihre physikalischen Hintergründe

### 2.4.1 Materialwissenschaftliche Grundlagen

Zum besseren Verständnis des Formgedächtniseffektes müssen Grundlagen der Materialwissenschaften erläutert werden. Es sollte bekannt sein, dass Metalle in Abhängigkeit von der Temperatur ihr Atomgittermodell ändern können. Beispielsweise kann eine kubisch-raumzentrierte Zelle (krz), mit abnehmender Temperatur, in eine kubisch-flächenzentrierte Zelle (kfz) umgewandelt werden. [WEIßBACH]

Die Gitterumwandlung ist veranschaulicht in Abbildung 22.

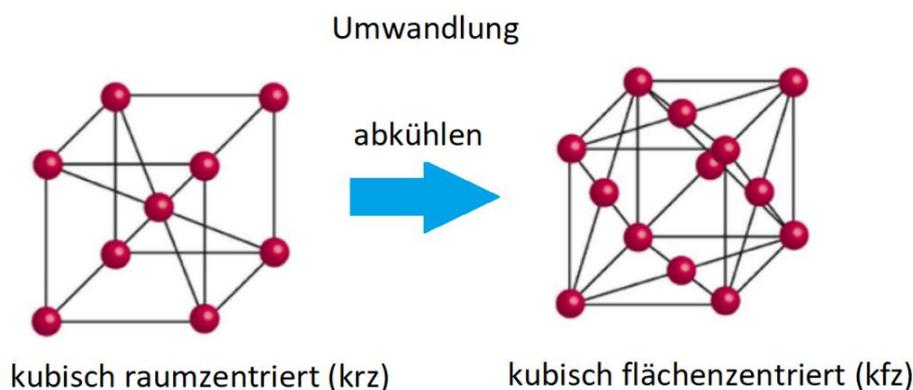


Abbildung 22: Dargestellt ist die Umwandlung einer kubisch raumzentrierten Elementarzelle (links) zu einer kubisch flächenzentrierten Zelle (rechts) aufgrund von Temperaturänderungen.

Die Gitterumwandlung der Atome bildet, als notwendige Bedingung, die Grundlage der Formgedächtnis-Effekte.

Sie kann durch Erwärmen rückgängig gemacht bzw. der Ausgangszustand wiederhergestellt werden, dargestellt in Abbildung 23. [WEIßBACH]

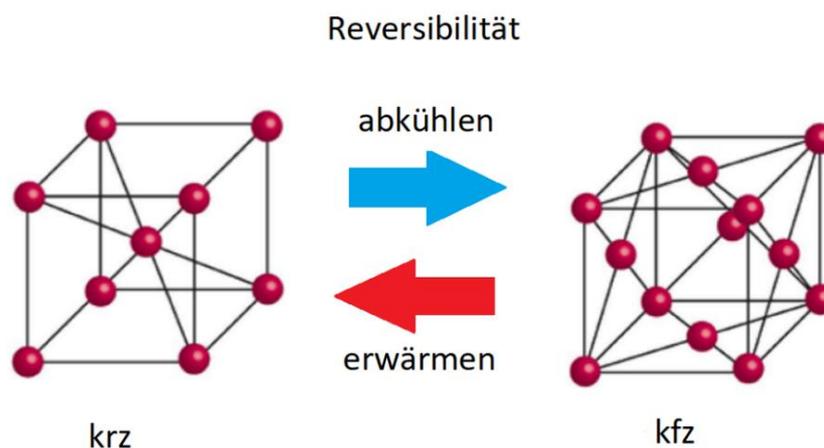
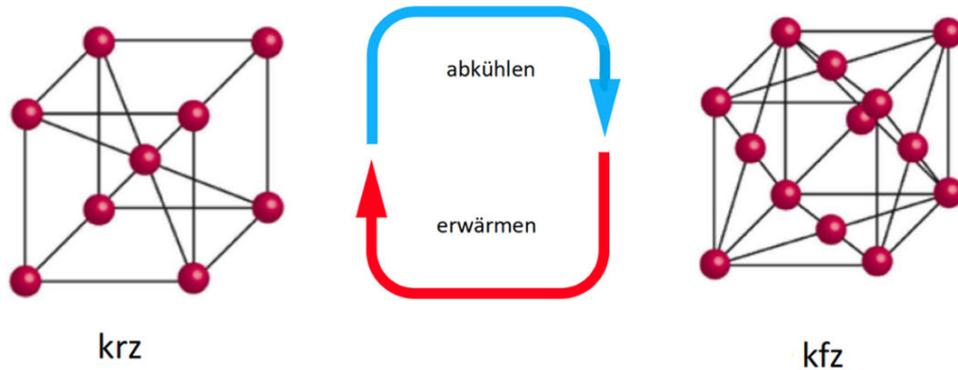


Abbildung 23: Zu sehen ist die Reversibilität der Gitterumformung durch das Erwärmen bzw. Abkühlen.

Durch das Erwärmen und der Rückumwandlung entsteht ein Zyklus und die Möglichkeit einer Mehrfachanwendung, wie es in Abbildung 24 dargestellt ist. [MERKEL]

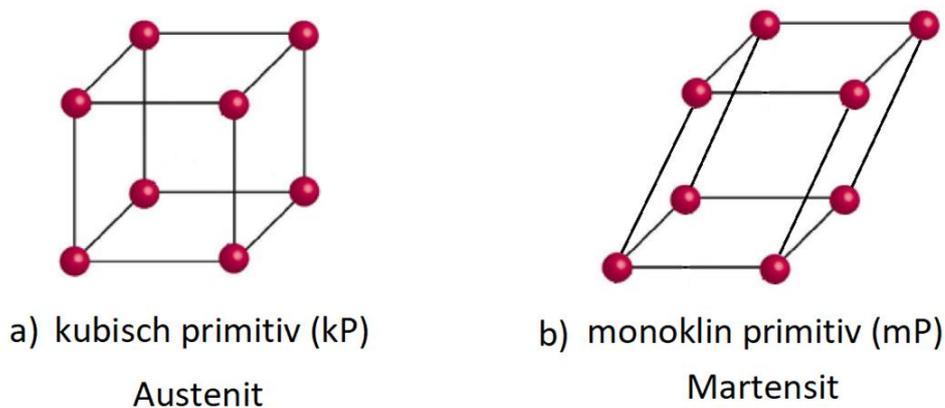
### Zyklusentstehung



**Abbildung 24:** Dargestellt ist der Zyklus zwischen Erwärmen und Abkühlen der eine Mehrfachanwendung in technisch relevanter Anzahl ermöglicht.

In der Nickel-Titan-Legierung Nitinol besteht das Kristallgitter bei Raumtemperatur im Martensit aus einem monoklin primitiven Gitter (abgek. mP) und im Austenit aus einem kubisch primitiven Gitter (abgek. kP). [STOECKEL] [ROOS]

Die Abbildung 25 zeigt die räumliche Darstellung der Gittertypen.



**Abbildung 25:** Die Gittertypen der verwendeten Legierung Nitinol sind in der Hochtemperaturphase kubisch raumzentriert (a) und in der Tieftemperaturphase monoklin primitiv (b).

In der Tieftemperaturphase Martensit ist das Atomgitter gegenüber dem des Austenits um einen Winkel verdreht. Die Gleitebenen bilden aufgrund dessen eine besondere Form, die Zwillings Ebenen. In Abschnitt 2.4.3 wird darauf nochmal Bezug genommen.

## **2.4.2 Thermodynamische Hintergründe der Gitterumwandlung**

Die Wichtigkeit der Gitterumwandlung wird aus den Ausführungen des vorherigen Abschnitts 2.4.1 deutlich. Als notwendige Bedingung kann ohne die Gitterumwandlung der Formgedächtnis-Effekt nicht stattfinden. Die Umwandlung von Martensit und Austenit ist in der thermodynamischen Energiebilanz begründet.

Aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik kann das Bestreben eines jeden thermodynamischen Systems, seine freie Energie zu minimieren, abgeleitet werden. [STEPHAN]

Das Bestreben ist als das Minimumsprinzip der freien Energie bekannt. Ändert sich unter Temperatureinfluss die Anordnung der Atome eines Systems dann hat das System nach der Änderung die minimale freie Energie für den jeweiligen thermischen Zustand erreicht. [STEPHAN]

Die Gitterumwandlung ist also ein natürlicher Vorgang zur Minimierung der freien Energie in der Legierung.

### 2.4.3 Die 3 Formgedächtnis-Effekte

Im Rahmen der Umformung der Atomanordnung im Martensit und Austenit kann es zu 3 verschiedenen Formgedächtnis-Effekten kommen:

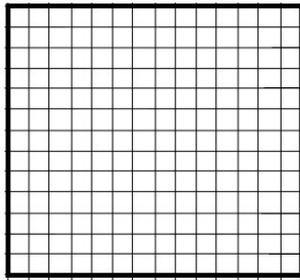
1. Einweg-Formgedächtnis-Effekt
2. Superelastizitäts-Effekt
3. Zweiweg-Formgedächtnis-Effekt

Der Einweg-Formgedächtnis-Effekt bildet die Grundlage des nachfolgenden Zweiwegs- und Superelastizitäts-Effekts.

Beide Effekte können als Variation des Einweg-Effekts angesehen werden. Es wird deshalb, als Grundlage, mit der Erläuterung des Einweg-Formgedächtnis-Effekts begonnen.

#### Einweg-Formgedächtnis-Effekt

Im Ausgangszustand liegt die Legierung als Hochtemperaturphase, also oberhalb der kritischen Umwandlungstemperatur (auch Austenit-Start-Temperatur genannt), vor. Dieser Zustand wird auch Austenit oder  $\beta$ -Mischkristall genannt. Die Anordnung der Atome im Gefüge des Austenits sind in der nachfolgenden Prinzipdarstellung Abbildung 26 zu sehen. [MERKEL]

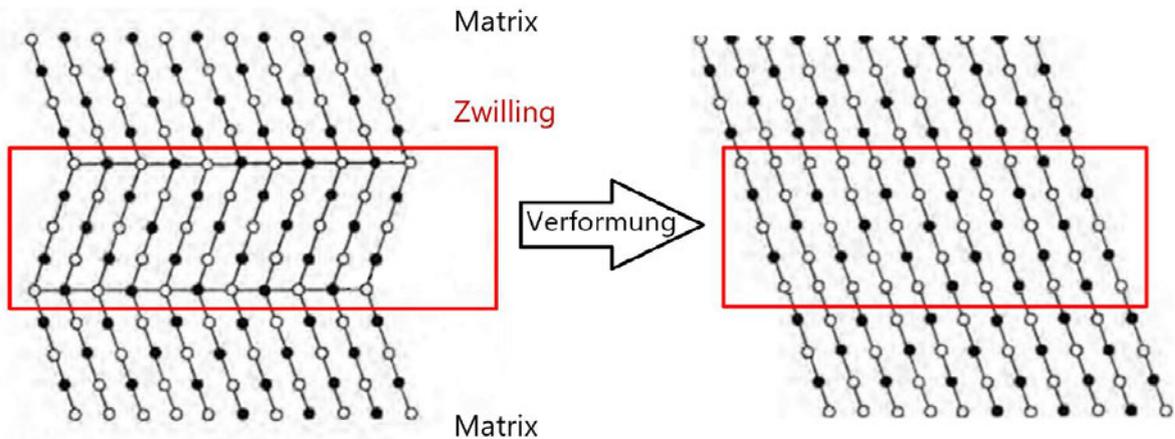


Austenit Gefüge

**Abbildung 26:** Das kubisch primitive Atomgitter ohne Winkelverdrehung kann durch ein geordnetes Gefüge aus Quadraten vereinfacht dargestellt werden.

Oberhalb der Umwandlungstemperatur kann nur das austenitische Gittermodell existieren. Durch das Abkühlen aus der Hochtemperaturphase Austenit in den Martensit entsteht ein Gittermodell, in dem die Atome in Zwillings Ebenen angeordnet sind.

In der nachfolgenden Abbildung 27 sind Zwillingsebenen bzw. Zwillinge schematisch dargestellt. [MERKEL]

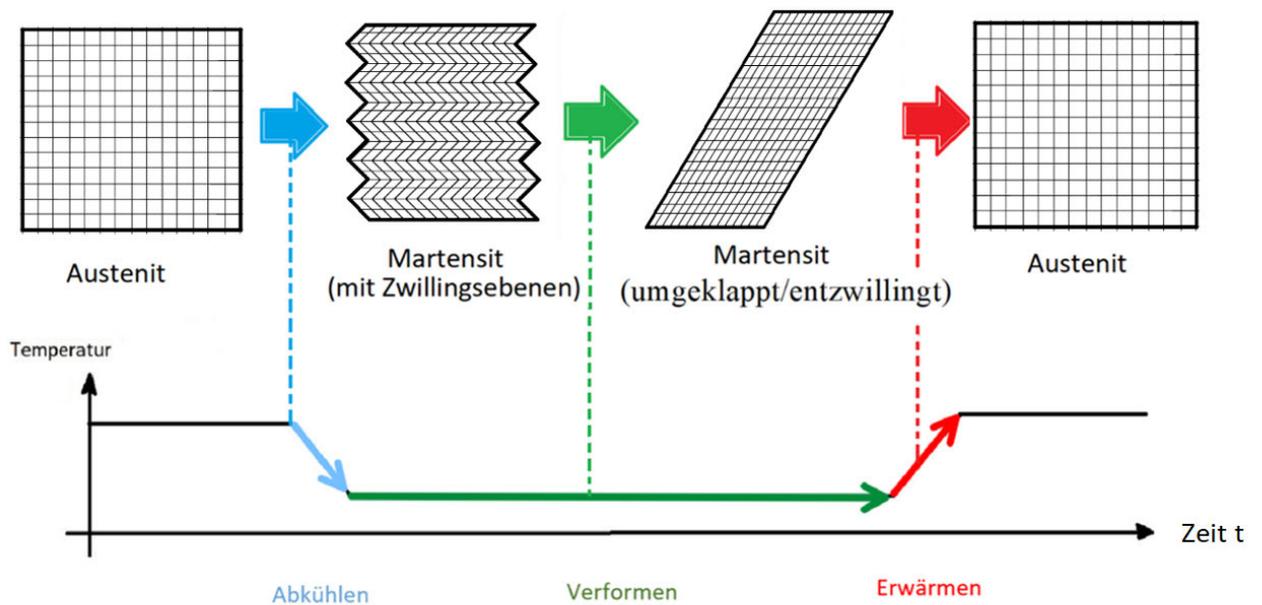


**Abbildung 27: Martensit mit Zwillingen (links) und verformter, entzwillingter Martensit (rechts).**

Die Zwillingbildung bietet die Möglichkeit eine plastische Verformung über das Umklappen von Zwillingsebenen zu realisieren. Nach dem Umklappen ist die Zwillingsebene nicht mehr entgegengesetzt zur Matrix orientiert, sondern gleicht sich ihr an. Man spricht in diesem Zusammenhang vom so genannten Entzwillingen bzw. vom entzwillingten Martensit. [LANGBEIN]

Umgeklappte Zwillingsebenen (also entzwillingter Martensit) sind reversibel da durch das Erwärmen die Gitterebenen wieder zurückgeklappt werden können. Bei Temperaturen oberhalb der Austenit-Start-Temperatur kann nur das anfängliche Austenit-Gittermodell existieren. Aufgrund dessen wird wieder das ursprüngliche, austenitische Gitter geformt. Die Atome befinden sich dann in der gleichen Position wie vor der Verformung.

Der Sachverhalt zwischen Abkühlen, Verformen und Erwärmen ist in der folgenden Abbildung 28 veranschaulicht. [MERKEL] [LANGBEIN]



**Abbildung 28:** Dargestellt ist ein Temperatur-Zeit-Verlauf (unten) mit zugehöriger Gefügestruktur (oben). Der anfängliche, geordnete Austenit wandelt sich durch Abkühlen (blau) in den Martensit mit Zwillingsebenen um. Im Zuge einer Verformung (grün) entsteht daraufhin entzwillingter Martensit. Dieser kann durch Erwärmen (rot) in das anfängliche Austenit-Gefüge zurückgewandelt werden.

Formgedächtnis-Legierungen können den Zyklus aus Verformung und Reversibilität mehrere Millionen Male nutzen, jedoch erhöht sich die Anzahl der Materialdefekte mit steigender Zyklenzahl. Es kann beispielsweise eine Restdehnung zurückbleiben. [LANGBEIN]

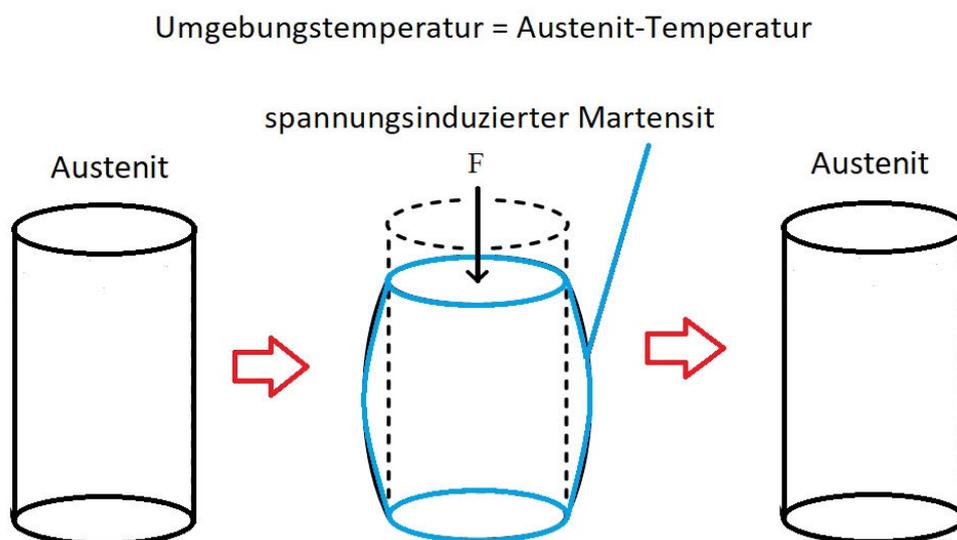
Ein Bauteil kann eine plastische Verformung erfahren und im Zuge dessen seine Maße verändert haben. Wird das Bauteil erwärmt dann werden die ursprünglichen Maße aus der Austenitphase wiederhergestellt.

Superelastizitäts-Effekt:

Man nehme an ein Bauteil mit Superelastizitäts-Effekt würde aufgrund einer anliegenden Spannung verformt werden. Geschieht das im Gebiet der Austenit-Temperatur wandelt sich der Austenit, aufgrund der Spannung, in Martensit um. Man spricht vom spannungsinduzierten Martensit. Eine Martensitbildung wäre ohne Spannung aufgrund der vorherrschenden Austenit-Temperatur nicht möglich. [LANGBEIN]

Die Atomebenen des Austenits werden durch die mechanische Spannung so verschoben, dass entzwillingter Martensit entsteht. Wie bereits erwähnt hat der entzwillingte Martensit die Eigenschaft der Reversibilität unter Temperatureinfluss. Wird die Spannung entfernt dann wandelt sich der Martensit aufgrund der Temperatur wieder in Austenit um. Die verschobenen Zwillingsebenen klappen zurück und das Bauteil erhält seine ursprüngliche Geometrie zurück. Sämtliche Vorgänge geschehen bei konstanter Temperatur oberhalb der Austenit-Start-Temperatur also im Austenitgebiet. [LANGBEIN]

Der Superelastizitäts-Effekt ist in der folgenden Abbildung 29 an einem Zylinder veranschaulicht.



**Abbildung 29: Dargestellt ist:**

1. Links: Ein unbelasteter Zylinder bestehend aus Austenit, da die Temperatur, die der Hochtemperaturphase entspricht.
2. In der Mitte: Der Zylinder, der unter Krafteinfluss über die Streckgrenze hinaus verformt wurde. Er besteht nun aus spannungsinduziertem Martensit.
3. Rechts: Die sofortige Rückumwandlung bei Wegnahme der Kraft aufgrund der Austenittemperatur.

Bei gleichbleibender Temperatur kann ein Bauteil aufgrund einer mechanischen Spannung bis zu 10 % gedehnt werden. Entfernt man anschließend die mechanische Belastung würde das Bauteil seine Anfangsgeometrie vollständig wiederherstellen. [LANGBEIN]

### Zweiweg-Formgedächtnis-Effekt

Der Zweiweg-Formgedächtnis-Effekt zeichnet sich dadurch aus, dass beim Abkühlen vom Austenit ins Martensitgebiet bevorzugt Martensitvarianten gebildet werden, die ihre Form in Richtung der ursprünglichen Gestalt im Martensit ändern. Damit „erinnert“ sich das Bauteil nicht nur beim Erwärmen an seine ursprüngliche, austenitische Gestalt, sondern auch beim Abkühlen an seine ursprüngliche, martensitische Gestalt. [MERKEL]

Die nachfolgende Abbildung 30 veranschaulicht das Prinzip.



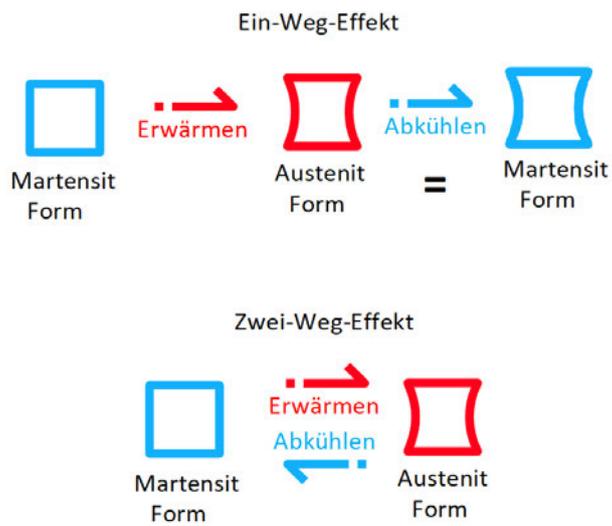
**Abbildung 30:** Die Abbildung zeigt einen blauen Klotz aus Martensit. Durch Erwärmen bildet sich die austenitische Form wie zuvor beim Einweg-Effekt. Im Unterschied zum Einweg-Effekt kann man zusätzlich die Umformung beim Abkühlen in eine festgelegte, martensitische Form beobachten.

Im Zuge des Zweiweg-Formgedächtnis-Effekts wird im martensitischen Zustand eine plastische Verformung durch eine Kraft vorausgesetzt, wodurch Versetzungsbewegungen entstehen. An Orten, an denen sich Versetzungen stauen (z.B. an Korngrenzen) entstehen elastische Spannungsfelder. Aufgrund dieser Spannungsfelder entsteht, beim Abkühlen in den Martensit, eine Bewegungsrichtung zurück zur ursprünglichen, martensitischen Gestalt. Die Bewegungsrichtung wird durch die Spannungsfelder vorgegeben. [MERKEL]

Durch die Spannungen können Formänderungen beim Abkühlen aus der Austenitphase gesteuert werden. Das Gefüge besteht in der Tieftemperaturphase aus spannungsinduziertem Martensit. Die Spannungen können dabei von außen, aber auch durch innere Spannungen, vorhanden sein. Letztere machen den Effekt unabhängig von äußeren Faktoren wie eine zusätzliche Kraftaufbringung. Die obige Abbildung 30 zeigt ein Modell ohne äußere Kraft, dass sich sowohl beim Erwärmen als auch beim Abkühlen verformt. [MERKEL]

Hierin besteht der Hauptunterschied zum Einweg-Effekt.

Die Abbildung 31 zeigt in einem direkten Vergleich das Prinzip.



**Abbildung 31:** Zu sehen ist der Vergleich zwischen Einweg-Effekt und Zweiweg-Effekt. Der Einweg-Effekt hat im Gegensatz zum Zweiweg-Effekt kein Formgedächtnis beim Abkühlen.

### 2.4.4 Kontrollierbarkeit der Umwandlungstemperatur

In den Erklärungen zu den Formgedächtnis-Effekten ist zu erkennen, dass die Umwandlungstemperatur eine Schlüsselrolle für alle 3 Effekte bildet. In diesem Zusammenhang sollte erläutert werden, dass die Umwandlungstemperatur kontrolliert werden kann. Andernfalls wäre z.B. ein Superelastizitäts-Effekt nur bei hohen Temperaturen möglich und der Einsatzbereich wäre eingeschränkt. [LANGBEIN]

Um die Umwandlungstemperatur zu kontrollieren kann die chemische Zusammensetzung der Legierung verändert werden. Das Mischungsverhältnis ist auffällig sensibel. Wird z.B. der Nickel-Gehalt um 0,1 Atomprozent erhöht kann eine Differenz der Umwandlungstemperatur von 10°C resultieren. [LANGBEIN]

Der relevante Bereich im Phasendiagramm ist der Bereich um eine Nickel-Konzentration von 48 Atomprozent bis 51,5 Atomprozent, da nur hier der notwendige Phasenübergang auftritt.

Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt den relevanten Bereich.

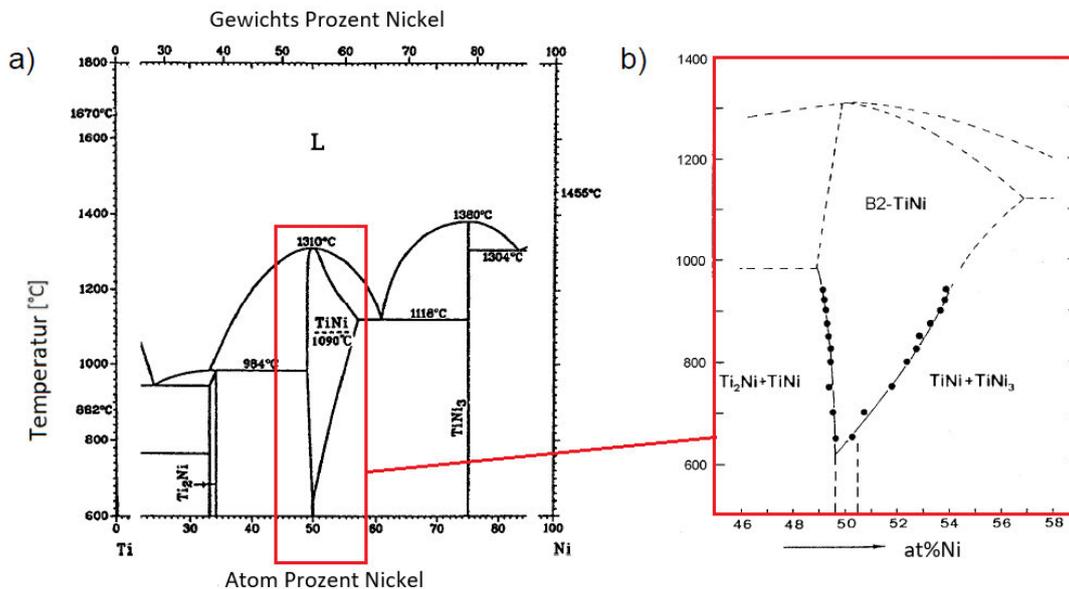
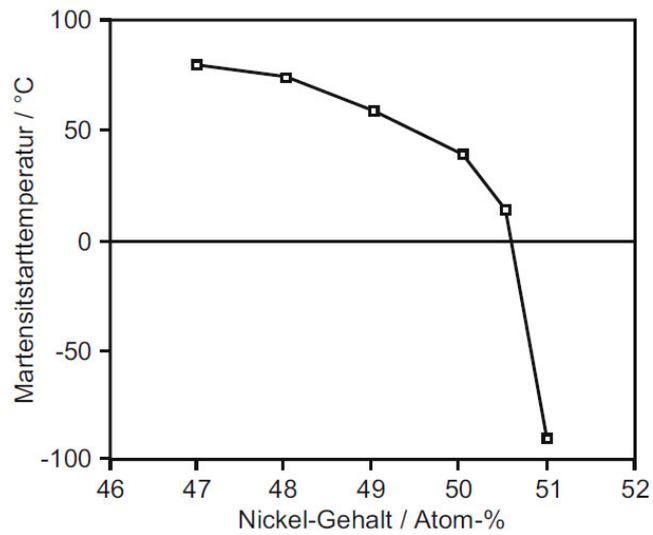


Abbildung 32: Das Zustandsdiagramm für Nickel-Titan (a) und ein Ausschnitt mit dem Bereich der notwendigen Phasenumwandlung (b). In Anlehnung an [KAACK].

Abbildung 33 zeigt die Abhängigkeit der Umwandlungstemperatur von der Zusammensetzung der Legierung.



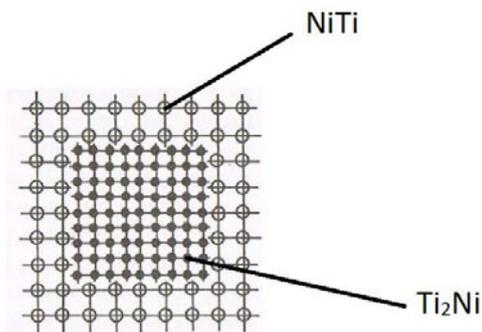
**Abbildung 33:** Dargestellt ist die Veränderung der Umwandlungstemperatur mit steigendem Nickel-Gehalt. [ROOS]

Der mögliche Variationsbereich der Umwandlungstemperatur liegt zwischen  $-100^{\circ}\text{C}$  und  $+100^{\circ}\text{C}$  für Nickel-Titan-Legierungen. [MERKEL]

## 2.5 Werkstoffwissenschaftliche und physikalische Einflüsse auf das Laser-Pulver-Auftragschweißen

### 2.5.1 Die Entstehung von intermetallischen Phasen und ihr Einfluss auf das LPA

Im Nickel-Titan-Zustandsdiagramm aus Abschnitt 2.2.3 ist zu erkennen, dass in Abhängigkeit vom Gehalt an Nickel und Titan unterschiedliche Gefüge entstehen können. Es können metallische Verbindungen wie intermetallische Phasen entstehen. In der Abbildung 34 ist eine metallische Phase, in diesem Beispiel  $Ti_2Ni$  innerhalb eines Nickel-Titan-Gefüges, schematisch dargestellt.



**Abbildung 34:** Zu erkennen ist die intermetallische Phase  $Ti_2Ni$  innerhalb einer Nickel-Titan-Matrix. In Anlehnung an [Großmann].

Die intermetallischen Phasen haben abweichende Materialeigenschaften zu denen der Legierung. Sie sind oft härter, aber auch spröder und damit anfälliger für eine Rissbildung. [SCHEITLER] [SCHULZE]

Bezogen auf den Inhalt der Abschlussarbeit kann abgeleitet werden, dass die Verwendung einer Titan-Platte als Substrat in Verbindung mit NiTi-Pulvermaterial unweigerlich zur Erhöhung des Titananteils im Schmelzbad des Schweißprozesses führt und damit zu einer Phasenbildung. [SCHEITLER]

Das Nickel-Titan-Zustandsdiagramm in Abbildung 17 bestätigt, dass bei einer Erhöhung des Titangehalts, wie es durch die Verwendung einer Substrat-Platte aus Titan unumgänglich ist,  $Ti_2Ni$ -Phasen entstehen.

Die nachfolgende Abbildung 35 zeigt den Sachverhalt am Beispiel einer Schweißspur aus Nickel-Titan auf einem Titan-Substrat.



**Abbildung 35:** Dargestellt ist eine Schweißspur mit verschiedenen Graustufen in Gebieten mit unterschiedlicher Werkstoffzusammensetzung. In Anlehnung an [SCHEITLER].

Der Bruch der Schweißspur tritt im Gebiet der intermetallischen Phase  $Ti_2Ni$ , also im Bereich der Versprödung, auf.

Es kann zusammenfassend gesagt werden, dass die prozessbedingte Entstehung von Phasen zu der Entstehung eines spröden, rissanfälligen Gefüges aber auch zu einer Inhomogenität der Werkstoffeigenschaften im unmittelbaren Bereich des Schmelzbades führt. [SCHEITLER]

### 2.5.2 Wärmeausdehnung und Schweißspannungen als Folge eines inhomogenen Gefüges

In Abschnitt 0 sind die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität und der Wärmeausdehnungskoeffizient der Werkstoffe dargestellt. Sowohl Nickel und Titan als auch die Legierung aus beiden Werkstoffen zeigen Unterschiede in allen drei Werkstoffeigenschaften.

Der übersichtshalber sind die für diesen Abschnitt wichtigen Eigenschaften in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Die Unterschiede der Werkstoffeigenschaften für Nickel, Titan und NiTi sind übersichtlich zusammengefasst. Die Wärmeleitfähigkeit sowie die Wärmekapazität sind als Materialwerte aufgeführt, um die Unterschiede der Werkstoffe im Thermomanagement zu verdeutlichen.

| Materialeigenschaft                  | Nickel             | Titan               | NiTi               | Einheit                  |
|--------------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| Spez. Wärmekapazität C               | 444                | 523                 | 450                | $\frac{J}{kg \cdot K}$   |
| Wärmeleitfähigkeit $\lambda$         | 86                 | 22                  | 18                 | $\frac{W}{m \cdot K}$    |
| Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha$ | $13 \cdot 10^{-6}$ | $8,6 \cdot 10^{-6}$ | $11 \cdot 10^{-6}$ | $\frac{1}{K}$ (bei 20°C) |

Es ist abzuleiten, dass die Werkstoffe, durch die zugeführte Wärme des Lasers, sich unterschiedlich schnell aufheizen und abkühlen, unterschiedlich viel Wärmeenergie speichern und sich unterschiedlich ausdehnen. Diese Auswirkungen des Wärmeeintrags erhöhen sich mit der Erhöhung der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ .

Insbesondere die unterschiedliche Wärmeausdehnung kann einen qualitätssicheren Materialauftrag während des Laser-Pulver-Auftragschweißen gefährden. [SCHEITLER]

Aufgrund dessen soll dieser werkstofftechnische, thermodynamische Zusammenhang anhand von Formeln mathematisch dargelegt werden:

Die Gleichung (2.1) zeigt die Änderung der räumlichen Ausdehnung  $\Delta V$  mit dem Anfangsvolumen  $V_0$  und einem Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$  in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten  $\Delta T$  [ONDRACEK]:

$$\Delta V = 3 \cdot \alpha \cdot V_0 \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Es ist zu erkennen, dass sich die Wärmeausdehnung eines Werkstoffes mit steigendem Temperaturgradienten erhöht.

Aufgrund von lokalen Ungleichheiten der Werkstoffkonzentrationen, im Schmelzbad sowie in den aufgetragenen Schichten, folgen ungleiche Wärmedehnungen zwischen den Schichten (in der Gleichung (2.1) durch den Materialwert  $\alpha$  zu erkennen). Die inhomogenen Werkstoffkonzentrationen haben ihren Ursprung in der Phasenbildung und im schichtweisen Materialauftrag bzw. entstehen als Folge des Prozessverlaufs während des Laser-Pulver-Auftragschweißens. [SCHEITLER]

In der folgenden Abbildung 36 sind die Inhomogenitäten der Werkstoffe, bezogen auf die Höhe einer Schweißspur, am Werkstoff Titan schematisch dargestellt.

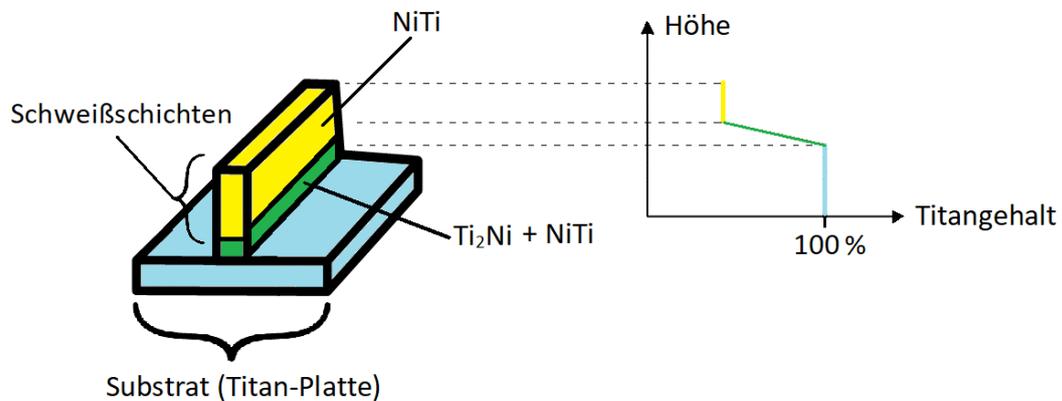


Abbildung 36: Abgebildet sind Inhomogenitäten der aufgetragenen Schichten (gelber und grüner Bereich). Der hellblaue Bereich, die Substrat-Platte, besteht aus Titan. Im grünen Übergangsbereich kann man die Zunahme vom Titangehalt, mit zunehmendem Wert in der Nähe der Titan-Platte, erkennen. Dabei ist für den Übergangsbereich (grüne Kurve im Diagramm) nicht bekannt ob tatsächlich ein linearer Verlauf auftritt. Die grüne Kurve soll nur den Sachverhalt der Zunahme des Titangehalts veranschaulichen.

Aus den Erkenntnissen aus dem Elastizitätsgesetz ist bekannt, dass Dehnungen und Spannungen miteinander einhergehen. Steigt die Dehnung dann entstehen Spannungen und umgekehrt. Der Zusammenhang ist in der folgenden Abbildung 37 bildlich dargestellt.

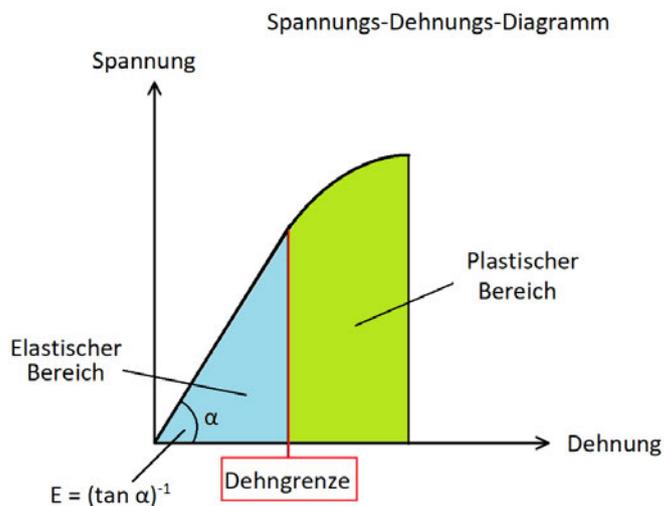


Abbildung 37: Die Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Spannungen und Dehnungen. Der für uns relevante Bereich ist der elastische Bereich (hellblau).

Der mathematische Zusammenhang zwischen der Dehnung  $\varepsilon$  und der Spannung  $\sigma$  ist in der Formel (2.2) im so genannten Hookschen Gesetz dargestellt. Die Steigung der Geraden im elastischen Bereich in Abbildung 37 bzw. der Proportionalitätsfaktor in Gleichung (2.2) ist das Elastizitätsmodul  $E$  [SCHULZE]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

Die Dehnung kann als das Verhältnis von Volumendifferenz zum Anfangsvolumen ausgedrückt werden [WEIßBACH]:

$$\varepsilon = \Delta V / V_0 \quad (2.3)$$

Formt man Gleichung (2.1) nach dem Verhältnis  $\Delta V / V_0$  um und setzt das Ergebnis in Gleichung (2.3) ein so erhält man die Dehnung in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten (2.5):

$$\Delta V = 3 \cdot \alpha \cdot V_0 \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

$$\Delta V / V_0 = 3 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon = 3 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

Das Zwischenergebnis kann in Gleichung (2.2) eingesetzt werden um die Spannung  $\sigma$  in Abhängigkeit vom Temperaturgradienten zu erhalten (2.6):

$$\sigma = 3 \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (2.6)$$

### **2.5.3 Zusammenfassung und Interpretation der Effekte im Gesamtkontext der Abschlussarbeit**

Die Gleichung (2.6) zeigt, dass ein direkter, proportionaler Zusammenhang zwischen der Entstehung eines Temperaturgradienten und der Entstehung von Spannungen besteht.

Daraus wird abgeleitet, dass der Temperaturanstieg durch den Einsatz des Lasers, verbunden mit den Ausdehnungen der Werkstoffe, zur unweigerlichen Entstehung von Spannungen führt.

Je größer der Temperaturgradient ist desto stärker wirkt sich die Erwärmung auf die Spannungsbildung aus. Da im Laserfokus Temperaturen oberhalb der Schmelztemperatur von Titan herrschen müssen (1670 °C) und gleichzeitig an den Rändern der Platte, also nur wenige zentimeter entfernt, eine Temperatur von 50°C im Rahmen der Versuche kaum überschritten wird, entstehen lokal große Temperaturgradienten und damit hohe Spannungen.

Dabei ist es irrelevant, ob die Temperaturdifferenz durch Erwärmen oder durch Abkühlen entsteht. Es ist möglich, dass sich aufgrund dieses Effekts, nach erfolgtem Schweißprozess, zeitversetzt ein Riss während des Abkühlens bildet. Üblicherweise bilden sich Risse bereits während des Schweißens als Folge der Wärmeausdehnung. [ZIMMER]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass aufgrund der Methodik (Wärmeeintrag durch den Schweißprozess) und der Werkstoffeigenschaften (Bildung von spröden Phasen) die Rissbildung beim LPA prozessbedingt begünstigt wird.

Die Entstehung von Spannungen in Kombination mit der Versprödung des Werkstoffs führen, besonders an scharfen Kanten wie sie z.B. an natürlich vorkommenden Porositäten auftreten, zur Rissbildung und damit zu einem instabilen Prozess. [SCHEITLER]

### 3 Systematische Entwicklung einer Versuchsstrategie

Die zuvor gemachten Ausführungen und Erkenntnisse sollen in diesem Abschnitt dazu genutzt werden um systematisch und zielorientiert eine Versuchsstrategie auszulegen. Die Auslegung von Versuchen, die Evaluation von Instabilitäten sowie das Aufstellen von zu erreichenden Zielkriterien soll im weiteren Verlauf im Fokus stehen.

#### 3.1 Analyse der zu verwendenden Systemtechnik sowie der Systemgrenzen

In Abschnitt 2.1 wurde die Systemtechnik im Zusammenhang mit dem LPA beschrieben. Im folgenden soll die Beschreibung detailreicher geschehen. Das Aufzeigen von Systemgrenzen der verwendeten Systemtechnik soll hierbei im Vordergrund stehen.

1. Der Pulverförderer soll den Transport und damit die geförderte Masse der Pulverpartikel regulieren.

Im Rahmen dessen sind die Systemgrenzen in der Einheit Masse pro Zeit, also in der Einheit des Massenstroms anzugeben. In der Nut eines rotierenden Tellers wird das Pulver aufgefangen, nachdem es aus dem Behälter des Förderers gefallen ist. Dabei gilt je schneller sich der Teller dreht umso mehr Pulvermasse kann am Absaugpunkt der Nut abgesaugt und zum Schweißkopf transportiert werden. Die Tellerumdrehung kann von 0 bis 10 Umdrehungen pro Minute eingestellt werden wodurch sich der Massenstrom einstellen lässt. Der Massenstrom kann von 0 bis 40 g/s eingestellt werden. Der Förderer ist in Abbildung 9 dargestellt.

2. Der Laser ist für die Erzeugung eines gebündelten Lichtstrahls notwendig. Er soll die zum Schweißen benötigte Wärme zur Verfügung stellen. Die Leistung des Lasers kann bis zu 300 Watt betragen. Unterhalb von 33% der Maximalleistung soll der Laser, aus technischen Gründen, nicht betrieben werden. Das entspricht einer unteren Grenze von 106 Watt. Der Durchmesser des Lichtstrahls kann zwischen 0,48 mm und 3,6 mm eingestellt werden. Die bestrahlbare Fläche variiert zwischen 0,81 mm<sup>2</sup> und 10,18 mm<sup>2</sup> und ist kreisförmig. Daraus folgen Strahlintensitäten zwischen 9,82 Watt/mm<sup>2</sup> und 370,37 Watt/mm<sup>2</sup>. Es ist noch zu erwähnen, dass der Durchmesser und die bestrahlbare Fläche durch einen größeren Höhenabstand über die Systemgrenze hinaus vergrößert werden können. Der Fokusdurchmesser am Schmelzpunkt müsste dann über eine geeignete Rechnung bestimmt werden. Eine Abbildung ist nicht vorhanden da der Laser im Inneren der Anlage von Abbildung 7 verbaut ist.

3. Der Schweißkopf und die verbauten Aktoren, für die Bewegung des Kopfes, können auf eine Geschwindigkeit bis 20 mm/s eingestellt werden. Im Zuge dessen kann die Intensität, also die eingebrachte Wärmemenge pro Zeit, kontrolliert werden.

Abbildung 38 zeigt den Schweißkopf.



**Abbildung 38: Der Schweißkopf innerhalb der Prozesskammer.**

4. Zur Kontrolle der Schutzgasatmosphäre wird ein Sauerstoffsensoren verwendet. Er misst Werte zwischen 0 und 1013 ppm (particles per million), erkennbar in Abbildung 39.



**Abbildung 39: Sensor zur Messung von Sauerstoffpartikeln. [SENSORE]**

5. Die Schutzgaskammer hat ein Volumen von 0,0538 m<sup>3</sup> und ist durch Kunststoffelemente auf eine Temperatur bis 200°C begrenzt. Die Kammer kann Sauerstoffwerte unter 50 ppm erreichen. Abbildung 7 zeigt die Kammer.
6. Eine weitere Möglichkeit für die Wärmezufuhr ist der Wärmeeintrag über ein externes Gerät wie einen Ofen. Er bietet sich für einen kontrollierten und sicheren Wärmeeintrag an. Der zur Verfügung stehende Veraschungs-ofen kann auf eine Temperatur von 30 bis 3000 Grad eingestellt werden.

Der Veraschungssofen ist in Abbildung 40 zu sehen.



Abbildung 40: Veraschungssofen der Firma Nabertherm.

Eine übersichtliche Darstellung aller genannten Werte ist in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Systemtechnik sowie der Systemgrenzen.

| Systemtechnik    | Art                  | Systemgrenzen | Einheit        |
|------------------|----------------------|---------------|----------------|
| Pulverförderer   | Massenstrom          | 0 ... 40      | $\frac{g}{s}$  |
| Laser            | Laserleistung        | 106 ... 300   | Watt           |
| Schweißkopf      | Aktorgeschwindigkeit | 0 ... 20      | $\frac{mm}{s}$ |
| Sauerstoffsensor | Anzahl von Partikeln | 0 ... 1013    | ppm            |
| Schutzgaskammer  | Kammervolumen        | 0,0538        | m <sup>3</sup> |
| Veraschungssofen | Temperatur           | 30 ... 3000   | °C             |

### 3.2 Der Standard-Prozessparametersatz

Im weiteren Verlauf der Abschlussarbeit werden Versuche und Ergebnisse bzw. Problematiken und Proben-Geometrien in Verbindung mit dem LPA erläutert. Es ist zu beachten, dass diesen Versuchen, Ergebnissen, Problematiken und Geometrien ein festgelegter Parametersatz für Vergleichsstrukturen zugrunde liegt.

Die Vergleichsstrukturen bzw. der Parametersatz beinhalten die Instabilitäten und Charakteristika aus Abschnitt 3.3. Der Parametersatz ist im Verlauf der Erläuterungen bis zur aktiven Einflussnahme in Abschnitt 0 konstant und wird nicht verändert.

Die Werte für den Standard-Parametersatz setzen sich aus Erfahrungswerten mit anderen Werkstoffen wie z.B. Stahl zusammen. Mit dem gewählten Parametersatz konnten gute Ergebnisse, für das Laser-Pulver-Auftragschweißen von Werkstoffen auf artfremden Substrat-Material, erzielt werden.

Aus dem Standard-Parametersatz entsteht eine Standard-Geometrie auf der Platte. Sie wurde einprogrammiert und beschreibt in der Draufsicht ein Rechteck mit den Seiten 5,4 mm zu 15,5 mm. Die Höhe der Struktur wird durch die Anzahl an Schweißschichten bestimmt. Bei Verwendung des Standard-Parametersatzes entsteht demnach ein Quader mit variierender Höhe. Weitere Ausführungen zur Geometrie folgen im nächsten Abschnitt.

Die Tabelle 6 fasst die Standard-Prozessparameter zusammen.

Tabelle 6: Zusammenfassung des Standard-Parametersatzes.

| Prozessparameter        | Wert     | Einheit                     |
|-------------------------|----------|-----------------------------|
| Laserleistung           | 100      | Watt                        |
| Vorschubgeschwindigkeit | 8        | mm/s                        |
| Laserfokus              | 0,48     | mm Durchmesser              |
| Tellerdrehzahl          | 1,5      | 1/min                       |
| Sauerstoff-Wert         | 50...150 | ppm (particles per million) |
| Spurbreite              | 1        | Millimeter                  |
| Schicht-Überlappung     | 65       | Prozent %                   |
| Schichthöhe             | 210      | Mikrometer                  |
| Kinetik: Shift Angle    | 180      | Grad                        |
| Kinetik: unidirektional | /        | /                           |

Eine Erläuterung der Tabelleneinträge folgt.

Erklärung der Tabelleneinträge:

1. Laserleistung:  
Einstellung zur eingebrachten Energiemenge.
2. Vorschubgeschwindigkeit:  
Geschwindigkeit des Schweißkopfes während des Schweißprozesses.
3. Laserfokus:  
Durchmesser des Belichtungsquerschnitts.
4. Tellerdrehzahl:  
Drehzahl des Pulverförderers zur Einstellung des Massenstroms.
5. Sauerstoff-Wert:  
Messwert zur Güte der Schutzgasatmosphäre.
6. Spurbreite:  
Breite einer aufgetragenen Schweißspur.
7. Schicht-Überlappung:  
Überlappungsgrad der Schweißspuren.
8. Schichthöhe:  
Eingestellte Schichthöhe einer Schweißspur bzw. einer Schweißschicht.
9. Kinetik:  
Shift Angle:  
Verschiebungswinkel nach einer Schweißspur. Die Einstellung  $180^\circ$  resultiert in eine Umkehr der Bewegungsrichtung bzw. in ein negatives Vorzeichen der Bewegungsrichtung.  
Unidirektional:  
Art der Bewegung beim LPA. Unidirektional bezieht sich auf das Abfahren der Schweißspur in nur eine Richtung also ohne Rückführung zum Anfangspunkt nach einer Schweißspur.

### 3.3 Prozess-Instabilität durch das Auftreten von Delaminationen als Folge einer Rissbildung

In Übereinstimmung mit den Erläuterungen über die Rissanfälligkeit der Schweißschichten aus Abschnitt 2.5 entsteht im fortschreitenden Schweißprozess eine charakteristische Versagensstruktur. Der verwendete Parametersatz ist der in Abschnitt 3.1 dargestellte Standard-Parametersatz. Im Prozessverlauf kann eine Rissbildung festgestellt werden.

Die Abbildung 41 zeigt die Rissentstehung.

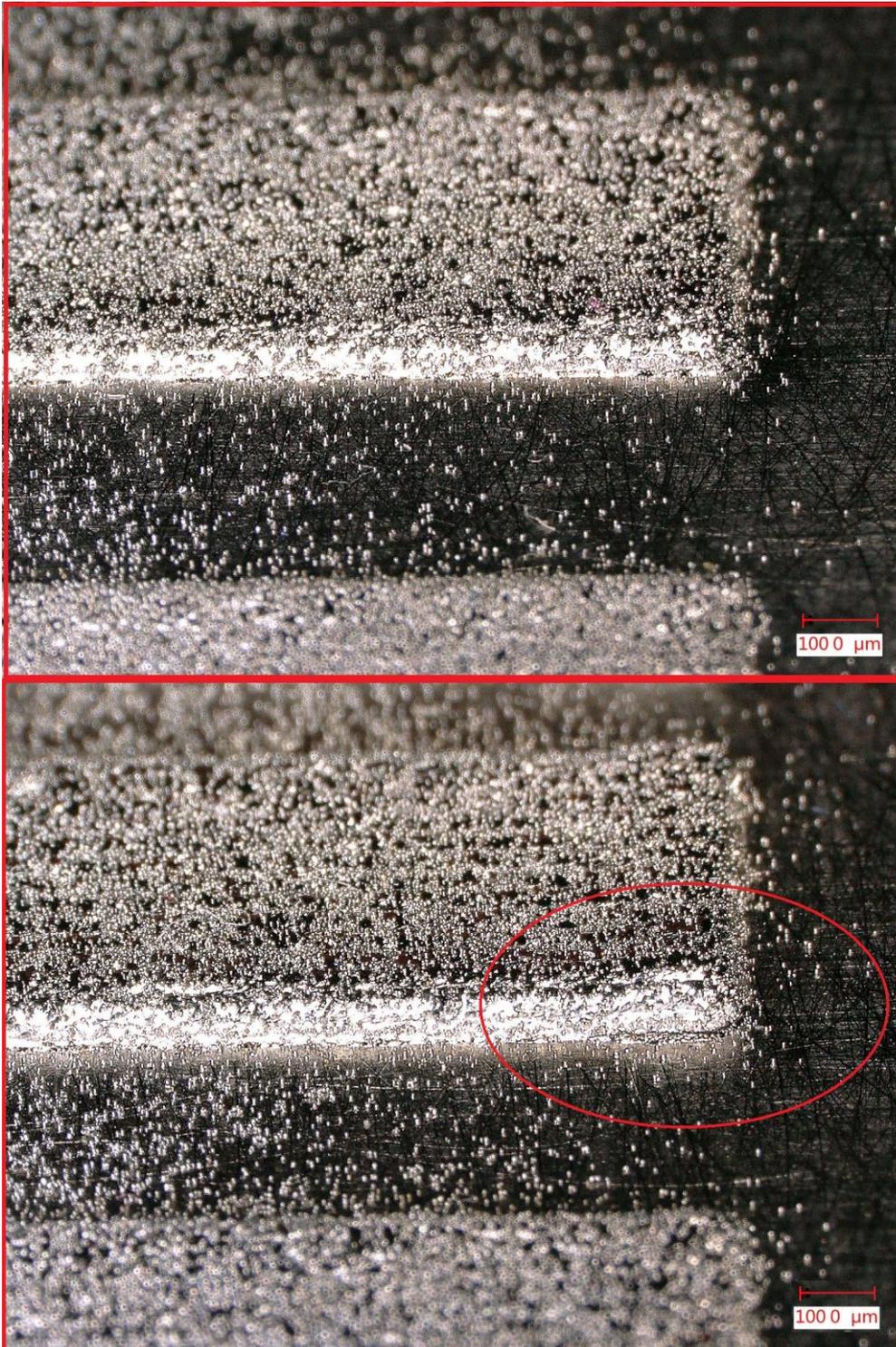
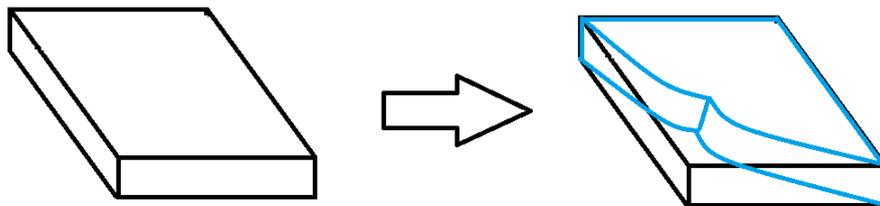


Abbildung 41: Zu erkennen ist ein rissfreier Auftrag (oben) und die Rissentstehung zwischen dem Substrat und den aufgetragenen Schichten (unten).

Der Riss bildet sich zwischen der ersten aufgetragenen Schicht und der Substrat-Platte. Der Riss tritt nach der vierten geschweißten Schicht auf also bei einer Auftragshöhe von mindestens 0,63 mm. Im Rahmen dieses anfänglichen Loslösens von der Platte entsteht im weiteren Prozessverlauf, eine charakteristische Form der Schweißschichten. Sie lösen sich im Verbund von der Substrat-Platte und sind daher geometrisch vergleichbar mit einem verdrehten Plättchen.

Die Form ist in der Abbildung 42 zu erkennen.

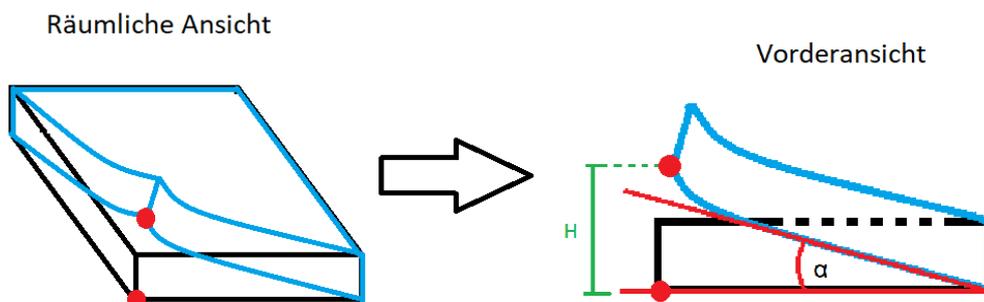


**Abbildung 42:** Dargestellt ist die Zielgeometrie (links) sowie die Verdrehung und Ablösung der aufgetragenen Schichten im Zuge des Verfahrens (rechts). Die blauen Linien zeigen das „verdrehte Plättchen“ das nach dem Schweißprozess resultiert.

Entsteht im Rahmen des Schweißprozesses ein Riss zwischen aufgetragener Schicht und Substrat-Platte beginnt im Anschluß dazu das Plättchen damit seine planare Form zu verlieren.

Es ist zu beobachten, wie sich die Platte der Längsachse nach verdreht. Im Zuge dieser Verdrehung hebt sich ein Punkt des Verbundes stärker von der Platte ab als die umgebenden Punkte. Dadurch entsteht das charakteristische „Abheben“ von der Substrat-Platte, im weiteren Verlauf Delamination genannt.

Abbildung 43 zeigt die Delamination sowie die Verdrehung der aufgetragenen Schichten.



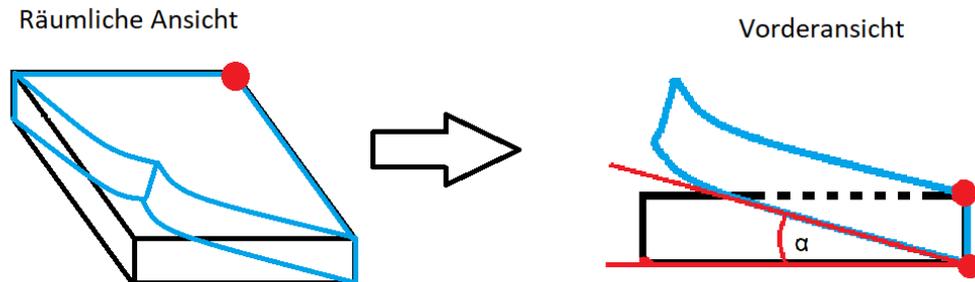
**Abbildung 43:** Zu erkennen ist die Delamination der Struktur. Die roten Punkte markieren den Delaminationspunkt. Der Winkel  $\alpha$  zeigt die Verdrehung der Endquerschnitte in der Vorderansicht. Die Höhe  $H$  wird in nachfolgenden Abschnitten relevant.

Nach dem Aufbau von 5 Schichten bzw. einer Aufbauhöhe von 0,72 mm, lösen sich die aufgetragenen Schichten vom Substrat ab, es entsteht ein reproduzierbares verwindetes Quader. Der Anfangspunkt des Schweißprozesses ist der Punkt mit der höchsten Abhebung, im weiteren Verlauf Delaminationspunkt genannt.

Die Schweißschichten bilden eine Vergleichsgeometrie mit sich wiederholenden Maßen und Verdrehungen. Weitere Ausführungen dazu folgen in Abschnitt 3.5.

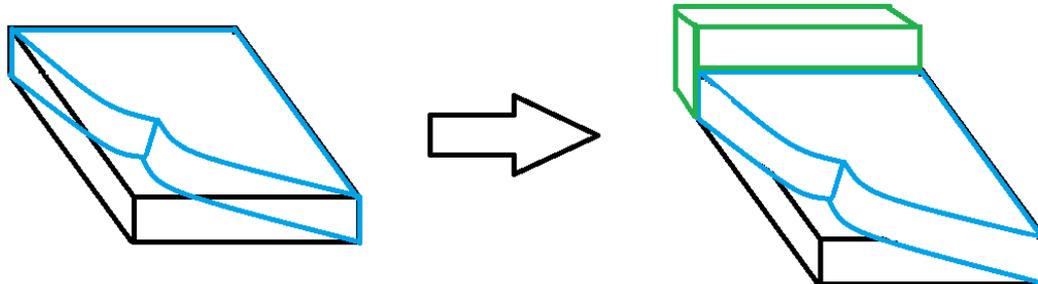
Die Schweißschichten bilden im Verlauf des LPA einen weiteren markanten Punkt. Am Ort der geringsten Delamination bzw. am Ort der Restanbindung befindet sich der Anbindungspunkt. Die Umgebende Struktur weist hier die geringste Delamination und Verdrehung auf.

Die Darstellung des Anbindungspunktes ist in Abbildung 44 zu sehen.



**Abbildung 44:** Mit einem roten Punkt ist der Anbindungspunkt markiert. Er entsteht während des Schweißprozesses und weist die geringste Delamination der gesamten Struktur auf.

Eine weitere Charakteristik stellt die Wandüberhöhung dar. Im Zuge der verwendeten Prozessparameter (insbesondere der Art der Schweißkinetik) entsteht am Endpunkt der Schweißbewegung eine Anhäufung von Material. Durch die festgelegte Verfahrensbewegung entsteht im weiteren Verlauf eine linienförmige Anhäufung von Pulvermaterial. Die nachfolgende Abbildung 45 zeigt die Wandüberhöhung.

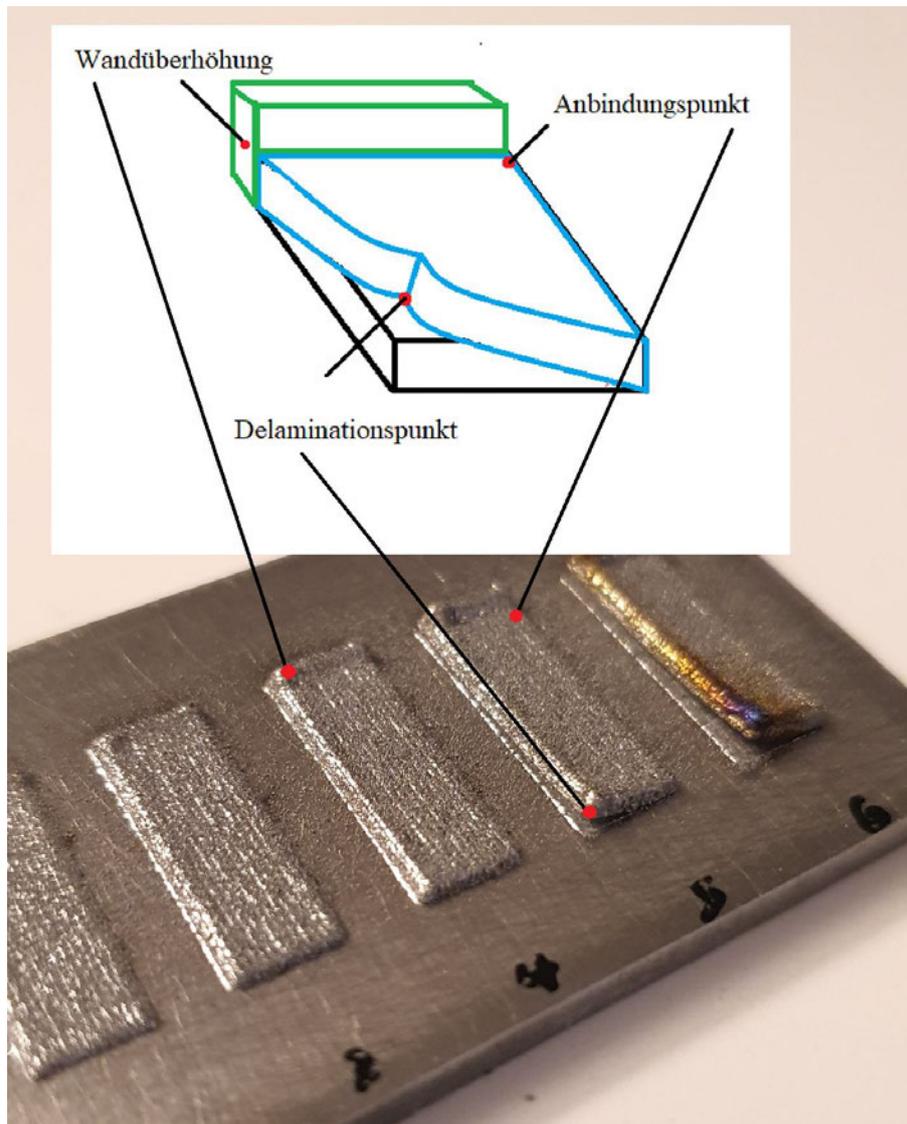


**Abbildung 45:** Abgebildet ist die verdrehte Struktur (links) und die sich bildende Wandüberhöhung in grün (rechts).

Da die Struktur am Delaminationspunkt abhebt entsteht die Wandüberhöhung nur an einem Ende der Struktur. Ohne die Verdrehung würde sie ebenfalls am gegenüberliegenden Ende stattfinden.

Durch eine triviale Änderung der Schweißkinetik kann die Wandüberhöhung vermieden werden weshalb sie im Verlauf der Abschlussarbeit nicht weiter behandelt wird.

Die folgende Abbildung 46 zeigt zusammenfassend alle oben erwähnten Charakteristika der Versagensstruktur.



**Abbildung 46:** Dargestellt sind die markanten Punkte sowie die Wandüberhöhung.

Eine Rissbildung ist ein 1-dimensionaler Fehler bzw. ein linienförmiger Fehler wohingegen die Delamination einen 2-dimensionalen Fehler darstellt und flächig definiert ist.

Delaminationen ohne Rissbildung sind nicht möglich. Rissbildungen ohne Delamination hingegen sind möglich.

### 3.4 Evaluation von auftretenden Materialdefekten im Prozess

Im vorherigen Abschnitt 3.3 wurde die Versagensstruktur mit charakteristischen Punkten dargestellt. Zur Evaluation von Materialdefekten ist es vorteilhaft die markanten Punkte zu untersuchen.

Der übersichtshalber zeigt Abbildung 47 nochmal die markanten Punkte für die Untersuchung.

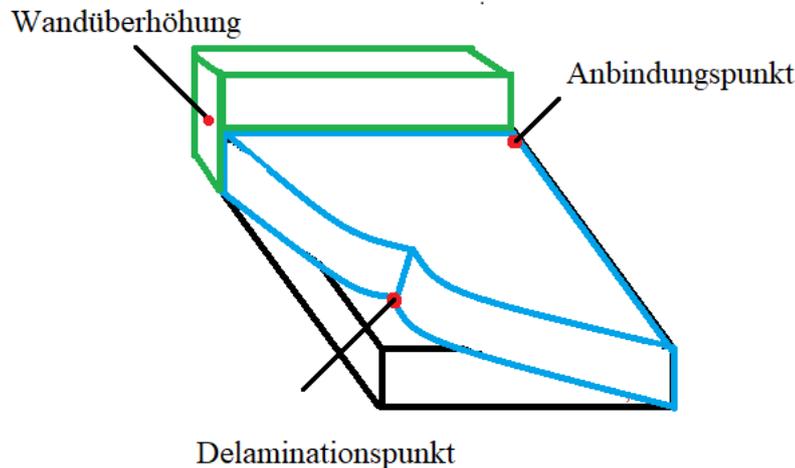


Abbildung 47: Für den weiteren Verlauf sind der Delaminationspunkt sowie der Anbindungspunkt relevant.

#### 3.4.1 Der Delaminationspunkt

Der Delaminationspunkt ist, wie zuvor beschrieben, der Punkt mit der höchsten Delamination der Struktur. Um zu überprüfen ob und inwieweit Anforderungen erfüllt wurden kann dieser Punkt zur Messung von Delaminationshöhen verwendet werden.

Zur Messung können verschiedene Verfahren genutzt werden:

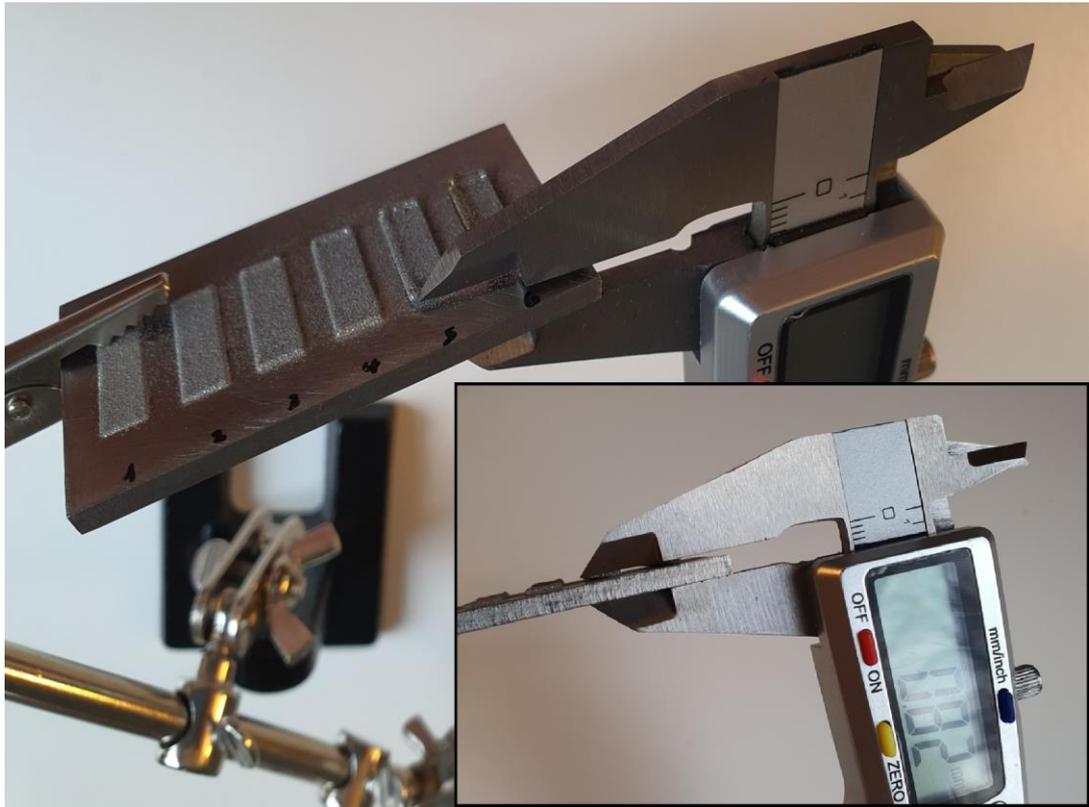
1. Sichtprüfung:

Die Sichtprüfung ist ein ausreichend genaues Verfahren um Delaminationen nach dem Schweißprozess festzustellen. Es können Aussagen getroffen werden ob eine Delamination stattfindet. Die Delaminationen sind üblicherweise groß genug für eine Sichtprüfung. Die Aussage wie hoch die Delamination ist kann hieraus nicht hervorgehen. Für eine quantitative Aussage ist dieses Verfahren ungeeignet.

2. Höhenmessung durch Messschieber:

Der Messschieber eignet sich gut um Längen im Millimeter-Bereich zu messen. Aufgrund der Versagensstruktur (Verdrehung der Endquerschnitte) wird jedoch eine Geometrie erzeugt, die eine Messung mit dem Messschieber erschwert. Die Spitzen des Messschiebers sind zu groß für eine Messung an den innenliegenden Flächen. Eine Messung ausserhalb der Struktur ist jedoch möglich. Die Spitzen können dann nach Augenmaß an die Struktur angepasst werden. Exaktere Methoden, die auch Werte unterhalb von 0,1 Millimeter messen können sind dieser Methode überlegen.

Die Abbildung 48 zeigt eine Messung mit dem Messschieber.



**Abbildung 48:** Höhenmessung am Delaminationspunkt durch einen Messschieber. Im unteren Bild kann man die Anpassung an die Höhe des Delaminationspunktes erkennen.

3. Digitale Höhenmessung durch Zählen von Bildpunkten (Pixeln):

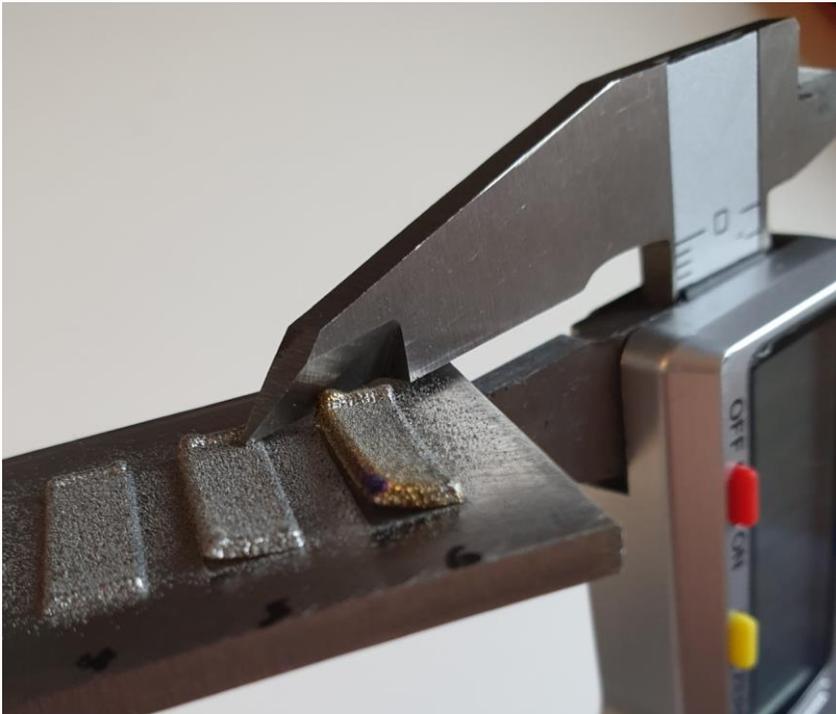
Durch eine Fotografie der Struktur kann ein Versagensbild festgehalten und dadurch die Höhenmessung digitalisiert stattfinden. Die Anzahl an Pixel zur Darstellung der Delamination kann auf der Fotografie abgezählt und mit Vergleichswerten abgeglichen werden. Hierbei können Messwerte unterhalb eines Millimeters erfasst werden. Die Grenze bildet die Größe eines Pixels in der jeweiligen Darstellung. Hilfsmittel wie der digitale Zoom machen das Verfahren genauer.

### 3.4.2 Der Anbindungspunkt

Verringerungen der Delamination von Strukturen, welche die Mindesthöhe nicht erreichen, können in der geringen Aufbauhöhe begründet sein statt durch aktiver Einflussnahme im Prozess. Diese Verringerungen bergen das Risiko einer Täuschung und können nicht als positives Ergebnis verstanden werden. Es muss daher eine Messung über die Aufbauhöhe erfolgen.

Zur Bestätigung der Aufbauhöhe eignet sich der Anbindungspunkt. Er ist der Punkt der Struktur mit der geringsten bzw. ohne eine Delamination. Er hat ebenfalls die geringste oder keine Verdrehung wodurch Messungen an dieser Stelle keine oder nur geringe Fehler durch entstandene Winkel beinhalten.

Abbildung 49 zeigt eine Beispielmessung am Anbindungspunkt mit einem Messschieber.



**Abbildung 49: Messung der Auftragsdicke von 5 Schweißschichten am Anbindungspunkt.**

Die Messung am Anbindungspunkt kann durch einen Messschieber ausreichend genau stattfinden. Im Gegensatz zur Delaminationshöhe wird hierbei nur eine Mindesthöhe überprüft. Ist diese überschritten so ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben und eine verringerte Delamination kann als positives Ergebnis eingestuft werden.

Aufgrund des kleinen Messbereichs im Mikrometerbereich und der damit verbundenen Schwankungen im Messschieber wird stets 3 mal in unmittelbarer Nähe des Anbindungspunktes gemessen. Aus den Messdaten wird jeweils ein Mittelwert gebildet.

### **3.4.3 Varianz der Aufbauhöhen und Angabe der Schichtanzahl**

Das LPA, wie andere Schweißprozesse auch, unterliegt einer Reihe an unterschiedlichen Einflussfaktoren. Sie sind dermaßen zahlreich, dass aktuell keine vollständige Erklärung über die Einflussfaktoren und der Wechselwirkungen untereinander vorhanden ist. [LEANDER]

Sowohl menschliche (z.B. Bedienererfahrung), werkstofftechnische (z.B. Materialeigenschaften) oder prozessbedingte Faktoren (z.B. Vorschubgeschwindigkeit) sind aufzählbar. Im Anhang A.1 ist ein Ishikawa-Diagramm mit einer Vielzahl an weiteren Faktoren zu sehen. [LEANDER]

Im Rahmen dessen ist eine theoretische Schichthöhe einprogrammiert. Der Wert weicht jedoch aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen in der Realität ab. Der theoretische Wert ist im Standardparametersatz in Abschnitt 3.2 erfasst und beträgt für eine Schichthöhe  $h = 210$  Mikrometer. Für 5 Schichten beträgt die theoretische Schichthöhe somit 1,05 mm. In der Realität beträgt die resultierende Schichthöhe für 5 Schichten zwischen 0,73 mm und 0,77 mm.

Eine Bestätigung eines erfolgreichen Aufbaus von 5 Materialschichten also einer Aufbauhöhe von mindestens 0,73 mm muss erfolgen.

Im weiteren Verlauf wird aufgrund der Übersicht und Vergleichbarkeit die Schichtanzahl mit angegeben. Da die tatsächliche Aufbauhöhe in der Realität variieren kann wird zudem immer die Aufbauhöhe genannt. Mit der Erwähnung einer Schichtanzahl ist die programmierte Schichtanzahl gemeint.

### **3.4.4 Farbeindringprüfung zur Bewertung von Dichtflächen**

Zur Erfüllung der Anforderungen zum dichten, bündigen Schließen von Kontaktflächen ist die Verringerung der Delaminationshöhe vorteilhaft aber nicht ausreichend. Die Dichtigkeit einer Verbindung kann aufgrund von Mikrorissen oder Kavitäten beeinträchtigt sein. Zur Validierung von Mikrorissen bzw. Kavitäten kann der Farbeindringtest durchgeführt werden.

Während des Farbeindringtests wird ein magentafarbener Farbstoff mit geringer Viskosität auf eine Probe gegeben. Durch die geringe Viskosität und des Kapillareffekts dringt der Farbstoff in Zwischenräume wie z.B. in Risse, Kavitäten oder Delaminationen ein. Anschließend wird die Probe gesäubert und von Farbeindringmittel befreit.

Im nächsten Schritt wird eine Entwicklerflüssigkeit aufgesprüht. Sie zieht die zurückgebliebenen Farbreste aus den Hohlräumen.

An Orten, an denen die Farbe, durch den Entwickler, nach Außen tritt ist sie in Zwischenräume und Kavitäten eingezogen und aufgrund dessen, nach der Säuberung, noch vorhanden. Zwischenräume, also Risse und Delaminationen, können mit dieser Methode, für das Auge oder unter dem Mikroskop, sichtbar gemacht werden. [WEIßBACH]

### 3.5 Ableitung von Zielkriterien aus den Anforderungen an metallische Dichtflächen

In Abschnitt 2.3 wurden Anforderungen an metallische Dichtflächen aufgelistet. Die folgenden Zielkriterien sind aus den Anforderungen abgeleitet und sollen der Erfüllung der Anforderungen zuwirken bzw. diese erfüllen.

1. Das primäre Zielkriterium ist die Verringerung der Delaminationshöhe einer Struktur mit 5 Schichten d.h. bei einer Aufbauhöhe von mindestens 0,72 mm. Die Messung der Aufbauhöhe soll am Delaminationspunkt stattfinden und stellt die Vergleichbarkeit der Proben sicher.

Strukturen mit weniger als 5 Schichten delaminieren nicht. Strukturen mit 4 Schichten bilden Risse als Vorstufe der Delamination. Strukturen mit weniger als 4 Schichten sind riss- und delaminationsfrei.

Das Optimum bildet eine Delaminationshöhe von  $H = 0$  mm und ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass es keine Delamination gibt.

Durch die sich wiederholende Form der Delamination sind Proben untereinander vergleichbar.

Es konnte durch Versuche eine Delaminationshöhe zwischen 0,72 mm und 0,92 mm festgestellt werden bei einer Aufbauhöhe von mindestens 0,72 mm bzw. 5 Aufbauschichten.

Verringerungen dieser Höhe wirken dem Zielkriterium positiv zu d.h. Delaminationsverringern sind ebenfalls als positive Ergebnisse einzustufen.

Bezug zu den Anforderungen in Abschnitt 2.3 „Anforderungen an metallische Dichtflächen“:

Eine Verringerung der Delaminationshöhe erfüllt die Anforderungen 1 und 2. Wird die Delamination verringert, dann kann ein Dichtungseffekt stattfinden bzw. der Leckverlust durch ein bündiges Schließen der Kontaktflächen in Toleranzgrenzen gehalten werden.

2. Das sekundäre Zielkriterium ist die Vermeidung einer Rissbildung bzw. die Verringerung der Risslänge bei einer Aufbauhöhe von mindestens 0,72 mm. Als Optimum kann eine Risslänge von 0 mm angegeben werden mit der Aussage, dass bei dieser Länge keine Rissbildung stattgefunden hat.

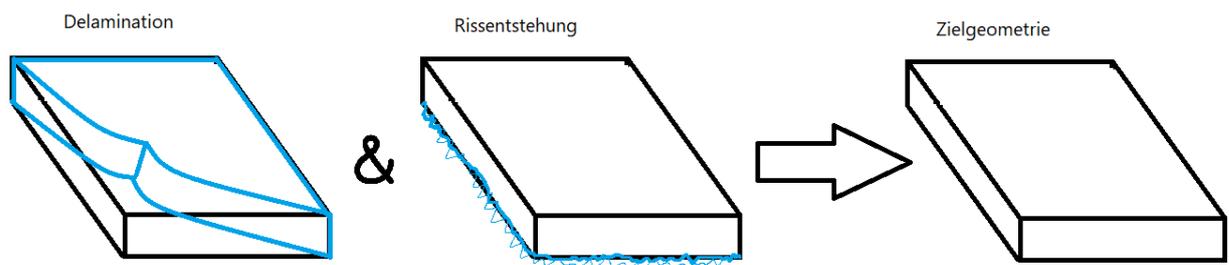
Man könnte annehmen, dass eine Verringerung der Risslänge dem Zielkriterium zu wirkt. In Versuchen wurde eine große Abweichung zwischen gemessenen Risslängen festgestellt, sodass eine Verringerung der Risslänge nicht unmittelbar als positives Ergebnis gedeutet werden kann. Für diesen direkten Zusammenhang sind Einflüsse von lokalen, thermischen Effekten und Materialschäden zu groß als das die Berechnung eines Mittelwerts aussagekräftig wäre.

Die aufgebauten Strukturen haben ein Versagensbild, dass durch einen einzigen Riss mit unterschiedlicher Länge gekennzeichnet ist. Die Messgrößen Rissanzahl und Rissdichte sind somit für die Betrachtung ungeeignet.

Bezug zu den Anforderungen in Abschnitt 2.3 „Anforderungen an metallische Dichtflächen“:

Die Vermeidung einer Rissentstehung erfüllt die Anforderungen 1 und 2. Wird die Rissentstehung verhindert, dann kann ein Dichtungseffekt stattfinden bzw. der Leckverlust durch ein bündiges Schließen der Kontaktflächen in Toleranzgrenzen gehalten werden.

Eine Übersicht in Abbildung 50 verdeutlicht den Sachverhalt.



| Zielkriterium:  | Erfüllte Anforderung:   |
|---|---|
| Vermeidung von<br>Delamination<br>&<br>Rissentstehung | 1. Der Dichtungseffekt bzw. das Trennen von Stoffen innerhalb vorgegebener Grenzen (innerhalb tolerierbarer Leckverluste).<br>2. Das bündige Schließen zwischen den Dichtflächen bzw. ein Leckquerschnitt innerhalb der Toleranzgrenzen |

**Abbildung 50: Eine Zusammenstellung von Zielkriterien und zuvor festgelegten Anforderungen. In blau sind die Materialdefekte zu sehen. Die Vermeidung dieser führt zur Erfüllung von Anforderungen aus Abschnitt 2.3 und zur Zielgeometrie.**

### 3.6 Festsetzung von Versuchsinhalten unter Zuhilfenahme der physikalischen Hintergründe

In vorherigen Abschnitten wurden 2 Gründe für die Delamination und Rissbildung genannt:

1. Entstehung von Spannungen aufgrund von hohen Temperaturgradienten.
2. Entstehung eines rissanfälligen Gefüges aufgrund von intermetallischen Phasen.

Es ist also naheliegend den Temperaturgradienten zwischen den Schichten zu verringern bzw. die Gefügezusammensetzung zu ändern. Es sind diverse Möglichkeiten dazu vorstellbar.

Mögliche Einflussnahme im Prozess:

1. Verringerung der Gefügeunterschiede durch gradierte Werkstoffe.
2. Verringerung des Temperaturgradienten durch Vorwärmen mit dem Laser.
3. Verringerung des Temperaturgradienten durch Vorwärmen in einem Ofen.
4. Verbesserung der Art und Menge der Wärmeleitung bzw. Verringerung des Temperaturgradienten durch eine vergrößerte Anbindungsschicht.
5. Kontrolle des Nickelgehalts zur Unterdrückung der Entstehung von spröden Phasen.
6. Verringerung der Rissanfälligkeit durch Vermeidung von scharfkantigen Porositäten im Werkstoff.

Es sind zahlreiche Einflussnahmen möglich. Aufgrund des Umfangs der Abschlussarbeit beschränkt sich die Ausarbeitung auf folgende Punkte:

1. Vorwärmen in einem Ofen:

Zur Verringerung des Temperaturgradienten kann die Substrat-Platte in einem Ofen vorgewärmt werden. Der Ofen bietet Vorteile im Rahmen der Benutzersicherheit sowie die Möglichkeit die Temperatur des Substrats zu kontrollieren. Es wird angenommen, dass eine kontrollierte Haltetemperatur sowie die Möglichkeit die Substrat-Platte vollständig und gleichmäßig zu erwärmen sich positiv auf den Prozessverlauf auswirken.

2. Vorwärmen mit dem Laser:

Eine zeitsparende Methode bei der die vorhandene Systemtechnik genutzt wird. Sowohl Wirtschaftlichkeit als auch die Einfachheit sind hier ausschlaggebend. Das Vorwärmen kann nahtlos in den Schweißprozess, durch eine entsprechende Programmierung, integriert werden.

Im Zuge der Einfachheit wird davon ausgegangen, dass es weniger Verzögerungen durch externe Gerätschaften gibt und ebenfalls ein Zeitvorteil resultiert.

3. Vergrößerte Anbindungsschicht:

Diese Methode erfordert keine zusätzliche Systemtechnik. Die Programmierung kann in die vorhandene Programmierung integriert werden. Versuche an anderen Werkstoffen zeigten vielversprechende Ergebnisse.

Es ist davon auszugehen, dass sich aufgrund der Wärmeleitung über den gleichen Werkstoff ein positiver Effekt einstellt.

Andere Methoden wie z.B. die gradierten Werkstoffe, also den stufenfreien Übergang eines Werkstoffs in einen anderen, müssten manuell eingestellt werden. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass mangels Präzision dabei Inkonsistenzen auftreten.

Die Methode der Kontrolle des Nickelgehalts teilt sich die gleiche Problematik. Durch die feine Abstimmung der Zusammensetzung von Nickel zu Titan fällt die fehlende Präzision dabei stärker ins Gewicht. Es kann der Verlust des Formgedächtnis-Effekts resultieren.

Die Vermeidung von Porositäten könnte darin resultieren, dass keine Veränderung der Ergebnisse festzustellen sind. Die Methode eignet sich besser um Rissbildungen innerhalb eines Werkstoffs zu verringern. Da wir im Prozess keinen oder nur wenig Einfluss auf die Substrat-Platte haben kann in der ersten geschweißten Schicht trotz dichtem Auftragsmaterial eine Rissbildung zwischen diesem und der Substrat-Platte stattfinden, da in der Übergangsschicht weiterhin Porositäten auftreten können.

### Optimierungen zur Verbesserung der Spannweite der Ergebnisaussagen

Für die ausgewählten Methoden soll eine Optimierung stattfinden um weitere Aussagen über die Resultate und besonders über die Spannweite der Ergebnisse treffen zu können.

Zusätzlich können die Ergebnisse im Hinblick auf Kostenersparnis, Wirtschaftlichkeit, Einhaltung von Sicherheitskriterien und Erarbeitung von optimalen Schweißbedingungen verbessert werden.

Die Möglichkeit der Optimierung hängt von den Ergebnissen ab und wird den Versuchen dynamisch zugetragen. Ein Ergebnis, dass durch eine Nachuntersuchung nachweisbar Zielkriterien erfüllt, kann im Anschluss zur Nachuntersuchung Optimiert werden. Eine Optimierung eines negativen Ergebnisses soll aus Gründen der geringen Relevanz vermieden werden.

Dafür soll nachfolgend eine versuchsindividuelle Strategie dargelegt werden:

#### Vergrößerte Anbindungsfläche:

Aufgrund der kostenintensiven Legierung von Nickel-Titan ist eine Verringerung der Anbindungsfläche wirtschaftlich sinnvoll. Außerdem kann auf diese Art eine Aussage über das Verhalten des Werkstoffs in Abhängigkeit von der Größe der Anbindungsfläche während des LPA getroffen werden.

Es wird versucht den Schweißprozess stabil zu halten bei gleichzeitiger Verringerung des Materialaufwands.

Im Flugzeugbau-Kontext kann hierbei ein sekundärer, wirtschaftlicher Gedanke berücksichtigt werden. Durch die Materialersparnis erfolgt eine Gewichtsreduktion. Die Nutzlast (Payload) kann gesteigert werden. Die Wirtschaftlichkeit eines Transportmittels steigt.

#### Vorwärmen mittels Laser:

Im Rahmen einer Optimierung sollen die Prozessparameter dahingehend verändert werden, dass ein stabiler Prozess mit möglichst wenig Gefügeänderung bzw. mit möglichst hoher Materialschonung resultiert.

Im Hinblick auf den Formgedächtnis-Effekt ist es vorteilhaft die Substrat-Platte und sein Gefüge möglichst unverändert zu lassen. Es soll der Verlust des Formgedächtnis durch eine unkontrollierte Erhöhung des Titan-Anteils, aufgrund von Verflüssigungen des Substrats, vermieden werden.

#### Vorwärmen mit dem Ofen:

Aufgrund der hohen Temperaturen bzw. der hohen Wärmemenge ist eine Überprüfung der Prozessstabilität in Abhängigkeit von der Temperatur zu leisten.

Eine Untersuchung von Nutzen und Aufwand soll Aufschluss darüber gegeben ob und in wie weit die Temperatur gesenkt werden kann bzw. ob positive Effekte aufgrund von höheren Temperaturen auftreten.

## 4 Durchführung von Versuchsreihen sowie Nachuntersuchung von Proben

### 4.1 Auslegung von Versuchsreihen

Zur Umsetzung einer Versuchsstrategie für die ausgewählten Methoden aus dem vorherigen Abschnitt soll eine Versuchsauslegung mit Überlegungen zur Versuchsdurchführung stattfinden.

#### 4.1.1 Vergrößerte Anbindungsfläche

Für diese Methode kann auf externe Systemtechnik verzichtet werden. Die Befehle für eine vergrößerte Anbindungsfläche werden als Befehlspaket, als ein so genannter Job, in der OrlasSuite Anwendung erstellt. Danach kann der Job für den Standard-Parametersatz eingegeben werden. Dieser Vorgang ist für das Vorbelichten mittels Laser identisch.

Einen Eintrag für einen Job im Strukturbaum der Anwendung kann man der Abbildung 51 entnehmen.

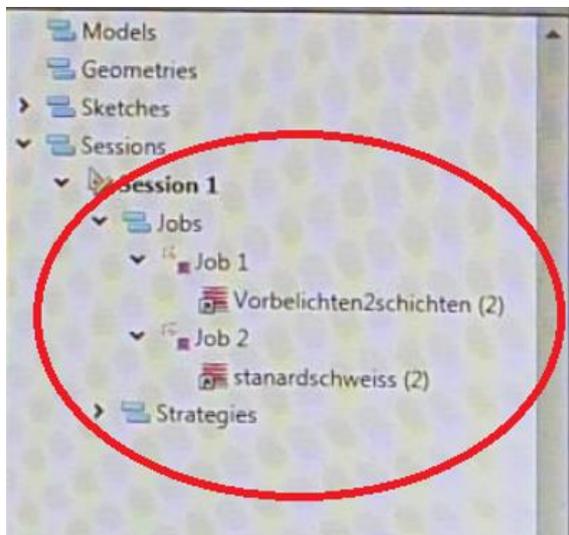
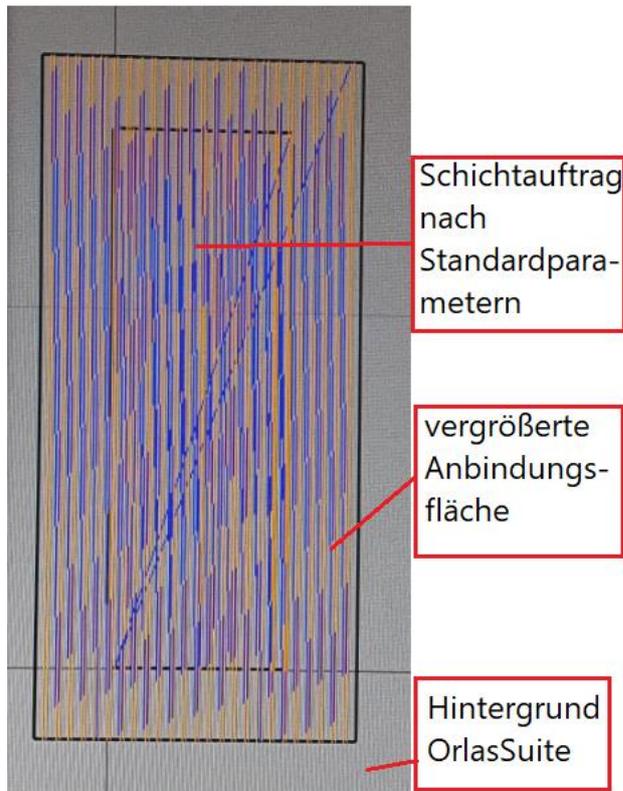


Abbildung 51: Strukturbaum der OrlasSuite Anwendung. Dargestellt sind beispielhaft 2 Einträge für Befehlspakete bzw. Jobs.

Die Vergrößerung soll mindestens 3 Spurbreiten von jeweils 1 mm betragen. Die aufgetragene Fläche wird dadurch nahezu verdoppelt.

Nachfolgende Abbildung 52 zeigt die Geometrien innerhalb der Anwendung.



**Abbildung 52:** Zu erkennen ist die Darstellung der zu erzeugenden Geometrien. Das innere, orangene Rechteck ist die Geometrie nach Standard-Parametern. Das äußere, orangene Rechteck ist die vergrößerte Anbindungsfläche. Der graue Hintergrund ist Teil der Computer-Anwendung.

Es sollen 3 Schichten mit der vergrößerten Fläche geschweißt werden bevor der Standardparametersatz geschweißt wird da Geometrien mit 3 Schichthöhen keine Instabilitäten zeigten. Um weitere Einflüsse auszuschließen wird nur die Fläche vergrößert. Der Standardparametersatz für das Schweißen wird nicht verändert.

#### 4.1.2 Vorwärmen mittels Laser

Für die Methode des Vorwärmens mit dem Laser soll im ersten Schritt ein möglicher Parametersatz ausgewählt werden. Die Zieltemperatur beträgt 450°C da ähnliche wissenschaftliche Arbeiten sich in diesem Temperaturbereich bewegen.

Der Standardparametersatz soll das Substrat aus Titan aufschmelzen. Es wird also örtlich eine Temperatur von 1600°C überschritten. Für das Vorbelichten, also das Vorwärmen, ist dieser Parametersatz zu aggressiv.

Als eine Bedingung soll hierbei gelten, dass das Substrat und sein Gefüge beim Vorwärmen möglichst geschont werden. Gefügeänderungen und Temperaturspitzen sollen vermieden werden.

Es wird deshalb darauf geachtet die Strahlintensität zu verringern. Zur Verringerung wird der Laserfokus auf den maximalen Wert von 3,6 mm Durchmesser gesetzt. Dadurch erhöht sich gleichzeitig die belichtete Fläche und das Einbringen von Wärmeenergie verteilt sich auf einer größeren Fläche.

Ein weiterer Gesichtspunkt für einen schonenden Prozess ist die Anzahl an Vorbelichtungen. Die Wärmeeinbringung soll nicht durch einen einzigen Vorbelichtungsvorgang stattfinden sondern auf eine Vielzahl von Vorbelichtungen aufgeteilt werden.

Eine Vorbelichtung ist das einmalige Abfahren eines vorprogrammierten Bewegungsmusters entlang der Substrat-Platte. Es wird der Bereich um die späteren Schweißschichten belichtet. Dabei ist zu allen Seiten ein Offset von 1,56 mm aufgrund des vergrößerten Laserfokus eingehalten wurden. Die belichtete Fläche ist größer als die Fläche der Schweißschichten.

Die Tabelle 7 fasst die Parameter für das Vorbelichten zusammen.

Tabelle 7: Die Tabelle stellt die Vorbelichtungsparameter übersichtlich da.

| Prozessparameter          | Wert     | Einheit                     |
|---------------------------|----------|-----------------------------|
| Laserleistung             | 106      | Watt                        |
| Vorschubgeschwindigkeit   | 8        | mm/s                        |
| Laserfokus (Durchmesser)  | 3,6      | mm                          |
| Tellerdrehzahl            | 1,5      | 1/min                       |
| Sauerstoff-Wert           | 50...150 | ppm (particles per million) |
| Schicht-Überlappung       | 65       | Prozent %                   |
| Schichthöhe               | 210      | Mikrometer                  |
| Kinetik: Shift Angle      | 180      | Grad                        |
| Kinetik: unidirektional   | /        | /                           |
| Anzahl an Vorbelichtungen | 2...20   | /                           |

Es soll zu Beginn mit dem abgeschwächten Parametersatz geschweißt werden. Änderungen werden dem Prozess dynamisch zugetragen das heisst, dass Änderungen erst dann vorgenommen werden wenn Ergebnisse untersucht worden sind und sich daraus Änderungen für den nächsten Schweißprozess ableiten lassen.

Die Versuche sollen einen gewählten Parametersatz mit variabler Anzahl an Vorbelichtungen abdecken. Es wird mit 2 Vorbelichtungen begonnen und mit einer Schrittweite von 2 sollen zuletzt 10 Vorbelichtungen stattfinden. Dadurch wird der Wärmeeintrag schrittweise erhöht.

Es entsteht eine Zeitraffer-Aufnahme bzw. Timelapse von Proben auf einer Platte. Die Proben können dadurch einfacher untereinander verglichen werden. Darüberhinaus soll die erste Probe auf der Platte mit einer Vorbelichtungsanzahl von 0 geschweißt werden. Das entspricht dem Standardparametersatz und soll den erzeugten Proben eine Vergleichsgeometrie bieten.

#### 4.1.3 Vorwärmen im Veraschungs-ofen

Durch die Temperaturanzeige des Ofens kann eine Temperaturbestimmung des Substrats stattfinden. Der Ofen wird auf die Zieltemperatur vorgewärmt und es wird ausreichend Zeit zum durchwärmen eingehalten (min. 20 min).

Da der Ofen ca. 5 m vom Laser entfernt steht muss eine Abkühlphase berücksichtigt werden. Nicht nur die Distanz sondern auch Schwierigkeiten beim Herausholen aus dem Ofen (heißer, schwerer Block) sowie beim Einsetzen in die Schutzgaskammer (Schutzgaskammer verfügt über temperatursensible Dichtungen die keinen Kontakt mit dem heißen Block haben dürfen) verzögern den Schweißprozess und verlängern eine Abkühlphase. Die Umgebungstemperatur beträgt dabei 23°C. Die Zeit vom Ofen bis zum Startzeitpunkt des Schweißens beträgt zwischen 2 min 13 s und 2 min 38 s. Das entspricht der Zeitspanne des Abkühlens.

Durch Überlegungen wird angenommen, dass eine Substrat-Platte mit einer Masse von ca. 27 Gramm nur wenig Wärmeenergie speichert. Die Abkühlzeit kann ausreichend sein damit das Substrat vor Schweißbeginn einen relevanten Teil der Wärmeenergie verliert.

Zur besseren Wärmespeicherung kann die Masse eines Systems erhöht werden. In der Versuchsdurchführung wird die Masse durch 2 Stahlblöcke mit jeweils einem Gewicht von 1953 Gramm erhöht, zu sehen in Abbildung 53. Das Gewicht des Gesamtsystems beträgt somit 3933 Gramm.



**Abbildung 53: Stahlblock zur Erhöhung der Gesamtmasse sowie zur Aufnahme der Substrat-Platte.**

Die Substratplatte wurde auf die Stahlblöcke, mithilfe von Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben, eingespannt und die Zieltemperatur im Ofen einprogrammiert.

Für die Optimierung werden alle Vorgänge wiederholt und weitere Temperaturen im Ofen einprogrammiert.

## 4.2 Experimentelle Versuchsdurchführung von Prozessparametern in der Aufbaustrategie

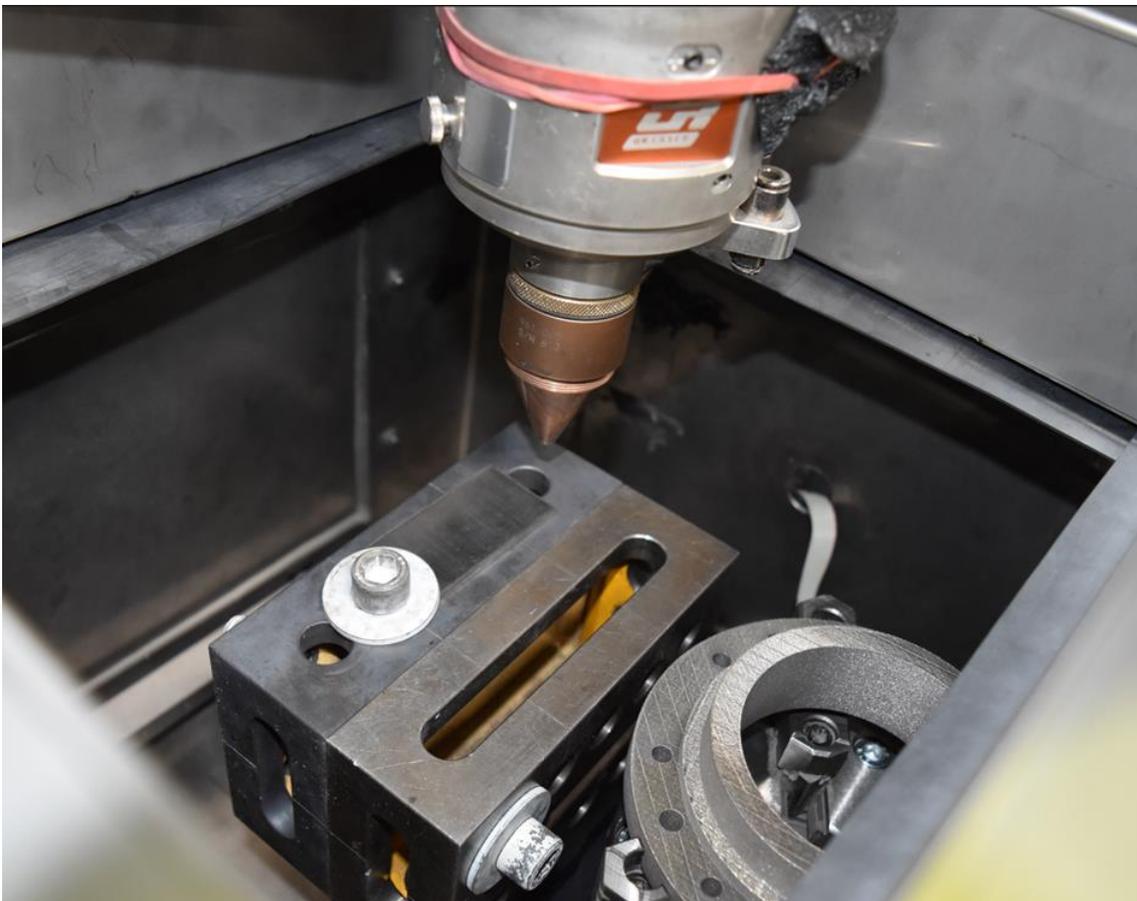
In diesem Abschnitt sollen die Überlegungen aus dem vorherigen Abschnitt in einer Versuchsdurchführung umgesetzt werden.

### 4.2.1 Vergrößerte Anbindungsfläche

Zu Beginn befindet sich die Substrat-Platte in der Schutzgaskammer auf einem Stahlblock platziert. Die Kammer wurde abgedichtet und ein Gasmassenstrom mit Argon fließt in die Kammer. Ein Sauerstoffsensor misst dabei die Anzahl an Sauerstoff-Partikeln im System. Ist der Wert von 150 ppm unterschritten wird mit dem Schweißen begonnen.

Der Schweißkopf wurde über den gewünschten Startpunkt platziert und befindet sich in 8 mm Höhe zur Substrat-Platte.

Die Abbildung 54 zeigt den Sachverhalt.



**Abbildung 54: Ausgangssituation vor jedem Schweißbeginn.**

Die folgenden Ausführungen zum Schweißprozess und die Ausgangssituation in Abbildung 54 wiederholen sich für alle Versuche. Abweichungen werden, soweit sie vorhanden sind, hervorgehoben:

Für den Schweißprozess wird, nach Erreichen von unter 150 ppm, der Pulverförderer eingeschaltet. Die Drehzahl ist im Standardparametersatz mit 1,5 U/min hinterlegt. Die Befehlspakete werden durch die Orlas-Anwendung mit dem Befehl „send trajectory“ in den Speicher des Lasers geladen.

Durch Betätigen der Schutzverriegelung und drücken des Ein-Schalters wird der Schweißprozess gestartet.

Die Bedienelemente werden in Abbildung 55 gezeigt.



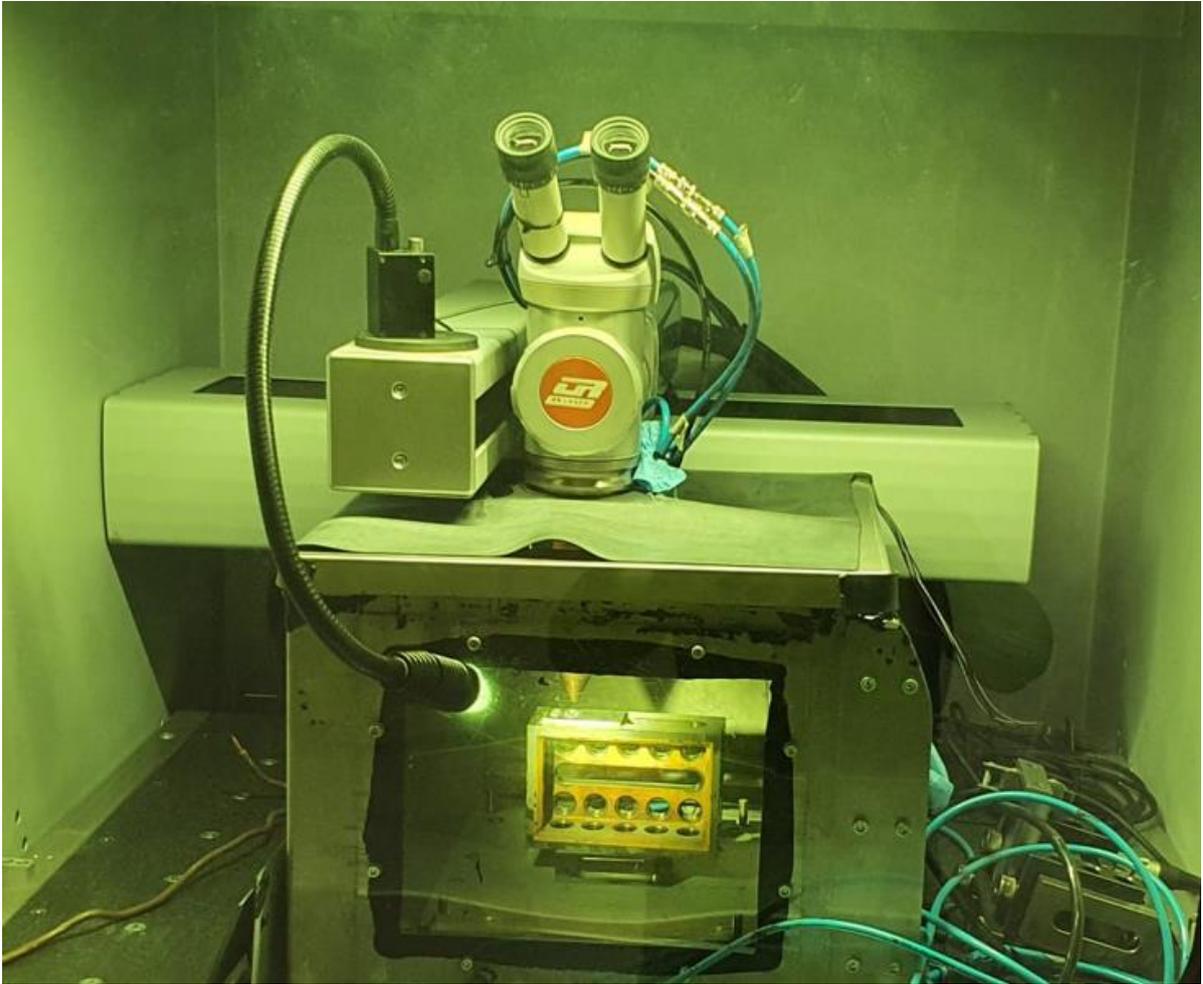
Abbildung 55: Zu erkennen sind sicherheitsrelevante Bedienelemente.

Nachdem die Befehlspakete ausgeführt sind beendet das System den Vorgang selbstständig und das Schutzgas kann abgestellt werden. Die Substrat-Platte kann vorsichtig mit Schutzhandschuhen entnommen werden.

#### 4.2.2 Vorwärmen mittels Laser

Der Ablauf ähnelt dem Ablauf des Versuchs mit der vergrößerten Anbindungsfläche.

Die Ausgangssituation ist in Abbildung 56 dargestellt.



**Abbildung 56:** Die Abbildung zeigt den Beginn des Schweißprozesses. Die grüne Färbung stammt von der Färbung des Schutzglases.

Die Substrat-Platte wird unter einer Schutzgasatmosphäre, positioniertem Schweißkopf und auf einem Stahlblock liegend in der Kammer erwärmt. Dazu wird der Vorbelichtungsparametersatz als Befehlspaket sowie der Standard-Parametersatz in den Speicher des Lasers geladen.

Zu erst führt der Laser den Vorbelichtungsbefehl aus. Dazu wurde der Laserfokus auf 3,6 Millimeter gestellt. Der Laser wird freigegeben und eingeschaltet.

Nachdem die Vorbelichtung beendet wurde werden die programmierten Befehle pausiert um den Pulverförderer einzuschalten und den Laserfokus auf 0,48 mm einzustellen. Im Anschluss wird der Schweißprozess nach Standardparametern gestartet und vom System selbstständig beendet. Dieser Vorgang dauert nur wenige Sekunden um den Wärmeverlust niedrig zu halten.

Um eine Zeitraffer-Aufnahme bzw. Timelapse erstellen zu können wurden im Anschluss Iterationen des Versuchs geschweißt. Dazu wurde nach erfolgtem Schweißprozess das neue Befehlspaket mit mehr Vorbelichtungen in den Speicher des Lasers geladen und der Vorgang wurde wiederholt.

#### 4.2.3 Vorwärmen im Veraschungs-ofen

Versuchsdurchführung: Vorwärmen im Ofen mit einer Zieltemperatur von 450°C:

Zunächst soll das Gesamtsystem mit eingespannter Platte im Ofen erwärmt werden.

Abbildung 57 zeigt das Gesamtsystem aus Blöcken, Unterlegscheiben, Schrauben und Substrat-Platte.



CC

Abbildung 57: Der geöffnete Ofen, das Blocksystem mit der Substrat-Platte sowie eine Hebevorrichtung sind zu erkennen.

Zum Erwärmen wird das System in den Ofen eingesetzt, dargestellt in Abbildung 58.



**Abbildung 58:** Die Abbildung zeigt das Gesamtsystem vor dem Erwärmen.

Nach einer Durchwärmphase von 20 Minuten wurde das System mit der Hebevorrichtung aus dem Ofen entnommen und in die Schutzgaskammer eingesetzt.

Nachfolgend gezeigt in Abbildung 59.



**Abbildung 59:** Die Abbildung zeigt die Ausgangssituation in der Schutzgaskammer vor Beginn des Schweißvorgangs.

Die Abkühlzeit betrug 2 min 22s. Der Aufbau der Schutzgasatmosphäre unter 300 ppm Sauerstoff beansprucht ca. 7 min. Um ein weiteres Abkühlen zu verhindern wird zu erst der Standard-Prozessparametersatz ohne Schutzgasatmosphäre geschweißt. Parallel zum Schweißprozess wird Argon-Gas in die Schutzkammer geleitet.

Nach 7 min 34 s nach der Entnahme aus dem Ofen ist eine Schutzgasatmosphäre mit 300 ppm aufgebaut und der zweite Schweißprozess wird gestartet.

Nach insgesamt 11 min 56 s sind Sauerstoffwerte von 154 ppm erreicht. Ein dritter Schweißprozess wird gestartet.

Versuchsdurchführung: Vorwärmen im Ofen mit einer Zieltemperatur von 550°C:

Der Ablauf ist der gleiche wie für die Zieltemperatur 450°C. Unterschiede gibt es bei den Zeiten und bei der Anzahl an Schweißprozessen:

Es wurde das erste Mal geschweißt nach 2 min 38 s nach der Entnahme aus dem Ofen also ohne Schutzgasatmosphäre. Ein zweites Mal nach dem Aufbau einer Schutzgasatmosphäre von 150 ppm nach 13 min 27 s.

Versuchsdurchführung: Vorwärmen im Ofen mit einer Zieltemperatur von 600°C:

Der Ablauf ist der gleiche wie für die Zieltemperatur 450°C. Unterschiede gibt es bei den Zeiten und bei der Anzahl an Schweißprozessen:

Es wurde einmal geschweißt nach 2 min 15 s nach der Platzierung in der Schutzgaskammer also ohne Schutzgasatmosphäre sowie ein zweites Mal nach dem Aufbau einer Schutzgasatmosphäre von 150 ppm nach 10 min 11 s.

### 4.3 Farbeindringprüfung der erzeugten Proben zur Bestätigung der Ergebnisse

Durch die Farbeindringprüfung soll Aufschluss darüber gegeben werden ob eine Rissbildung stattgefunden hat.

Die relevanten Ergebnisse für eine Farbeindringprüfung sind solche, bei denen man durch die Sichtprüfung nicht ausschließen kann, dass eine Delamination und damit eine Rissbildung stattgefunden hat.

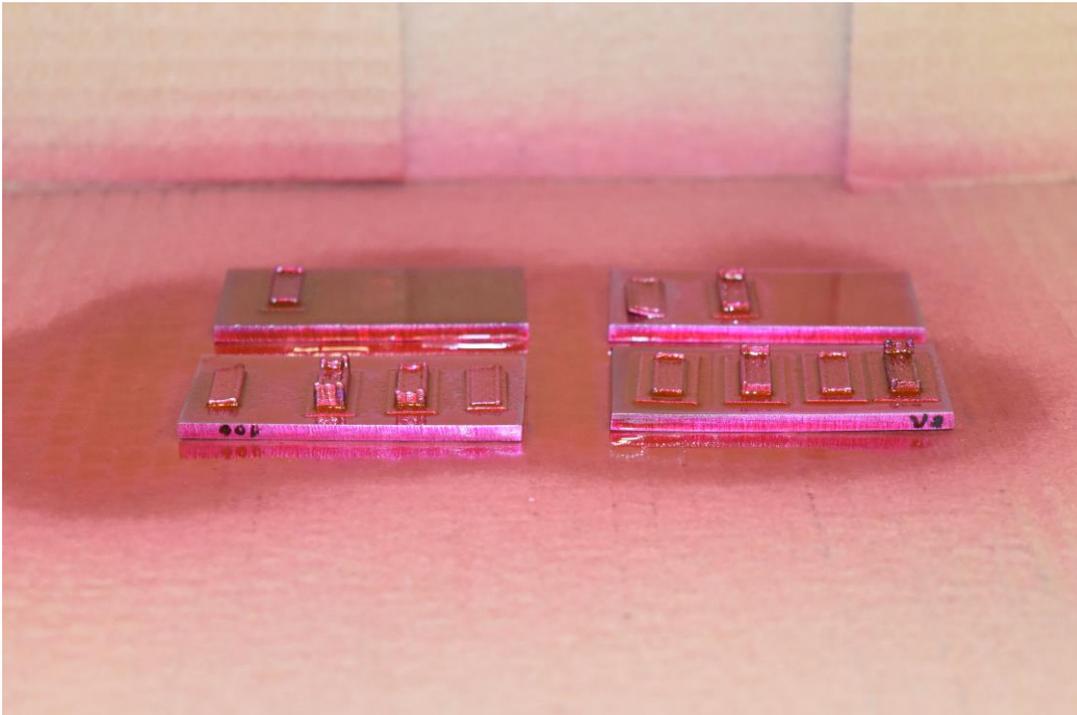
Für Proben, die für das menschliche Auge sichtbare Delaminationen aufweisen, ist eine Farbeindringprüfung nicht notwendig. Die Sichtprüfung liefert die gleichen Ergebnisse, ist jedoch mit weniger Aufwand verbunden.

Die eingesetzten Chemikalien sind in der folgenden Abbildung 60 zu sehen.



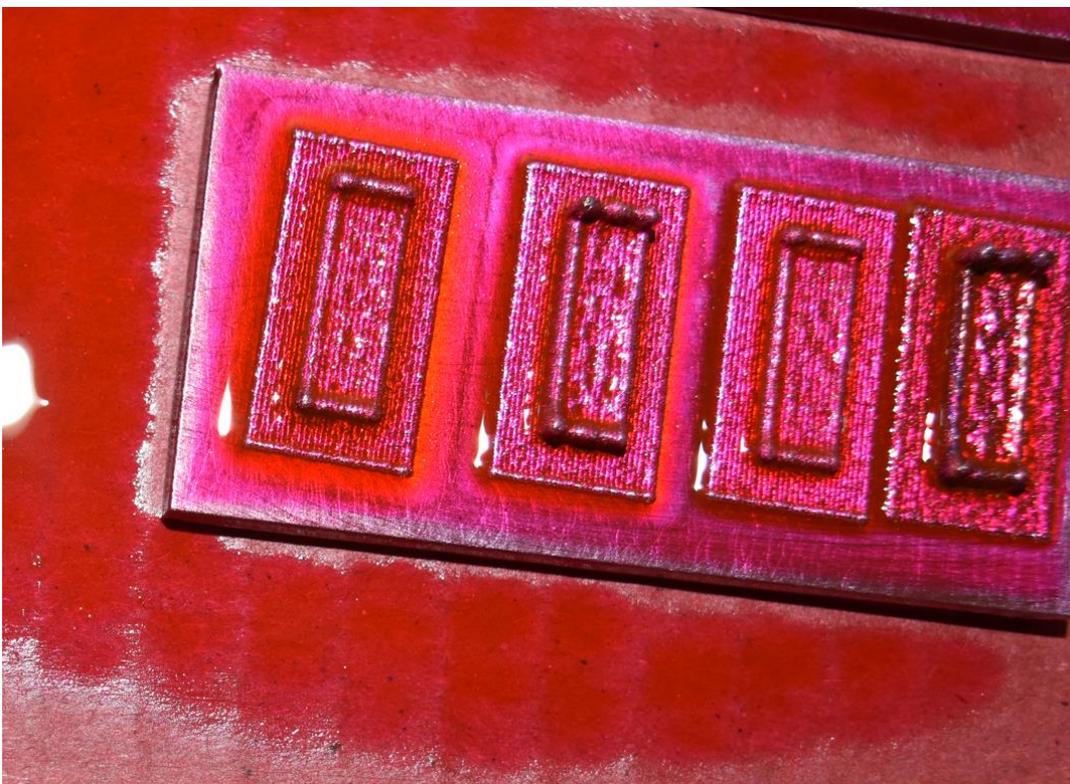
Abbildung 60: Zu sehen ist links das Farbeindringmittel und rechts die Entwicklerflüssigkeit.

Die geeigneten Proben wurden mit Wasser gewaschen und mit der Farbe besprüht, wie in Abschnitt 3.4 erläutert und in Abbildung 61 dargestellt.



**Abbildung 61:** Ausgewählte Proben wurden mit einem Farbeindringmittel benetzt.

Die Abbildung 62 zeigt eine Draufsicht auf die Proben.



**Abbildung 62:** Proben mit vergrößerter Anbindungsfläche unter der magentafarbenen Eindringmittel.

Nach einer Einwirkzeit von ca. 20 min wurde die Farbe mit fließendem Wasser abgespült und zusätzlich mit Alkohol gereinigt. Die Oberfläche wird vollständig von sichtbaren Farbresten befreit.

Im Anschluss wurde der Entwickler aufgesprüht, Abbildung 63 zeigt das Vorgehen.



**Abbildung 63:** Die Entwicklerflüssigkeit verfärbt sich ins milchig-weiße während des Trocknens.

Ist die Entwicklerflüssigkeit vollständig getrocknet dann ist die Prüfung abgeschlossen und die Ergebnisse können ausgewertet werden. Es hat sich eine weiße Pulverschicht auf der Probe gebildet. Farbreste bilden auf dem weißen Hintergrund einen deutlichen Kontrast.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden Ergebnisse und Messdaten diskutiert und eingeordnet. Es wird Bezug zu den Anforderungen an metallische Dichtflächen aus Abschnitt 2.3 und den festgelegten Zielkriterien aus Abschnitt 3.5 genommen.

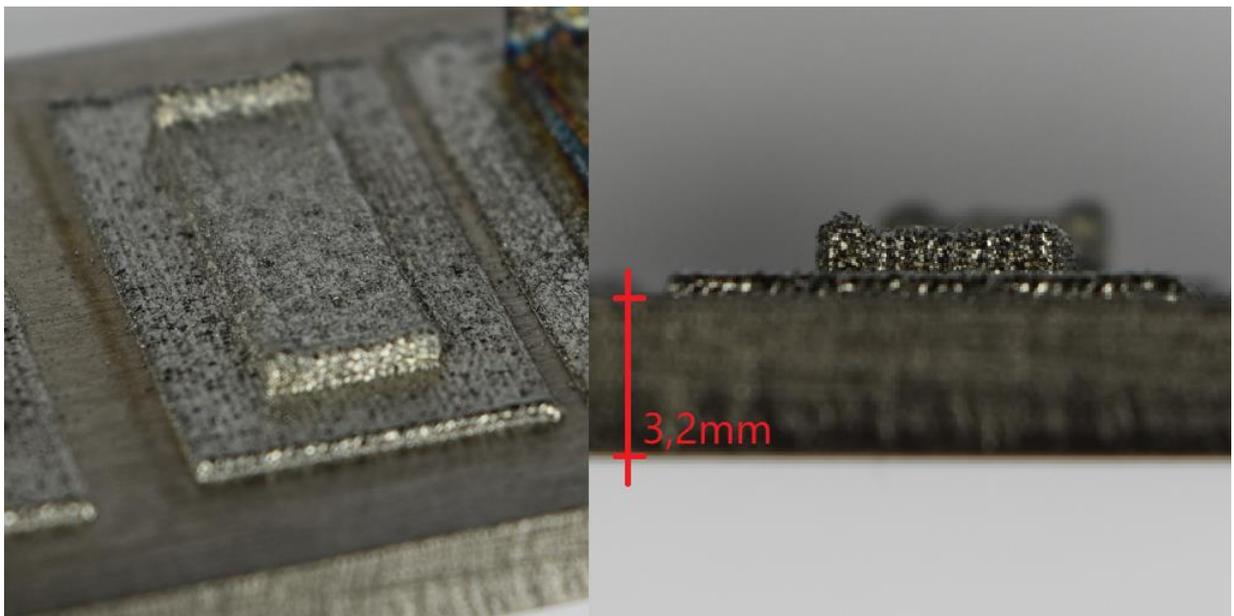
Für die Diskussion der Ergebnisse des ersten Versuchs mit der vergrößerten Anbindungsfläche werden Zielkriterien und Anforderungen aus den vorherigen Abschnitten nochmal vollständig und detailreich genannt. Für die darauf folgenden Versuche wird nur die Erfüllung der jeweiligen Zielkriterien und Anforderungen beschrieben.

### 5.1 Vergrößerte Anbindungsfläche

#### 5.1.1 Untersuchung auf Zielkriterium 1

Für die Versuche mit einer vergrößerten Anbindungsfläche konnte eine Verringerung der Delaminationshöhe gemessen werden. Dadurch wurde das Zielkriterium 1 erfüllt.

Die Abbildung 64 zeigt eine entsprechende Probe (102.3).



**Abbildung 64:** Eine Probe mit vergrößerter Anbindungsfläche in der räumlichen Ansicht sowie in der Vorderansicht.

Es konnte das definierte Optimum aus Abschnitt 3.5 mit einer Delaminationshöhe von 0 mm erreicht werden. Es kann den Ausführungen entsprechend gesagt werden, dass keine Delamination stattfindet.

Durch die Erfüllung von Zielkriterium 1 ist, den Ausführungen in Abschnitt 2.3 entsprechend, die Anforderung 1 für metallische Dichtflächen erfüllt. Ein Dichtungseffekt innerhalb festgelegter Toleranzen kann somit stattfinden.

### 5.1.2 Untersuchung auf Zielkriterium 2

Zur Bewertung der Erfüllung von Zielkriterium 2 wurden Farbeindringprüfungen durchgeführt.

Die folgende Abbildung 65 zeigt die Ergebnisse aus der Farbeindringprüfung.

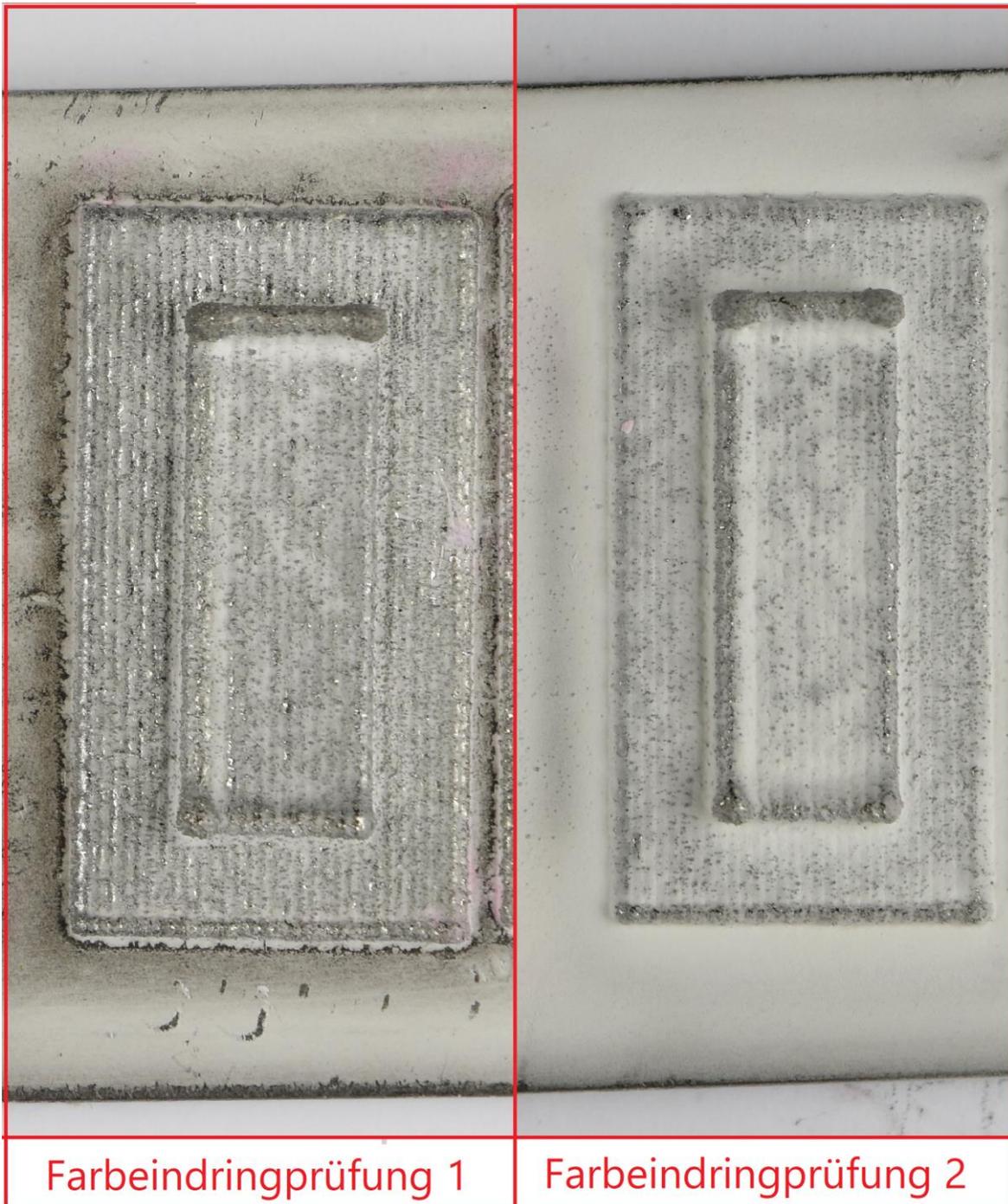
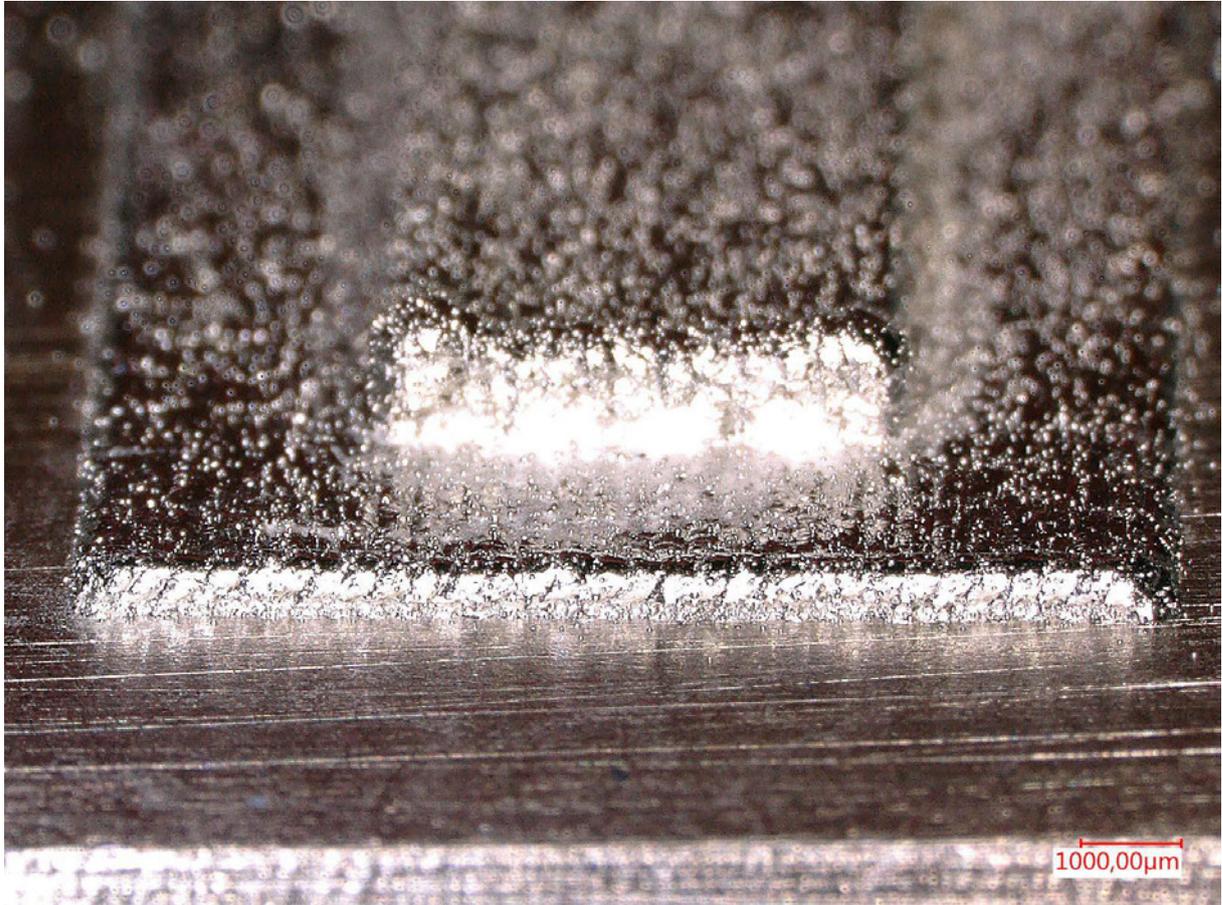


Abbildung 65: Dargestellt sind die Ergebnisse aus 2 Farbeindringprüfungen.

Die erste Farbeindringprüfung hat im unmittelbaren Bereich um die Anbindungsfläche leichte Verfärbungen gezeigt. Es wurde deshalb eine weitere Farbeindringprüfung durchgeführt. Die zweite Farbeindringprüfung zeigte keine Verfärbungen. Die Verfärbung aus der ersten Prüfung sind auf geringe Farbreste und einer unebenen Oberfläche aufgrund von Pulverresten zurückzuführen. Die Probe wurde unzureichend von Farbresten befreit.

Durch die Farbeindringprüfung wurde bestätigt, dass das Zielkriterium 2 ebenfalls erfüllt wurde. Das Optimum, eine Risslänge von 0 mm, konnte erreicht werden. Die Aussage aus Abschnitt 3.5, dass keine Rissentstehung stattgefunden hat ist dadurch zutreffend. Es konnte weder im unmittelbaren Bereich der einstigen Delamination noch in anderen Bereichen eine Rissbildung festgestellt werden.

Eine Analyse unter dem Lichtmikroskop bestätigt das Ergebnis, zu sehen in Abbildung 66.



**Abbildung 66:** Das Bild zeigt den für die Rissentstehung kritischen Ort der Anbindungsfläche.

Es konnte unter dem Mikroskop keine Rissbildung festgestellt werden. Kritische Orte, wie die erste aufgetragene Schicht der Anbindungsfläche, sind in der Abbildung dargestellt und rissfrei.

Im Prozessverlauf konnte eine Schichthöhe von 0,72 mm aufgebaut werden. Die Bedingung für die Vergleichbarkeit der Proben aus Abschnitt 3.5, eine Mindesthöhe von 0,72 mm aufzubauen, ist damit erfüllt. Durch die gegebene Vergleichbarkeit kann die folgende Aussage getroffen werden:

Die Instabilitäten aus Abschnitt 3.3, für Strukturen mit mindestens 5 Schichten bzw. mit einer Mindesthöhe von 0,72 mm, konnten durch die vergrößerte Anbindungsfläche vollständig entfernt werden.

Im weiteren Verlauf wurde eine Probe (106.3) mit einer Aufbauhöhe von 1,42 mm erzeugt. Das entspricht 15 Aufbauschichten. Abbildung 67 zeigt eine Probe mit 1,42 mm Aufbauhöhe.

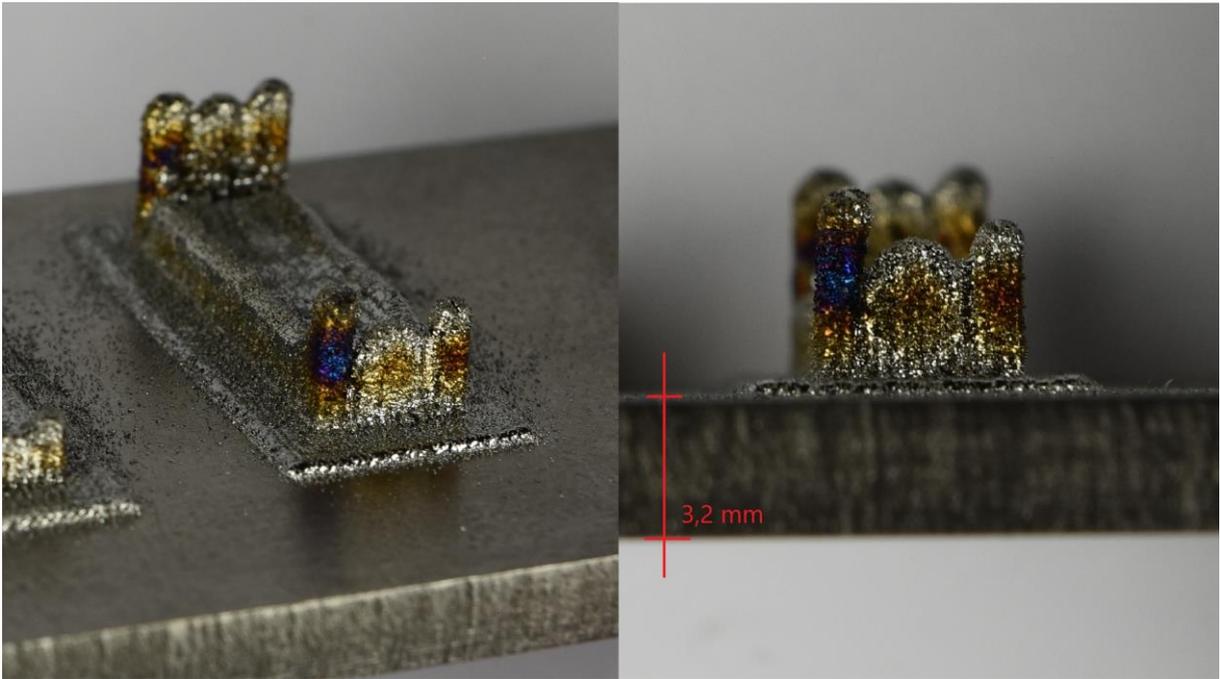


Abbildung 67: Die Gesamthöhe der Struktur beträgt 1,75 mm ohne Beachtung der Wandüberhöhungen. Es wurden 15 Schichten mit einer Höhe von 1,42 Millimeter aufgebaut (ohne die Anbindungsschichten gezählt).

Die Probe war ebenfalls frei von Rissbildungen und Delaminationen. Die Farbeindringprüfungen in Abbildung 68 bestätigen einen rissfreien Auftrag.

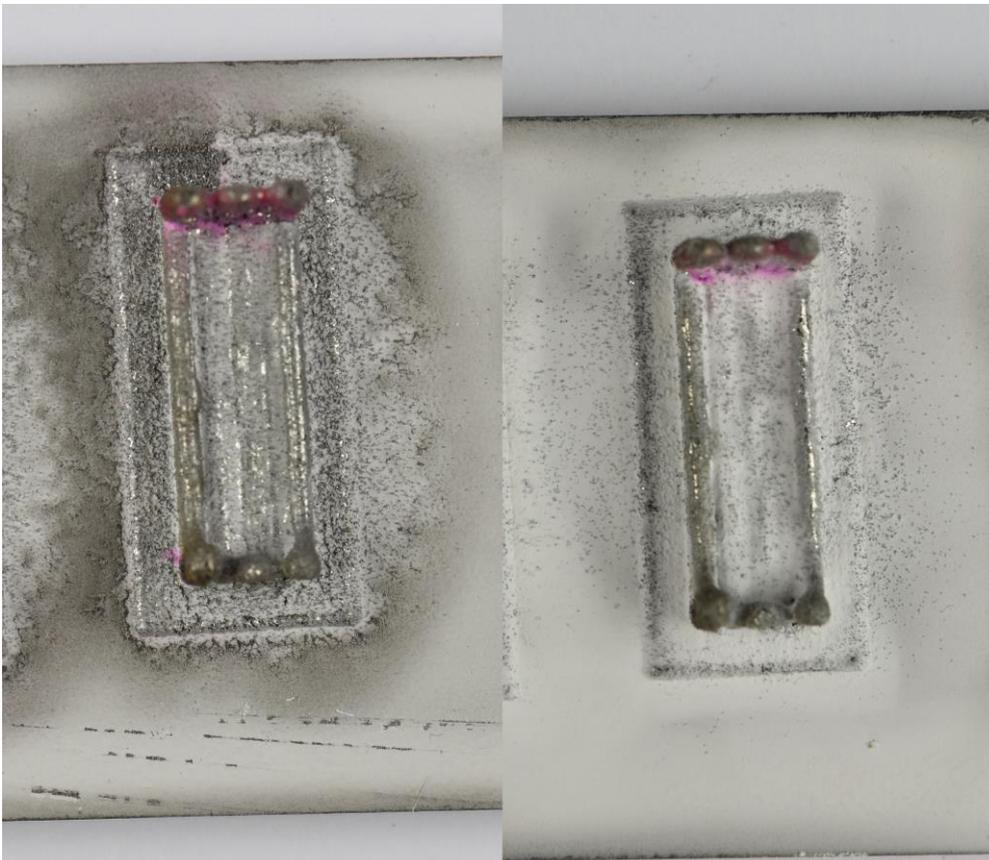
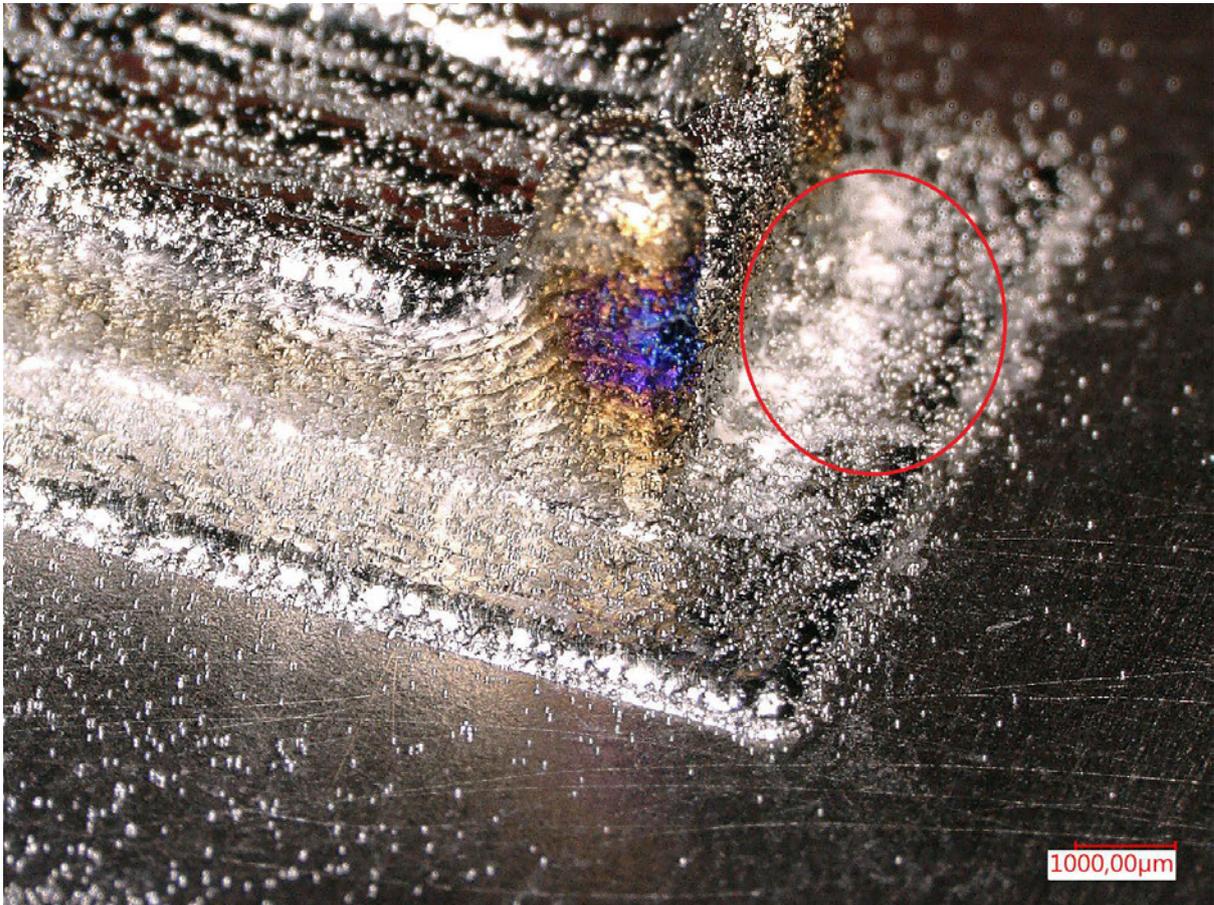


Abbildung 68: Zu sehen sind beide Farbeindringprüfungen. Das Ergebnis der ersten Prüfung ist links zu sehen.

An Stellen der Wandüberhöhungen haben sich Hohlräume gebildet in denen Farbreste verblieben sind. Die Anbindungsschicht sowie die aufgetragenen Schichten sind jedoch frei von Rissen.

Eine Untersuchung unter dem Mikroskop zeigt die kritischen Orte in Abbildung 69.



**Abbildung 69:** Dargestellt ist eine Probe mit 15 Schichten unter dem Mikroskop. Eine Rissbildung ist nicht zu erkennen.

Es wurde keine Rissbildungen festgestellt. Die rote Markierung in der Abbildung zeigt Reste vom Entwickler aus der Farbeindringprüfung. Die Reste sind weiß und haben sich nicht verfärbt. Das deutet ebenfalls auf einen rissfreien Auftrag.

Die vorher getroffene Aussage kann erweitert werden:

Die Instabilitäten aus Abschnitt 3.3 konnten bis zu einer Schichtanzahl von 15 Schichten bzw. einer Aufbauhöhe von 1,42 mm durch die vergrößerte Anbindungsfläche vollständig entfernt werden.

### 5.1.3 Optimierung der vergrößerten Anbindungsfläche:

Die Optimierung für den Versuch mit der vergrößerten Anbindungsfläche soll das Ziel einer Verringerung der Masse der Anbindungsfläche verfolgen. Es soll der minimale Einsatz von Werkstoffen resultieren.

Die Optimierung hat gezeigt, dass eine Schichtanzahl von 1,5 bzw. eine Schichthöhe von 0,33 mm für die vergrößerte Anbindungsschicht ausreicht um den Prozess stabil zu halten.

Die nachfolgende Abbildung 70 zeigt Proben (106.2/106.3) mit einer reduzierten Schichthöhe von 0,33 mm. Es wurden ebenfalls 15 Schichten aufgetragen bzw. eine Aufbauhöhe von 1,42 mm erreicht.

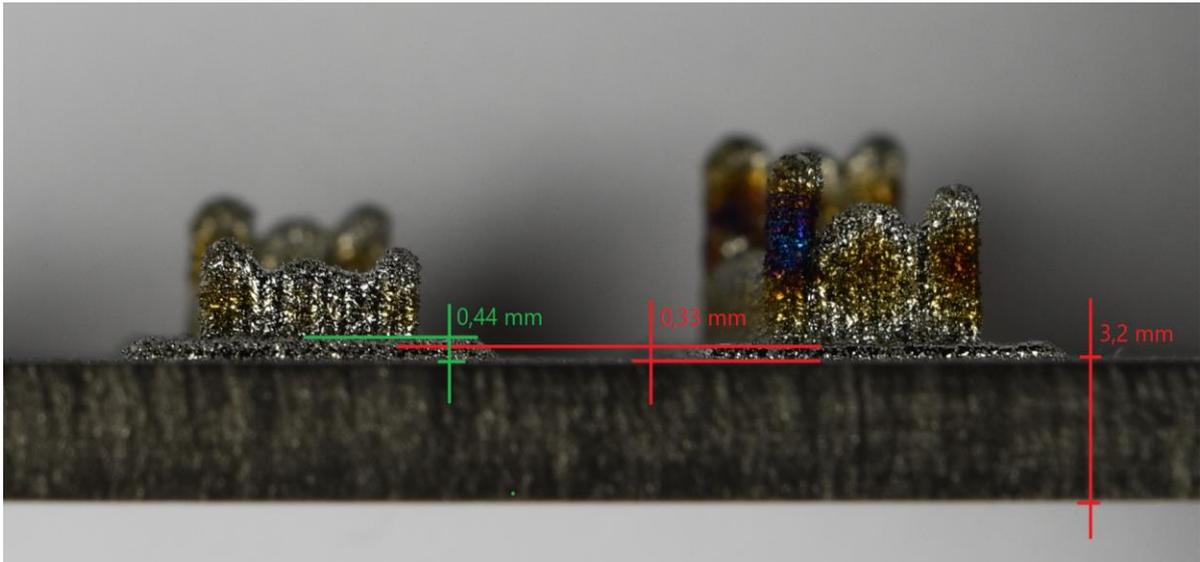
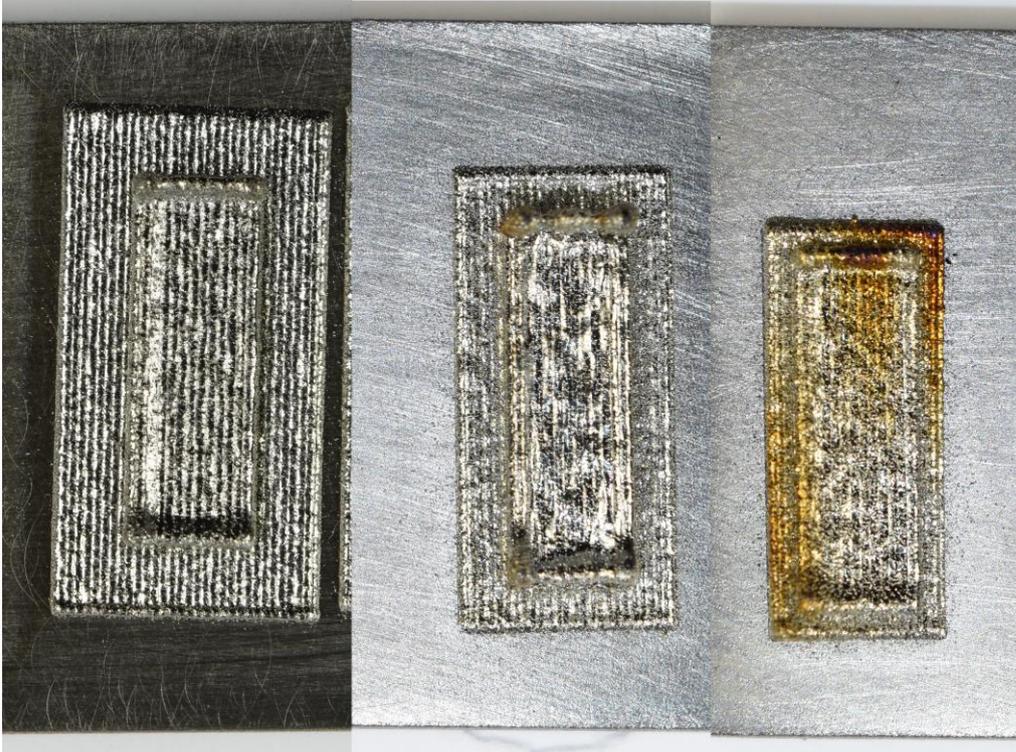


Abbildung 70: Dargestellt ist eine Aufbauhöhe von 1,42 mm mit reduzierter Schichthöhe von 0,33 mm.

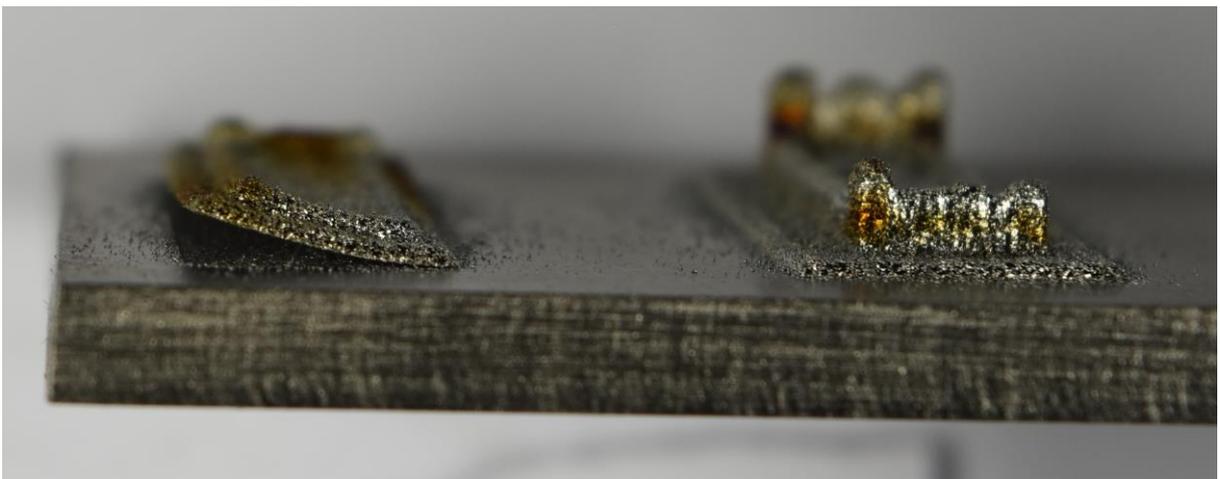
Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ist die Verringerung der Fläche. Es wurde zu Beginn ein Offset von 3 Spurbreiten gewählt bzw. ein Offset von 3 mm Abstand zur Geometrie aus dem Standardparametersatz eingehalten. Im weiteren Verlauf wurde der Offset auf 2 mm und im Anschluß auf 1 mm gesetzt.

Die Abbildung 71 zeigt die reduzierten Anbindungsflächen.



**Abbildung 71:** Dargestellt von links nach rechts: 3 mm Offset, 2 mm Offset und 1 mm Offset.

Der Prozessverlauf ist für ein Offset von 2 mm noch stabil. Eine weitere Reduzierung führt zur Instabilität und Delamination, beginnend bei der Anbindungsschicht. Charakteristische Verdrehungen sind dann ebenfalls erkennbar. Nachfolgende Abbildung 72 zeigt die auftretenden Effekte.



**Abbildung 72:** Zu erkennen sind Proben (106.2.1/106.2.2) mit reduzierten Anbindungsflächen.

Die rechte Probe (106.2.2) hat eine Aufbauhöhe von 1,21 mm und zeigt damit, dass eine reduzierte Fläche von 2 mm Offset für einen stabilen Prozess ausreichend ist.

Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten keine Rissbildung für die genannte Probe.

Abbildung 73 zeigt eine Anbindungsfläche mit 2 mm Offset.



**Abbildung 73: Eine reduzierte Anbindungsfläche unter dem Mikroskop. Die gefährdete Schicht zeigt keine Rissbildung.**

Die Kombination aus der Reduzierung der Höhe der Anbindungsfläche von 0,44 mm auf 0,33 mm sowie ein reduzierter Offset von 3 mm auf 2 mm erspart 46,29 mm<sup>3</sup> Material. Bei einem Gesamtvolumen von 104,16 mm<sup>3</sup> ist das eine Reduzierung um 44,4 % gegenüber vergleichbaren Proben ohne Optimierung.

## 5.2 Vorwärmen mittels Laser

Durch das Vorwärmen mit dem Laser konnte kein stabiler Aufbau festgestellt werden. Der Parametersatz aus Abschnitt 4.1.2 konnte die Delamination nicht verringern.

Die Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen die Ergebnisse.



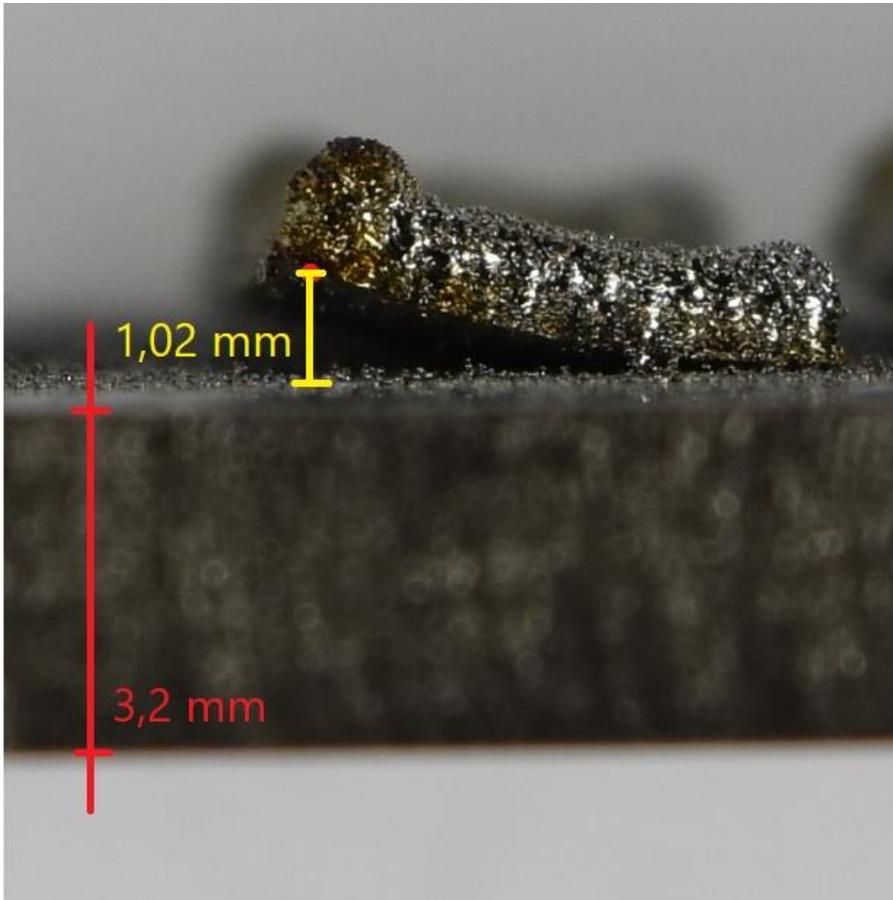
Abbildung 74: Die Platte 104.3 dargestellt in der Draufsicht. Von links nach rechts: Vergleichsprobe nach Standardparametersatz, 2 Vorbelichtungen, 4 Vorbelichtungen, 6 Vorbelichtungen, 8 Vorbelichtungen und 10 Vorbelichtungen.



Abbildung 75: Platte 104.3 in der Seitenansicht.

Es sind deutliche Delaminationen aller Proben zu erkennen. Mit einer Anzahl von 2 Vorbelichtungen konnte die geringste Delamination bei der Probe 104.3.2. gemessen werden. Sie beträgt 1,02 Millimeter.

Zu sehen in Abbildung 76.



**Abbildung 76: Delaminationshöhe einer Probe (104.3.2) mit 2 Vorbelichtungen.**

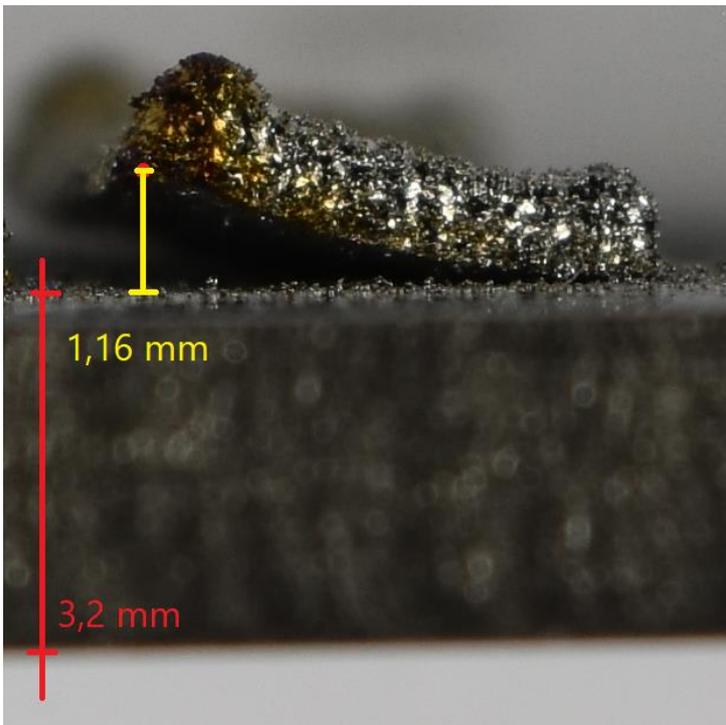
### 5.2.1 Untersuchung auf Zielkriterium 1

Das Vorwärmen mit dem Laser hat das Zielkriterium 1 nicht erfüllen können. Eine Verringerung der Delamination unter 0,72 mm konnte nicht festgestellt werden. Die Delaminationshöhe bewegt sich im Bereich der Delaminationshöhen von Proben ohne Vorbelichtungen. Die Vergleichsgeometrie zeigt ähnliche Delaminationshöhen bei ähnlicher Aufbauhöhe.

Es kann daher gesagt werden, dass eine Anzahl von 2 Vorbelichtungen mit dem ersten Parametersatz keinen Einfluss auf die Delamination hat.

Für die Probe 104.3.3 mit 4 Vorbelichtungen waren die Ergebnisse nahezu identisch.

Die Abbildung 77 zeigt die Probe.

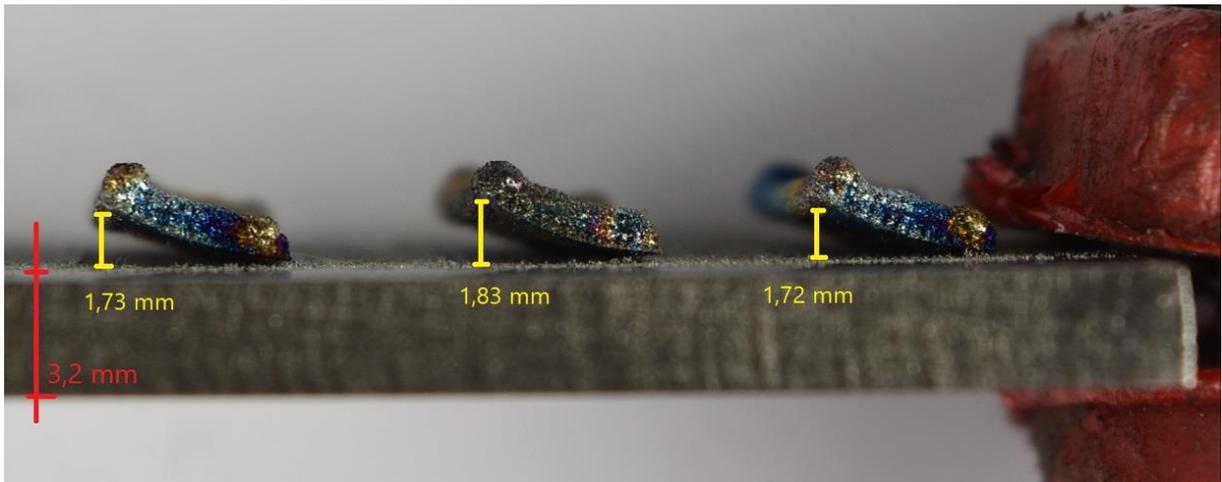


**Abbildung 77: Delamination der Probe mit 4 Vorbelichtungen.**

Die Delamination beträgt für 4 Vorbelichtungen 1,16 Millimeter. Zur Probe mit 2 Vorbelichtungen hat sich die Delamination um 0,14 mm erhöht.

Noch größer wurde die Delamination wenn 6, 8 oder 10 Vorbelichtungen stattgefunden haben.

Abbildung 78 zeigt entsprechende Proben.



**Abbildung 78: Erhöhung der Delamination an den Proben 104.3.4/.5/.6.**

Die bläuliche Färbung ist ein Indikator für die Anwesenheit von Sauerstoff während des Schweißvorgangs. Es kann verallgemeinert gesagt werden, dass mit einer höheren Delamination auch mehr Oberfläche mit dem Sauerstoff aus der Atmosphäre in Kontakt kommt und Diffusions- sowie Oxidationsprozesse vermehrt stattfinden.

Die Delaminationen betragen zwischen 1,72 mm und 1,83 mm. Es sind also größere Delaminationen mit der Vorbelichtung entstanden als ohne Vorbelichtung.

Es wird angenommen, dass der nachteilige Effekte der Erhöhung der Delaminationen auf die verschlechterte Oberflächengüte sowie einer ungünstigen Phasenbildung aufgrund hoher Temperaturen zurückzuführen ist. Die Oberflächengüte wird durch eine Vorbelichtung im Allgemeinen verbessert, da ein Poliereffekt auftritt. Der verwendete Parametersatz scheint eine zu hohe Intensität der Wärmeeinbringung zu realisieren. Infolgedessen ist kein Poliereffekt sondern eine Verschlechterung der Oberfläche aus Oxidationsgründen zu erkennen.

Auffällig sind die Aufbauhöhen in Tabelle 8.

Tabelle 8: Aufbauhöhen in einer übersichtlichen Zusammenfassung.

| Probe 104.3-             | Vorbelichtung | Aufbauhöhe<br>[mm] | Delaminationshöhen<br>[mm] |
|--------------------------|---------------|--------------------|----------------------------|
| .1 (Vergleichsgeometrie) | 0             | 0,73               | 0,92                       |
| .2                       | 2             | 0,68               | 1,02                       |
| .3                       | 4             | 0,65               | 1,16                       |
| .4                       | 6             | 0,69               | 1,73                       |
| .5                       | 8             | 0,67               | 1,83                       |
| .6                       | 10            | 0,74               | 1,72                       |

Nur eine der Proben erreichte eine Aufbauhöhe über die der Vergleichsprobe von 0,73 mm. Alle anderen Proben haben durch das Vorbelichten eine geringere Schichthöhe aufgebaut.

Das Vorbelichten hat nicht nur dazu geführt, dass die Delamination nicht verringert wurden sondern einen gegenteiliger Effekt hat eingesetzt. Dabei betrug die jeweilige Aufbauhöhe weniger als die der Vergleichsgeometrie. Durch die geringere Aufbauhöhe würde für den Standardparametersatz eigentlich eine geringere Delamination resultieren.

Es kann die Aussage getroffen werden, dass durch das Vorbelichten, mit dem ausgewählten Parametersatz, deutlich höhere Delaminationen resultieren als ohne das Vorbelichten.

Auf der Platte und um die Proben herum konnten braun-rötliche Verfärbungen festgestellt werden. Diese Farbänderung von Titan ist mit den Proben aus dem Ofenversuch vergleichbar. Durch den Wärmeeintrag verfärbt sich die Platte. Je Wärmer sie dabei wurde desto rötlicher und dunkler ist die Farbveränderung.

Der Farbverlauf lässt darauf schließen, dass Temperaturen über 450°C erreicht wurden. Diese begrenzen sich jedoch auf wenige Orte. Die Platte ist größtenteils unverfärbt.

Es kann die Aussage getroffen werden, dass durch das Vorwärmen zwar Temperaturen erreicht werden, die eine Delamination verringern, sie aber nur örtlich begrenzt erreicht wurden. Mit dem Wissen aus dem Ofenversuch, dass eine Wärmeeinbringung Delaminationen verringert und Temperaturen von 450°C die Platte braun anlaufen lassen, wird davon ausgegangen, dass die Platte

die hohen Temperaturen nicht lange und nicht flächig genug halten konnte sondern ausreichende Temperaturen nur punktuell und kurzzeitig auftraten.

Im Zusammenhang mit einer Optimierung sollte eine Iteration stattfinden die mehr Wärme einbringt um die Temperatur in der Platte vor Schweißbeginn insgesamt zu erhöhen. Nähere Ausführungen dazu folgen.

### 5.2.2 Untersuchung auf Zielkriterium 2

Da das Zielkriterium 1 nicht erfüllt werden konnte ist das Zielkriterium 2 ebenfalls nicht erfüllt. Damit sind die Anforderungen 1 und 2 an metallische Dichtflächen nicht erfüllt.

Die Ergebnisse eignen sich nicht zum Einsatz als Dichtflächen.

### 5.2.3 Optimierung der Laserparameter

Aus den Erkenntnissen des ersten Versuchs wurde ein neuer Parametersatz erstellt.

Die Wärmeeinbringung soll gesteigert werden damit bei Schweißbeginn in der Platte höhere Temperaturen vorherrschen. Um eine hohe Temperatur vor Schweißbeginn zu erhalten wird der Parametersatz mit Fokus auf hohe Temperaturen verändert. Dazu wird die Laserleistung erhöht und die Vorschubgeschwindigkeit verringert. Die Anzahl an Vorbelichtungen wurde ebenfalls gesteigert.

Der Parametersatz ist in Tabelle 9 zu sehen.

Tabelle 9: Neuer Parametersatz zur Erhöhung der Wärmemenge in der Platte.

| Prozessparameter          | Wert     | Einheit                     |
|---------------------------|----------|-----------------------------|
| Laserleistung             | 227      | Watt                        |
| Vorschubgeschwindigkeit   | 6,8      | mm/s                        |
| Laserfokus (Durchmesser)  | 3,6      | mm                          |
| Tellerdrehzahl            | 1,5      | 1/min                       |
| Sauerstoff-Wert           | 50...150 | ppm (particles per million) |
| Schicht-Überlappung       | 65       | Prozent %                   |
| Schichthöhe               | 210      | Mikrometer                  |
| Kinetik: Shift Angle      | 180      | Grad                        |
| Kinetik: unidirektional   | /        | /                           |
| Anzahl an Vorbelichtungen | 8...20   | /                           |

Die Ergebnisse sind auf der Platte 104.2 in Abbildung 79 dargestellt.



**Abbildung 79:** Es sind deutliche Verfärbungen auf der Platte 104.2 zu erkennen. Von links nach rechts: Probe 104.2.1/.2/.3/.4.

Die Probe 104.2.1 ist eine Vergleichsgeometrie und hat keine Vorbelichtung erfahren. Probe 104.2.2 wurde 8 mal Vorbelichtet, Probe 104.2.3 erfuhr 10 Vorbelichtungen und die Probe 104.2.4 wurde 20 mal Vorbelichtet.

Eine Ergebnisdarstellung erfolgt in der Abbildung 80.



Abbildung 80: Die Platte 104.2 in der Seitenansicht. Die zweite Probe von rechts wurde mit einem fremden Parametersatz geschweißt und ist deshalb nicht weiter zu beachten. Es können deutliche Delaminationen festgestellt werden.

Die gemessenen Delaminationen können der Tabelle 10 entnommen werden.

Tabelle 10: Zusammenfassung der gemessenen Werte für die Platte 104.2

| Probe 104.2-             | Vorbelichtung | Aufbauhöhe<br>[mm] | Delaminationshöhen<br>[mm] |
|--------------------------|---------------|--------------------|----------------------------|
| .1 (Vergleichsgeometrie) | 0             | 0,69               | 0,80                       |
| .2                       | 8             | 0,71               | 1,41                       |
| .3                       | 10            | 0,67               | 1,81                       |
| .4                       | 20            | 0,91               | 1,57                       |

Auch mit stärkerer Wärmeeinbringung konnte eine Delaminationsverringering nicht festgestellt werden.

Die Platte hat deutliche Farbänderungen, die durchgängig sind und auf der Rückseite ebenfalls auftreten. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass die Wärme sich in der Platte auf ein größeres Volumen verteilt hat als im Vorversuch. Zusätzlich wurden höhere Temperaturen erreicht, zu erkennen an der dunkleren Verfärbung als vergleichbare Platten.

Die Delaminationshöhen sind auch für diesen Versuch nachteilig zu bewerten. Sie wurden nicht reduziert sondern vergrößert. Es konnten keine Zielkriterien erfüllt werden. Ebenfalls konnte keine Annäherung an die Erfüllung der Zielkriterien festgestellt werden durch z.B. leichte Delaminationsverringierungen.

Die Aufbauhöhen variierten im Versuch. Sie weichen jedoch nur gering von der Aufbauhöhe der Vergleichsgeometrie ab. Die Probe 104.2.4 zeigt eine höhere Aufbauhöhe.

Es ist zu vermuten, dass die höhere Temperatur einen positiven Einfluss auf die Aufbauhöhe hat. Die Erhöhung ist jedoch so gering, dass Versuche diese Aussage bestätigen müssten.

Der Prozess ist derart Instabil, dass eine weitere Optimierung nicht verfolgt wurde.

### 5.3 Vorwärmen im Veraschungssofen

#### 5.3.1 Untersuchung auf Zielkriterium 1

##### Vorwärmen bei 450°C:

Die Zieltemperatur von 450°C zeigt Verringerungen der Delamination.

Die Abbildung 81 und Abbildung 82 stellen die Ergebnisse da.

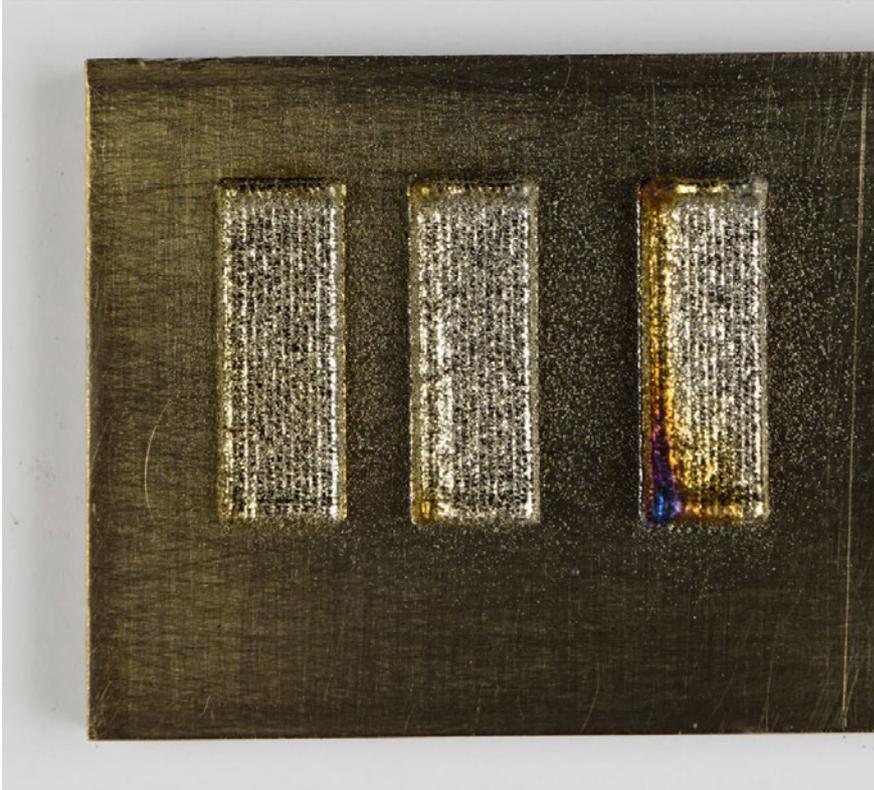


Abbildung 81: Platte 115 in der Draufsicht.

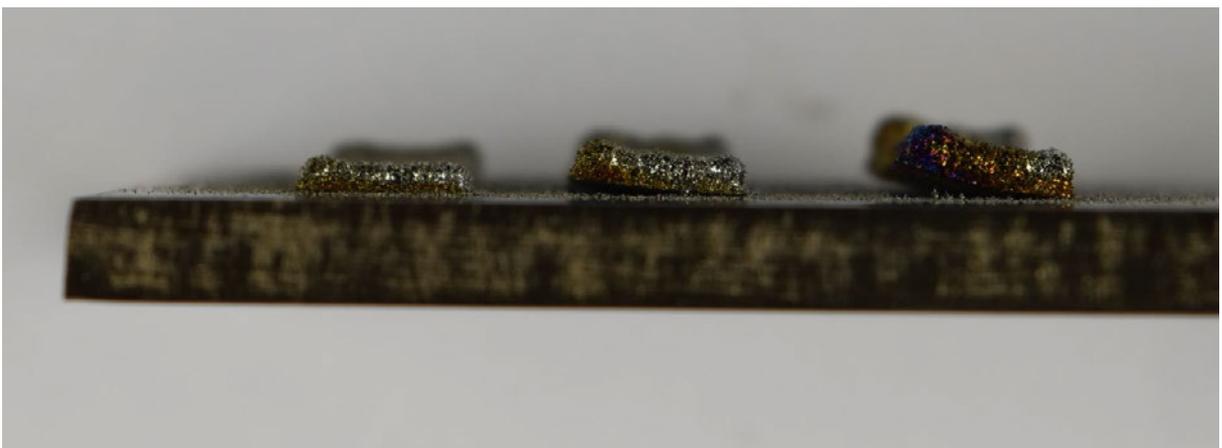
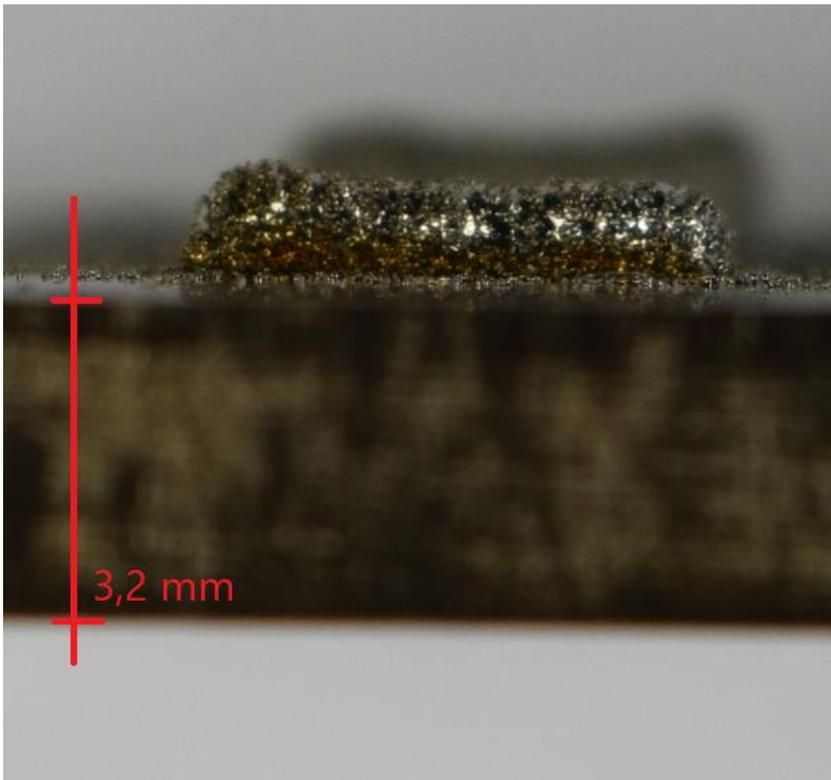


Abbildung 82: Von links nach rechts: Probe 115.1, Probe 115.2 und Probe 115.3.

Durch die Wärme im Ofen ist die Substrat-Platte bräunlich angelauten.

Es sind sichtbare Delaminationsverringierungen zu erkennen.

Die Abbildung 83 zeigt den Sachverhalt.



**Abbildung 83:** Die Probe 115.1 in der Nahaufnahme.

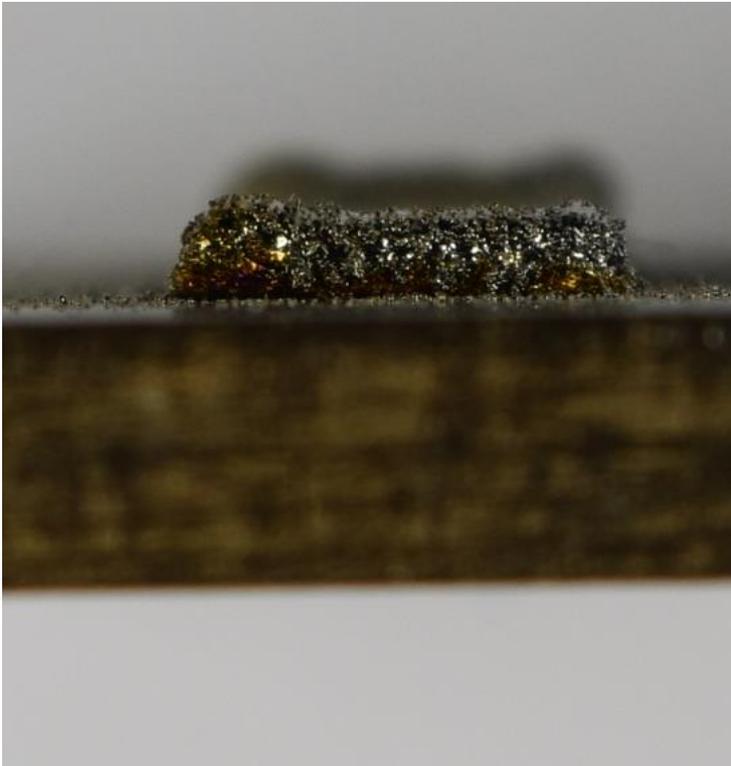
Es kann keine Delaminationshöhe gemessen werden. Die Delaminationshöhe beträgt 0 mm.

Die Probe erfüllt damit das Zielkriterium 1. Eine Trennung von Stoffen innerhalb tolerierbarer Grenzen ist möglich. Die Anforderung 1 ist ebenfalls erfüllt.

### 5.3.2 Untersuchung auf Zielkriterium 2

Eine vollständige Anbindung konnte nicht erreicht werden. Das Zielkriterium 2 ist somit nicht erfüllt. Selbst Proben ohne Delaminationen zeigen eine Rissbildung und würden die Anforderung 2 an metallische Dichtflächen nicht erfüllen.

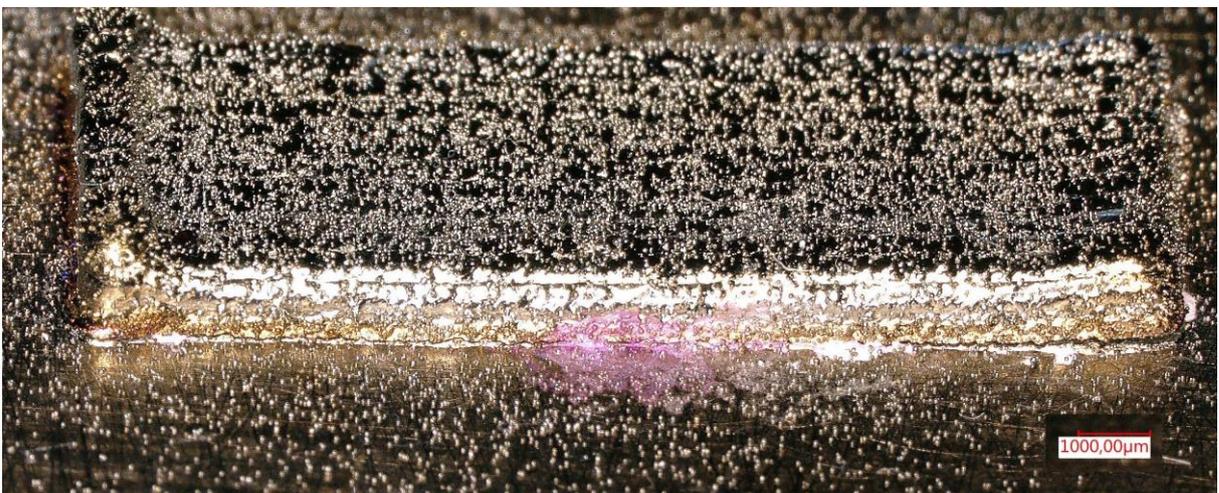
Die Probe 113.1 zeigt eine Rissbildung ohne Delamination in Abbildung 84.



**Abbildung 84:** Probe 113.1 zeigt den gleichen Sachverhalt wie Probe 115.1, eine Rissbildung ohne Delamination.

Es ist ersichtlich, dass eine Rissbildung stattgefunden hat. Delaminationen oder Verdrehungen sind nicht festzustellen.

Die Untersuchung unter dem Mikroskop bestätigt die Rissbildung in Abbildung 85.



**Abbildung 85:** Die Abbildung zeigt die Probe 113.1 ohne Delamination jedoch mit deutlicher Rissbildung sowie Farbreiten aus der Farbeindringprüfung.

Es ist anzunehmen, dass der Riss von rechts nach links durchgängig ist. Die Reste aus der Farbeindringprüfung zeigen ein Eindringen von Farbe in der Mitte der Probe.

### 5.3.3 Steigerung der Aufbauhöhe

Eine weitere relevante Messgröße ist die Aufbauhöhe, die sich durch die höhere Temperatur deutlich gesteigert hat.

Die bisherigen Aufbauhöhen zwischen 0,72 und 0,92 mm für 5 Schichten konnten auf 0,78 mm bis 1,15 mm gesteigert werden. Das liegt nicht nur an der erhöhten Temperatur sondern zu Anteilen an der Vermeidung von Verdrehungen der Struktur. Infolgedessen trifft das flüssige Pulver senkrecht auf das Schmelzbad bzw. die Substrat-Platte und es kann ein gleichmäßigerer Auftrag resultieren.

Die Aufbauhöhen sind in der Tabelle 11, Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Aufbauhöhen für Platte 113.

| Probe 113 | Aufbauhöhe<br>[mm] |
|-----------|--------------------|
| .1        | 0,92               |
| .2        | 1,04               |
| .3        | 0,83               |
| .4        | 0,89               |

Tabelle 12: Zusammenfassung der Aufbauhöhen für Platte 115.

| Probe 115 | Aufbauhöhe<br>[mm] |
|-----------|--------------------|
| .1        | 0,78               |
| .2        | 0,92               |
| .3        | 1,15               |

Tabelle 13: Zusammenfassung der Aufbauhöhen für Platte 107.

| Probe 107 | Aufbauhöhe<br>[mm] |
|-----------|--------------------|
| .1        | 1,14               |
| .2        | 1,09               |
| .3        | 1,11               |

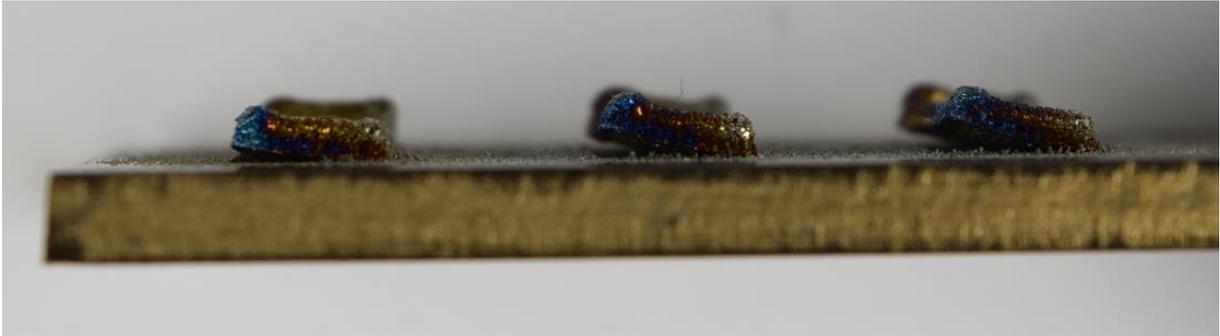
Sämtliche Proben zeigen höhere Aufbauhöhen als die Vergleichsgeometrie. Der Mittelwert von 0,99 mm liegt 0,07 mm über dem Bereich der Vergleichsgeometrien zwischen 0,72 mm und 0,92 mm.

### 5.3.4 Gewichtung der Schutzgasatmosphäre gegenüber der gespeicherten Wärme

Sämtliche oben erwähnten Proben für den Versuch mit dem Ofen wurden so früh wie möglich nach der Entnahme aus dem Ofen geschweißt. Wie in Abschnitt 4.2.3 ausgeführt wurde anfänglich auf eine Schutzgasatmosphäre verzichtet um ein weiteres Abkühlen der Platte zu verhindern.

Im weiteren Verlauf der Schweißungen baute sich die Schutzgasatmosphäre langsam auf. Die Platte verlor dabei Wärmeenergie. Die Wechselwirkung zwischen Wärmeverlust und Aufbau der Schutzgasatmosphäre ist dabei zu beobachten.

Die Platte 107 zeigt die Ergebnisse in Abbildung 86.

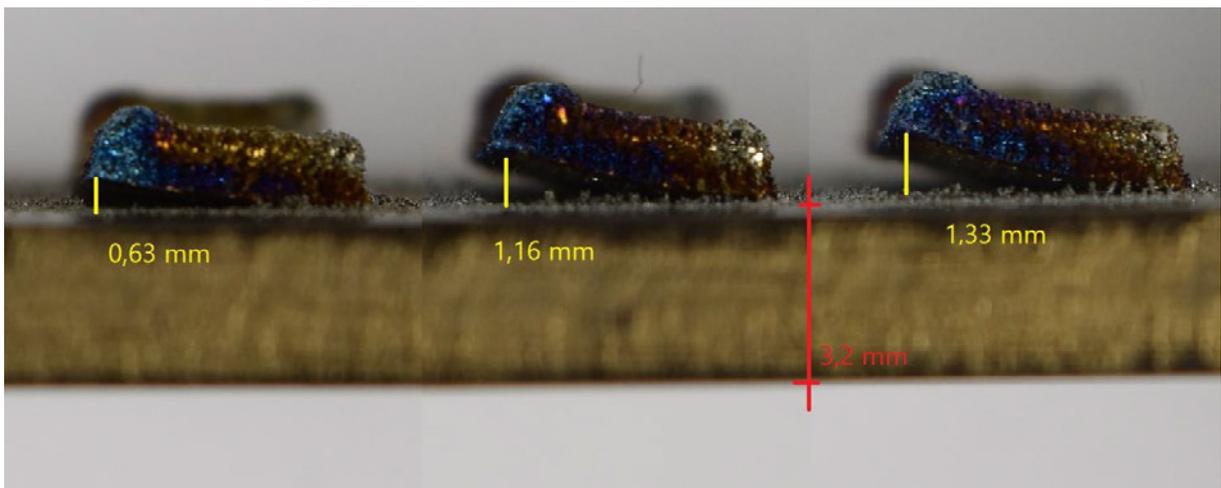


**Abbildung 86:** Dargestellt ist eine Timelapse der Proben mit abnehmender Temperatur nach rechts.

Die zwei rechten Proben 107.2 und 107.3 wurden mit weniger als 400 ppm bzw. weniger als 200 ppm geschweißt. Die Abkühlzeiten betragen 6 min 15 s bzw. 10 min 40 s.

Es kann beobachtet werden, dass der Wärmeeintrag, für einen stabilen Prozess, eine größere Bedeutung hat als der Aufbau einer Schutzgasatmosphäre. Es konnte ohne Schutzgasatmosphäre gute Ergebnisse erzielt werden wohingegen der Aufbau der Schutzgasatmosphäre eine Abkühlzeit benötigte bei der keine Delaminationsverringeringung mehr festgestellt werden konnte.

Die folgende Abbildung 87 zeigt die Delaminationen.



**Abbildung 87:** Delaminationen an Proben unter Temperatureinfluss. Von links nach rechts: Probe 107.1, 107.2 und 107.3.

Die Delamination ist im Vergleich zu den Platten 113 und 115 im allgemeinen größer. Das ist auf die höhere Aufbaurrate der Proben zurückzuführen, dargestellt in Tabelle 13.

### 5.3.5 Optimierung des Temperaturbereichs

#### Vorwärmen bei 550°C:

Versuche mit einer Temperatur von 550°C zeigten ähnliche Ergebnisse wie für 450°C.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 88 dargestellt.

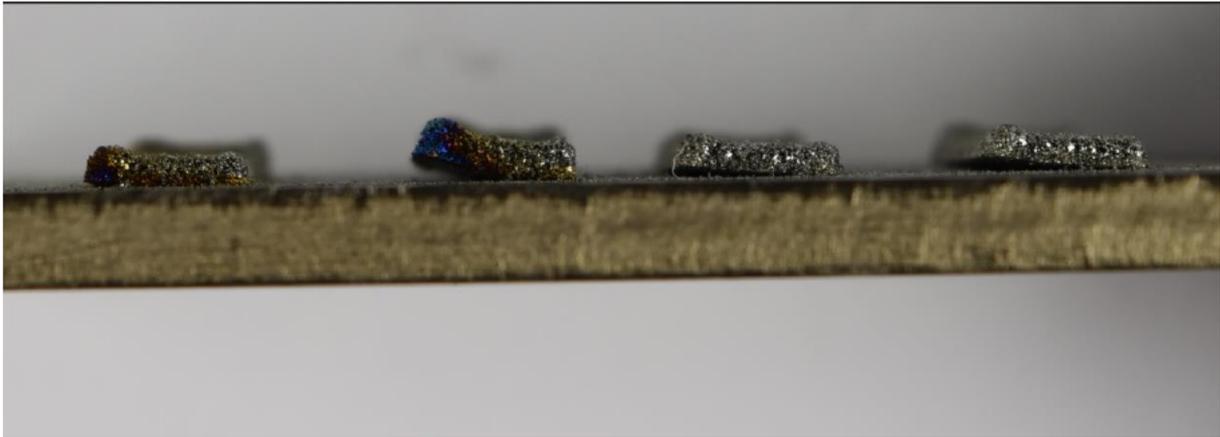


Abbildung 88: Dargestellt ist die Platte 114, die mit 550°C geschweißt wurde.

Es konnte keine weitere Verbesserung in Form von Delaminationsverringerung oder Rissfreiheit festgestellt werden durch die erhöhte Temperatur. Die Probe 114.2, mit einer größeren Delamination als die anderen, hat eine deutlich höhere Aufbauhöhe.

Die Tabelle 14 fasst die Werte zusammen.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Aufbauhöhen der Platte 114.

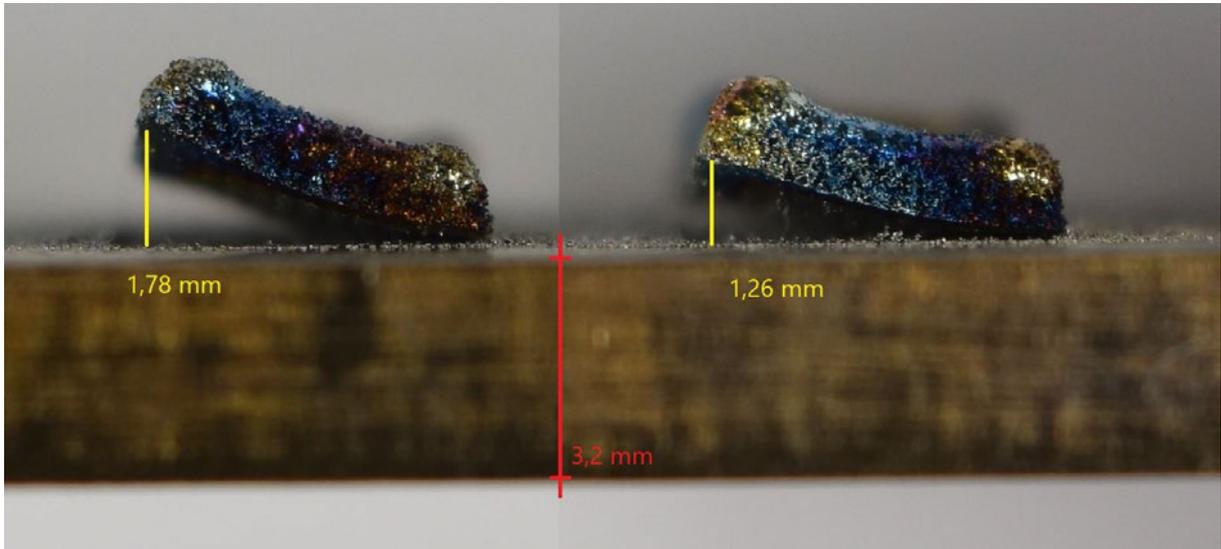
| Probe 114 | Aufbauhöhe [mm] |
|-----------|-----------------|
| .1        | 0,88            |
| .2        | 1,06            |
| .3        | 0,80            |
| .4        | 0,83            |

Die Proben 114.3 und 114.4 zeigten während des Abkühlens geringere Delaminationen als vergleichbare Proben wie zum Beispiel 115.2 und 115.3. Aufgrund der höheren Temperatur bewegen sich diese Proben, nach der gleichen Abkühlzeit, in höheren Temperaturbereichen und profitieren somit von der gespeicherten Restwärme.

Vorwärmen bei 600°C:

Eine weitere Steigerung der Temperatur auf 600°C zeigte einen gegenteiligen Effekt.

Abbildung 89 zeigt eine entsprechende Probe.



**Abbildung 89: Proben 108.2 und 108.3 wurden bei 600°C vorgewärmt.**

Es ist zu erkennen, dass die Delaminationen sich nicht verringert sondern vergrößert haben. Die Proben haben durchschnittliche Aufbauhöhen. Probe 108.2 hat eine Aufbauhöhe von 0,93 mm und Probe 108.3 eine Aufbauhöhe von 1,12 mm.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der positive Einfluss der Wärmeeinbringung begrenzt ist.

Ein weiterer Versuch soll die Spannweite dieser Aussage vergrößern. Es soll der Bereich unterhalb einer Temperatur von 450°C untersucht werden.

Vorwärmen bei 400°C:

Die nachfolgende Abbildung 90 zeigt eine Probe die mit 400°C vorgewärmt wurde.

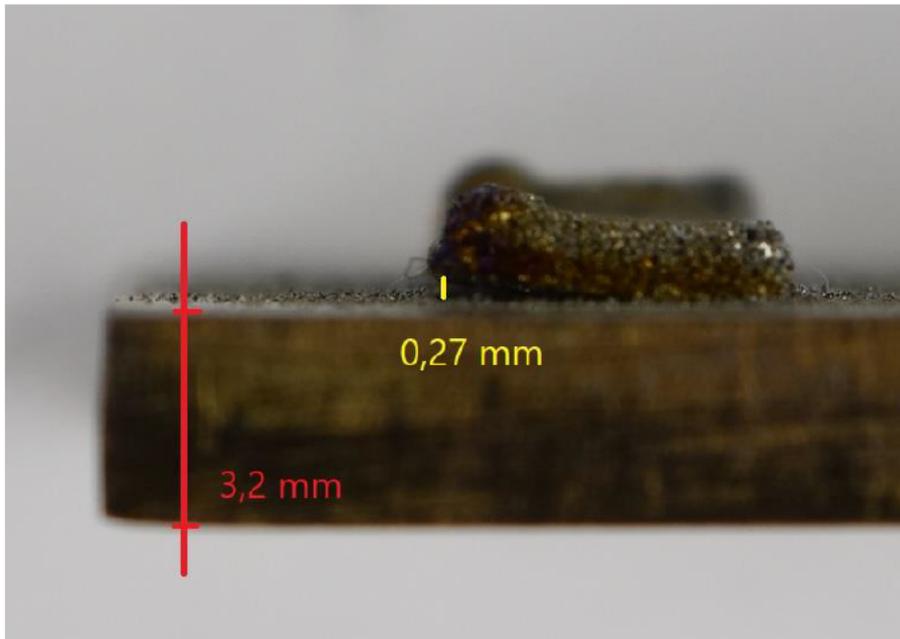


Abbildung 90: Die Probe 108.1 zeigt einen Aufbau mit 400°C Vorwärmung.

Es ist ein positiver Effekt feststellbar. Die Delamination konnte verringert werden. Sie beträgt 0,27 mm bei einer Aufbauhöhe von 1,06 mm.

Die Delamination ist damit größer als die Delamination der Proben bei 450°C. Im Vergleich hat die Delamination zugenommen. Es scheint als gäbe es ein Temperaturoptimum zum Vorwärmen.

Das folgende Diagramm in Abbildung 91 zeigt die Höhe der Delamination in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur.

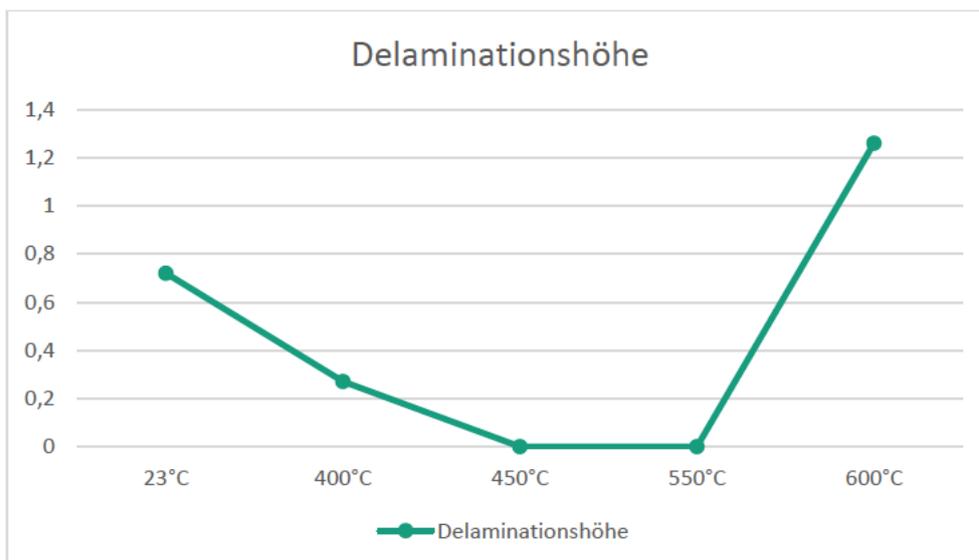


Abbildung 91: Dargestellt sind die Delaminationshöhen in Abhängigkeit von der Vorwärmtemperatur. Das Diagramm zeigt aus Gründen der Einfachheit lineare Kurvenverläufe zwischen gemessenen Daten. Die Distanzen zwischen den Messwerten sind nicht einheitlich, für die Veranschaulichung des Sachverhalts jedoch ausreichend.

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Temperatur die Delamination verkleinert wird bis zu einer Temperatur von 450°C bis 550°C. Dort ist ein Minimum des Kurvenverlaufs bzw. der Delaminationshöhe zu erkennen. In diesem Bereich ist das Zielkriterium 1 erfüllt. Die Delamination beträgt dort 0 mm. Eine Rissbildung tritt dennoch auf. Keine Bereiche erfüllen das Zielkriterium 2.

Im Anschluss steigt die Delamination bei einer Temperatur von 600°C. Sie erreicht Werte oberhalb der Delaminationshöhe ohne Vorwärmen. Ab dieser Temperatur wirkt sich das Vorwärmen negativ auf die Delaminationshöhe aus.

Es ist möglich, dass unbeachtete Temperaturen geringere Delaminationen aufzeigen bzw. dass zwischen den Zieltemperaturen ein weiteres Minimum liegt. Weiterführende Versuche wären für eine Aussage nötig.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Hinblick auf ein wachsendes Umweltbewusstsein in der Bevölkerung gewinnen effiziente Produktionstechniken an Relevanz. Material- und Energieaufwand gezielter zu gestalten ist mit dem Laser-Pulver-Auftragschweißen zu realisieren. Die Abkehr von subtraktiven Fertigungsverfahren aufgrund der schlechten ökologisch-ökonomischen Bilanz durch hohen Materialverschnitt eröffnet dem gezielten Auftrag von Material durch das LPA neue Anwendungsbeispiele.

Kostenintensive Werkstoffe werden wirtschaftlicher, wenn der Verschnitt reduziert werden kann. Im Rahmen des LPA können endkonturnahe Bauteile hergestellt werden deren Verschnitt und Nachbearbeitungsschritte deutlich reduziert sind gegenüber subtraktiven Verfahren. Vor diesem Hintergrund ist es naheliegend kostspielige Werkstoffe wie Nickel und Titan mit dem LPA gezielt aufzutragen und den Prozess im Allgemeinen wirtschaftlicher zu gestalten.

Die Legierung aus Nickel-Titan hat darüber hinaus einzigartige Eigenschaften wie eine reversible Dehnung von bis zu 10 % unter Temperatureinfluss. Die Legierung ist damit besonders interessant für Anwendungen, bei denen eine Stofftrennung unter hohen Temperaturen stattfindet. Hochpreisige technische Aggregate wie z.B. ein Strahltriebwerk eines Flugzeugs bieten, aufgrund der hohen Betriebstemperaturen, Einsatzmöglichkeiten. Der Einsatz von Nickel-Titan im Triebwerk als metallische Dichtfläche mit superelastischen Eigenschaften ist vorstellbar.

Die Abschlussarbeit zielt darauf ab, die Formgedächtnislegierung Nickel-Titan mithilfe des Laser-Pulver-Auftragschweißen auf artfremden Titan-Material aufzutragen. Es wird zunächst der Stand der Wissenschaft und Technik zum Prozessverlauf des LPA und die Eigenschaften der Werkstoffe wiedergegeben. Anschließend werden die Formgedächtnis-Effekte und ihre physikalischen Abläufe erläutert. Die Formgedächtnis-Effekte sind für die Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit relevant. Im weiteren Verlauf werden physikalische Ursachen diskutiert, um systematisch neue Versuchs- und Prozessstrategien abzuleiten.

Es wird eine Materialabstufung durch eine vergrößerte Anbindungsschicht untersucht. Die Bildung von Schweißspannungen wird durch eine optimierte Wärmeleitung verringert und der Prozess stabilisiert. Darauf aufbauend wurde eine Optimierung der Ergebnisstruktur durchgeführt und eine Materialersparnis von 44,4% gegenüber der Vergleichsstrukturen erreicht.

Weitere Einflüsse wie eine Verringerung von Temperaturgradienten durch eine Vorwärmphase der Substrat-Platte wurden untersucht. Die Vermeidung von Spannungsspitzen steht dabei im Fokus. Die Wärmemenge kann durch den Laser eingebracht werden. Im Zuge der Ausarbeitung sollen Versuche den Einfluss des Vorwärmens durch den Laser mit dem Vorwärmen durch eine externe Wärmequelle wie eines Ofens vergleichen.

Es wird eine Versuchsstrategie erdacht und der positive Einfluss der Wärme auf die Prozessstabilität bestätigt. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine weite, voluminöse Wärmeeinbringung wie sie durch den Ofen geschieht den Prozess stabilisiert wohingegen punktuelle, hohe Temperaturen durch den Laser die Instabilität weiter vergrößern.

Durch konstruktive Maßnahmen konnte der Prozess stabilisiert und der Einsatz der erzeugten Strukturen als metallische Dichtflächen bestätigt werden. Es konnte, durch die vergrößerte Anbindungsfläche, eine Delamination und eine Rissbildung verhindert werden.

Andere Methoden wie die Wärmeeinbringung über den Ofen zeigten Ansätze für einen Einsatz als Dichtflächen. Die Methode ist jedoch der Methode mit der vergrößerten Anbindungsfläche untergeordnet, da sie nicht alle Zielkriterien erfüllt. Eine Verringerung von Delaminationen konnte gemessen werden. Eine Rissfreiheit ist jedoch nicht resultiert. Es ist möglich, für Anwendungsbeispiele mit großen Lecktoleranzen, einen Dichteffekt aufrecht zu erhalten. Zusätzlich konnte eine höhere Aufbaurrate von 0,72 mm auf durchschnittlich 0,99 mm gemessen werden.

Der Einsatz des Lasers zur Wärmeeinbringung zeigte keinen positiven Einfluss auf die Stabilität des Prozesses. Die erzeugten Strukturen sind für einen Einsatz als metallische Dichtfläche ungeeignet. Es konnten keine Zielkriterien erfüllt werden. Zusätzlich ist eine Verschlechterung der Oberflächengüte festzustellen. Die Oberflächengüte ist als Indikator für hohe Wärmekonzentrationen auf der Platte zu verstehen.

Aufgrund dessen kann durch weiterführende Maßnahmen wie einer weiteren Erhöhung des Laserfokus, über die Systemgrenze hinaus, die Konzentration von Temperaturspitzen auf eine größere Fläche aufgeteilt werden und eine schonendere aber gleichzeitig höhere Wärmeeinbringung resultiert. Da der Einfluss von gezielter Wärmeeinbringung sich nachweisbar positiv auf die Prozessstabilität auswirkt kann durch die Erhöhung des Laserfokus eine einfache, schonende Prozesstrategie resultieren.

Für den Versuch mit der vergrößerten Anbindungsschicht ist nicht davon auszugehen, dass sich mit weiter steigender Aufbauhöhe die Delaminationshöhe oder der Kenntnisstand über die Rissentstehung ändert. Mit zunehmender Aufbauhöhe entfernt sich der Ort der größten Temperaturgradienten zunehmend von der rissgefährdeten Schicht. Die Wärmeleitung geschieht mit zunehmender Aufbauhöhe vermehrt durch den selben Werkstoff Nickel-Titan. Die Konzentration der zugeführten Wärme entfernt sich zunehmend vom kritischen Ort, der ersten Anbindungsschicht auf der Titan-Platte.

Darüberhinaus ist eine Sicherstellung einer Schutzgasatmosphäre vor Schweißbeginn für Versuche mit externer Wärmequelle interessant. Es ist anzunehmen, dass die Ergebnisse weitere Zielkriterien erfüllen könnten wenn der Prozess zusätzlich durch eine Schutzgasatmosphäre profitiert.

Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse in Bezug auf die Zielkriterien ist in Abbildung 92 dargestellt.

| Versuch                            | Zielkriterium 1<br>Delaminationsverringering | Zielkriterium 2<br>Rissfreier Auftrag | Optimum<br>erreicht |
|------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------|
| Anbindungsfläche ohne Reduzierung: | ✓  | ✓                                     | ✓                   |
| Anbindungsfläche mit Reduzierung:  | ✓  | ✓                                     | ✓                   |
| Ofen 450°C:                        | ✓  | ✗                                     | ✗                   |
| Ofen 550°C:                        | ✓  | ✗                                     | ✗                   |
| Ofen 650°C:                        | ✗  | ✗                                     | ✗                   |
| Vorbelichten Parametersatz 1:      | ✗  | ✗                                     | ✗                   |
| Vorbelichten Parametersatz 2:      | ✗  | ✗                                     | ✗                   |

**Abbildung 92:** Eine Zusammenfassung über die Erfüllung der Zielkriterien.

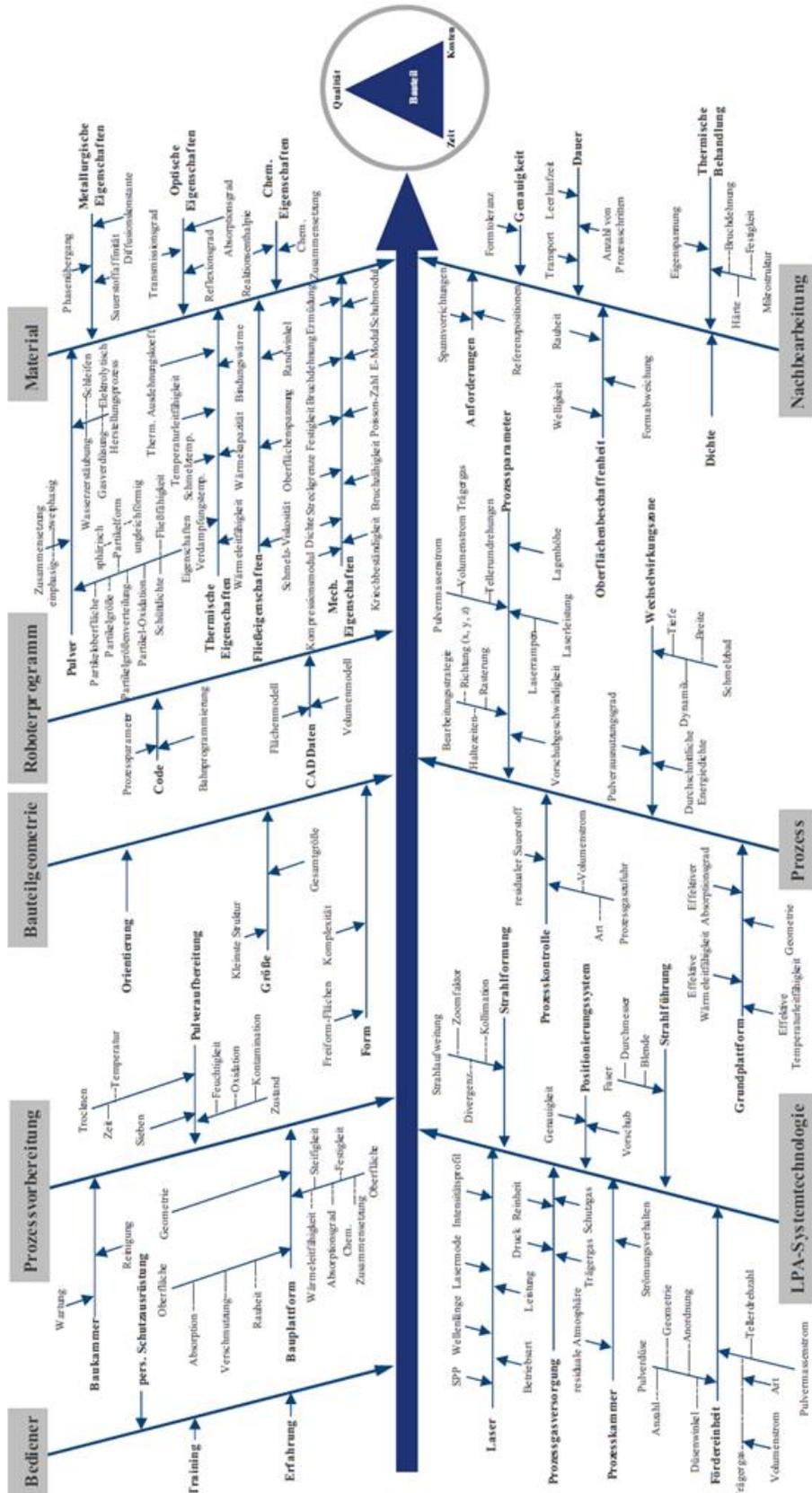
## 7 Literatur

- [PNIOK] Heinrich Pniok, Selbst fotografiert, Nickel electrolytic and 1cm3 cube.jpg [Online] Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Nickel\\_electrolytic\\_and\\_1cm3\\_cube.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Nickel_electrolytic_and_1cm3_cube.jpg) Zugriff am: 21.08.2021
- [PNIOK] Heinrich Pniok, Selbst fotografiert, Titanzylinder.jpg [https://de.wikipedia.org/wiki/Titan\\_\(Element\)#/media/Datei:Titanzylinder.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Titan_(Element)#/media/Datei:Titanzylinder.jpg) Zugriff am: 27.12.2021
- [STOECKEL] Stoeckel: Produktionstechnik fuer Bauteile und Halbwerkzeuge aus Nickel-Titan Legierungen, 2000
- [ROOS] Eberhard Roos, Karl Maile: Werkstoffkunde für Ingenieure, Stuttgart, Herbst 2011
- [WEIßBACH] Wolfgang Weißbach, Michael Dahms, Christoph Jaroschek: Werkstoffkunde Strukturen, Eigenschaften, Prüfung, Bielefeld, Flensburg, im Juli 2015
- [SCHULZE] Günter Schulze: Die Metallurgie des Schweißens Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe, Berlin, Juli 2009
- [LANGBEIN] Sven Langbein, Alexander Czechowicz: Formgedächtnistechnik Entwickeln, Testen und Anwenden, Menden 2020
- [HALANI] PRATIK R. HALANI and YUNG C. SHIN: In Situ Synthesis and Characterization of Shape Memory Alloy Nitinol by Laser Direct Deposition, US 2011
- [SCHEITLER] Christian Scheitler, Oliver Hentschel, Thomas Krebs, Konstantin Yu, Nagulin Michael Schmidt, Laser metal deposition of NiTi shape memory alloy on Ti sheet metal: Influence of preheating on dissimilar build-up, US 2017
- [IAPT] NANOVAL: PULVERCHARGE Berlin,
- [SKROBANEK] K.D. Skrobaneck, O.F. Hagena, M. Kohl: Laser metal deposition of NiTi shape memory alloy on Ti sheet metal: Influence of preheating on dissimilar build-up
- [WEARENITI] Nitinol Devices & Components: Shape Memory Nitinol Alloys,
- [KAACK] Michael Kaack: Elastische Eigenschaften von NiTi-Formgedächtnis-Legierungen, Bochum, 2002
- [MERKEL] Manfred Merkel, Karl-Heinz Thomas: Taschenbuch der Werkstoffe, 2000
- [GROßMANN] Prof. Dr.-Ing. Christoph Großmann: Verfestigungsmechanismen, Skript zur Lehrveranstaltung Werkstoffkunde, 2022
- [ONDRACEK] G. Ondracek: Werkstoffkunde. Leitfaden für Studium und Praxis, 1986  
ISBN 3-88508-966-1
- [STEPHAN] Peter Stephan, Karlheinz Schaber, Karl Stephan, Franz Mayinger: Thermodynamik, Darmstadt, Karlsruhe 2005
- [ZIMMER] Dipl.-Ing. Peter Zimmer: Zur Bewertung der Kaltrissicherheit von Schweißverbindungen aus hochfesten Feinkornbaustählen, Berlin 2007

- [CZICHOS] Horst Czichos, Birgit Skrotzki, Franz-Georg Simon: Das Ingenieurwissen: Werkstoffe, Berlin 2013
- [STOECKEL2] Dieter Stockel, Menko Park: Neue Werkstoffe Anwendungen von NiTi-Legierungen mit Formgedächtnis-Effekt, Kalifornien, USA
- [LEANDER] Mauritz Leander, Birger Möller: Prozessmanagement für das Laser-Pulver-Auftragsschweißen, Hamburg 2020
- [GEBHARDT] Andreas Gebhardt: Additive Fertigungsverfahren Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion, Aachen 2016 [Online] Verfügbar unter: Zugriff am:
- [HAEFNER] Prof. Constantin Häfner Dr. Thomas Schopphoven, Dr. Andres Gasser: Effektiver Verschleiß- und Korrosionsschutz mit dem »EHLA-Verfahren«, Aachen 2017,  
[Online] Verfügbar unter: Effektiver Verschleiß- und Korrosionsschutz mit dem »EHLA«-Verfahren (fraunhofer.de), Zugriff am: 17.03.2022
- [KLB] KLB: Laserschweißtechnik  
[Online] Verfügbar unter: [http://klb-laser.de/PR/KLB%20Broschuere\\_2018.pdf](http://klb-laser.de/PR/KLB%20Broschuere_2018.pdf) Zugriff am: 17.03.2022
- [TRUMPF] TRUMPF Laser- und Systemtechnik, Laserauftragsschweißen und Hochgeschwindigkeits-Laserauftragsschweißen  
[Online] Verfügbar unter: [https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF\\_Master/Applications/Broschueres/TRUMPF-Laser-metal-deposition-Tapping-new-potential-DE.pdf](https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/Applications/Broschueres/TRUMPF-Laser-metal-deposition-Tapping-new-potential-DE.pdf) Zugriff am: 17.03.2022
- [KOEHLER] Eduard Köhler, Rudolf Flierl: Verbrennungsmotoren Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors, Heilbronn 2011
- [ROLOFF] Roloff, Matek: Maschinenelemente, Normung, Berechnung, Gestaltung Braunschweig 2007
- [SCHREINER] Klaus Schreiner: Verbrennungsmotor – kurz und bündig, Konstanz 2017
- [SENSORE] SENSORE Electronic GmbH: Datenblatt Sauerstoffsensoren,  
[Online] Verfügbar unter: [https://www.sensore-electronic.com/wp-content/uploads/2016/04/SO002d-3\\_Datenblatt-Sensor.pdf](https://www.sensore-electronic.com/wp-content/uploads/2016/04/SO002d-3_Datenblatt-Sensor.pdf), Zugriff am: 17.03.2022

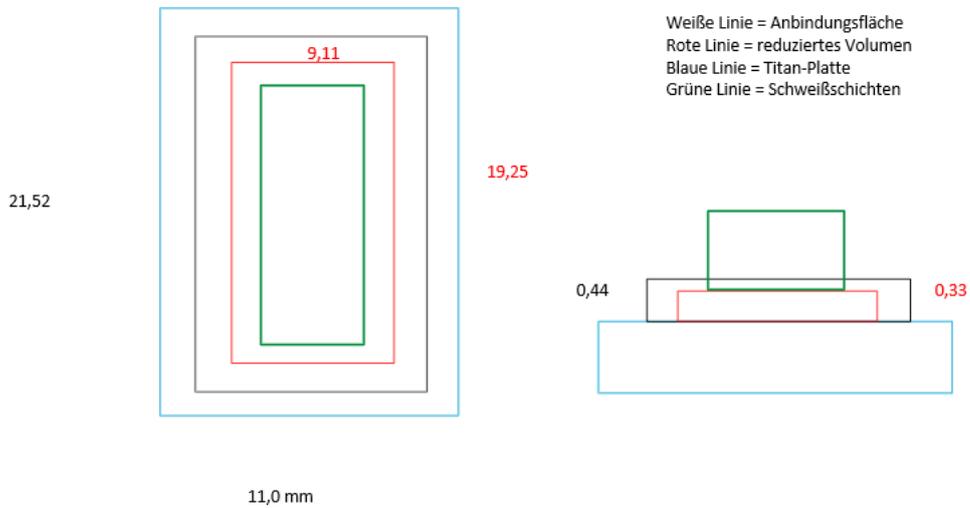
# A Anhang

## A.1 Titel Anhang 1



## Rechnung eingesparte Masse

Montag, 14. März 2022 20:07



Volumen1:  $21,52 \cdot 11 \cdot 0,44 = 104,1568$   
Volumen2:  $19,25 \cdot 9,11 \cdot 0,33 = 57,8713$

Eingespartes Volumen:  
 $104,1568 - 57,8713 = 46,2855$

Dreisatz:  
 $104,15 = 100$   
 $1 = 100 / 104,15 = 0,9602$   
 $57,8713 = 0,9602 \cdot 57,8713 = 55,568$

Eingespartes Volumen in Prozent:  
 $100 - 55,568 = 44,432 \%$

$46,28 = 0,04628$   
Dichte:  $6,5 \text{ g pro cm}^3$

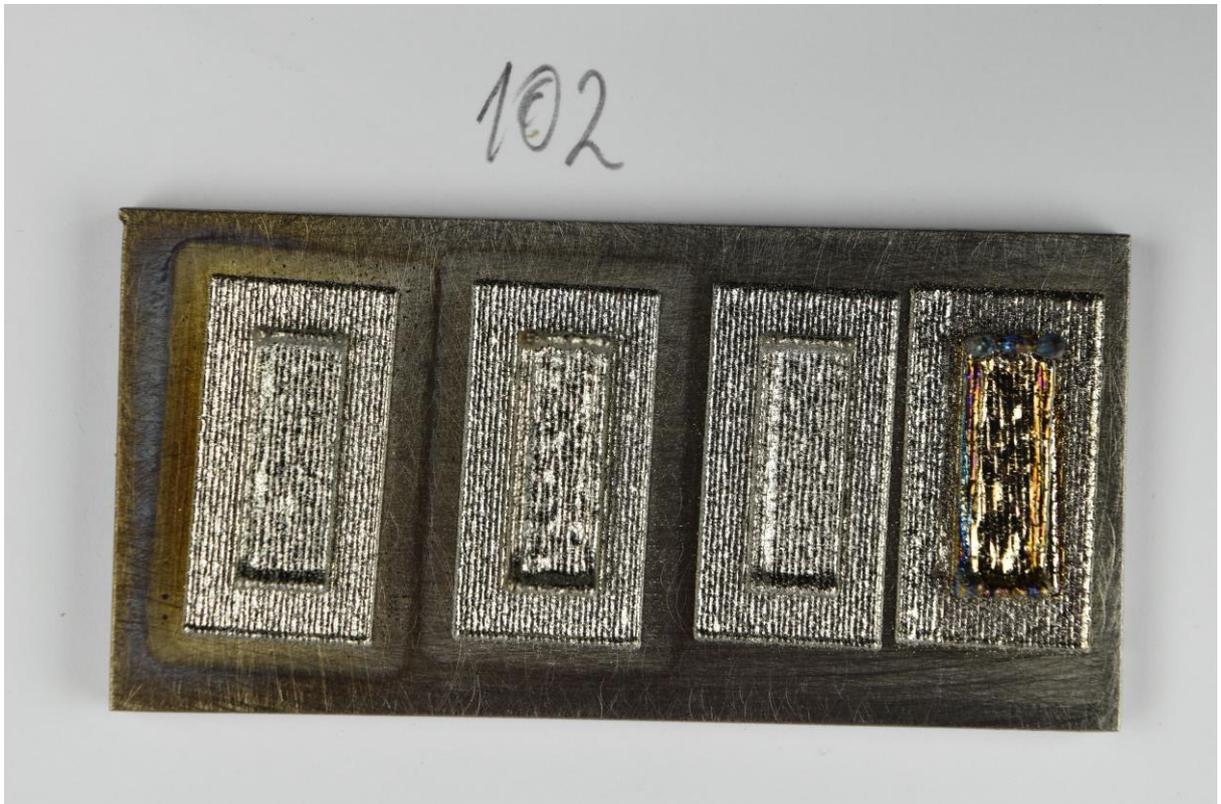
Masse eingespart:  
 $0,04628 \cdot 6,5 = 0,30082 \text{ g}$

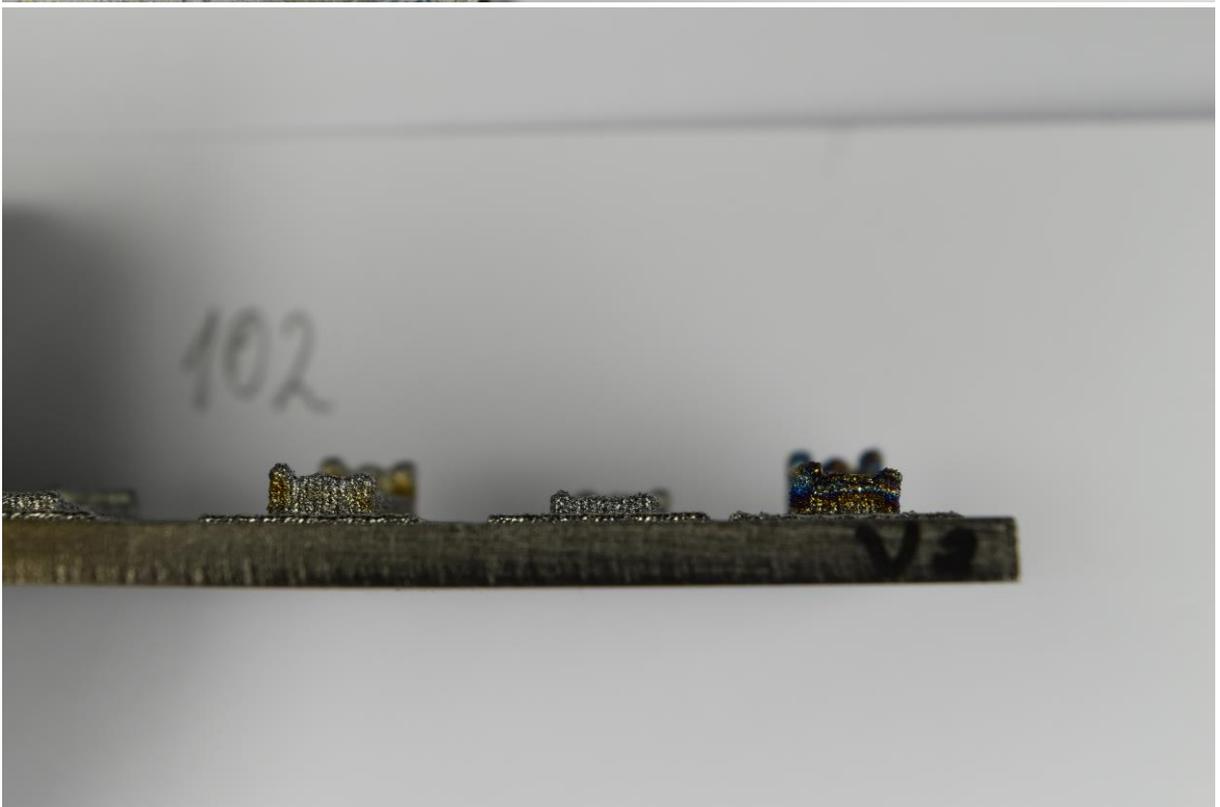
Masse Insgesamt:  
 $0,1041568 \cdot 6,5 = 0,6770192$

**A.2 Titel Anhang 2**

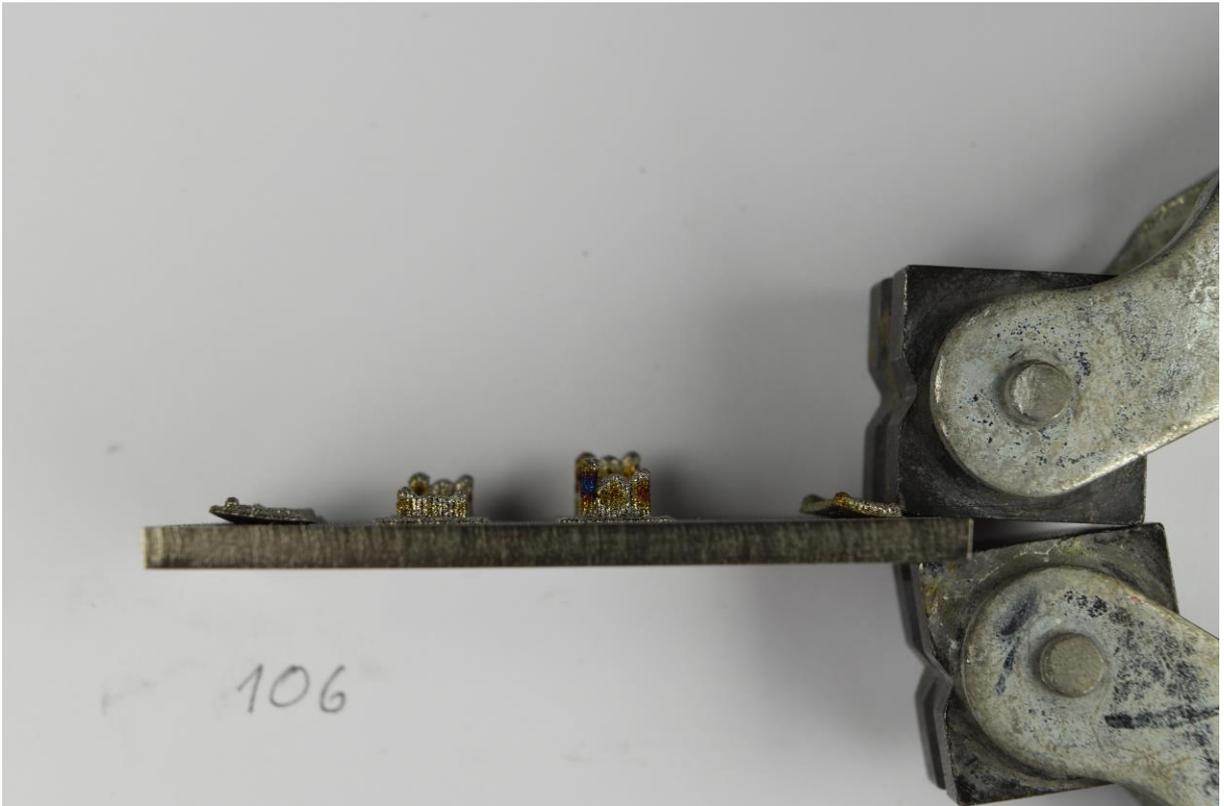
Fotos Vergrößerte Anbindungsfläche

Platte 102

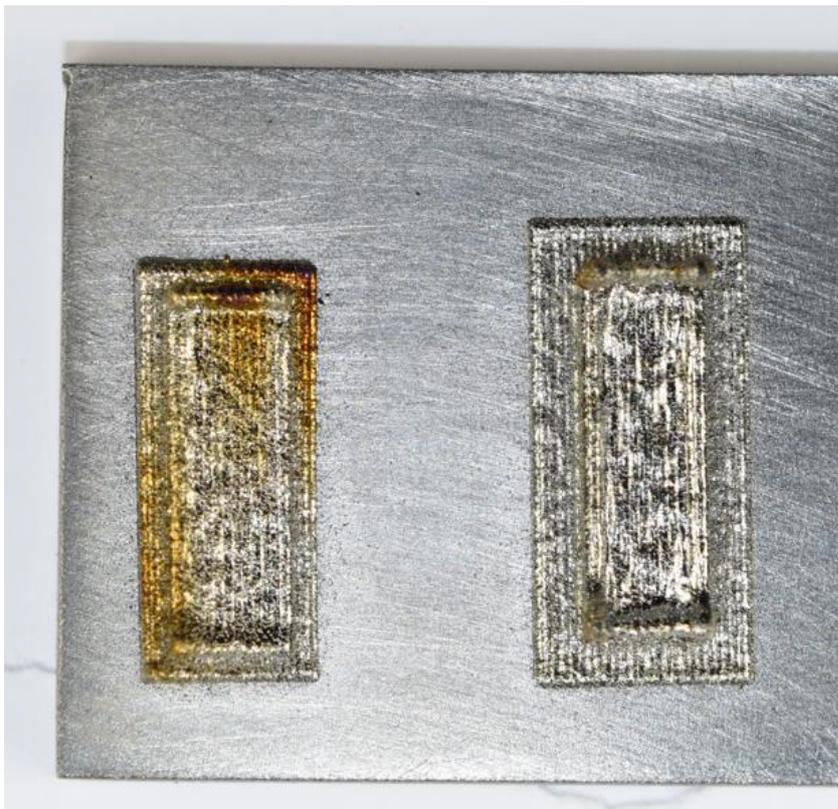




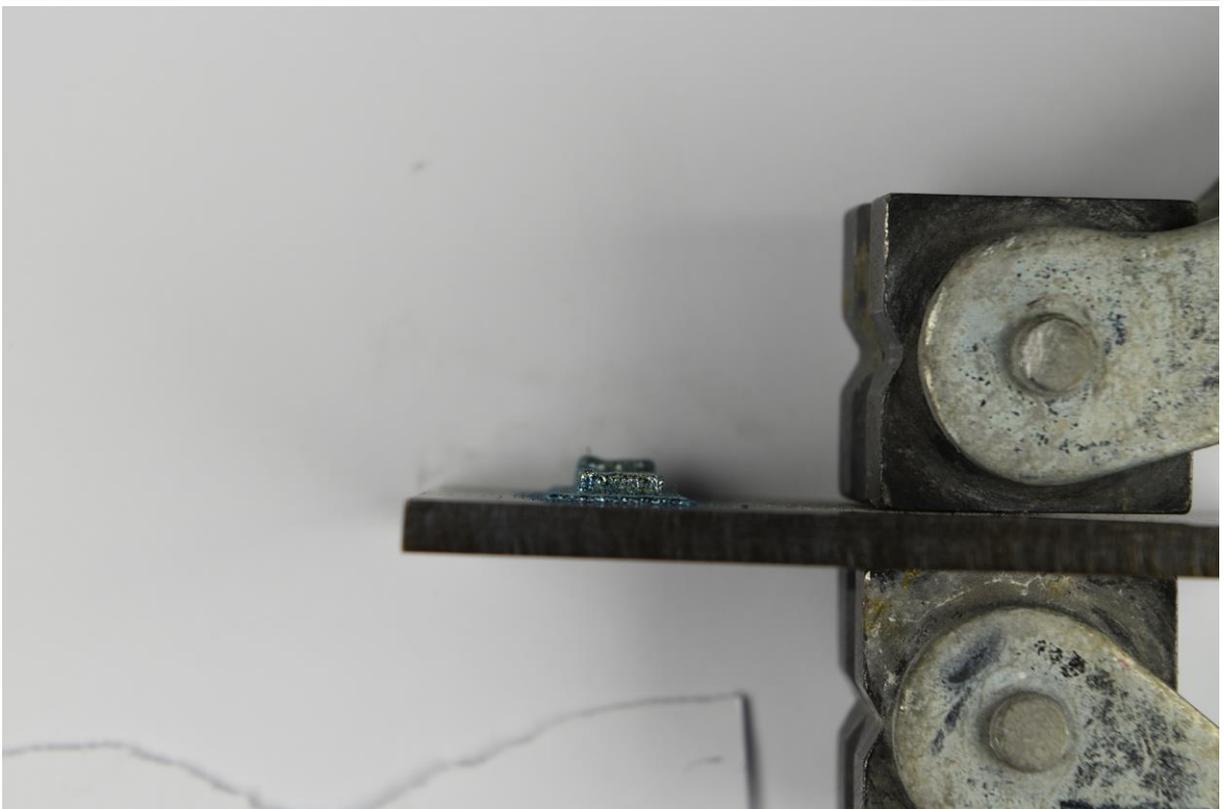
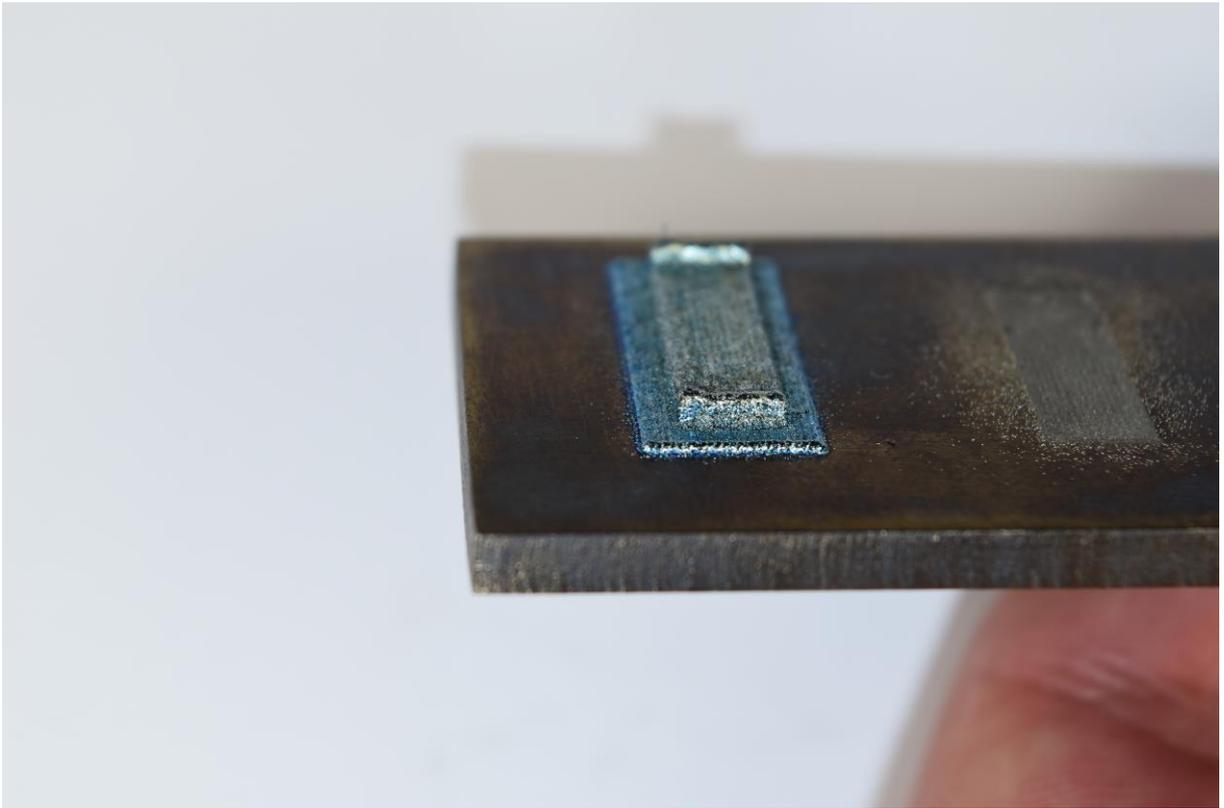
Platte 106



Platte 106.2

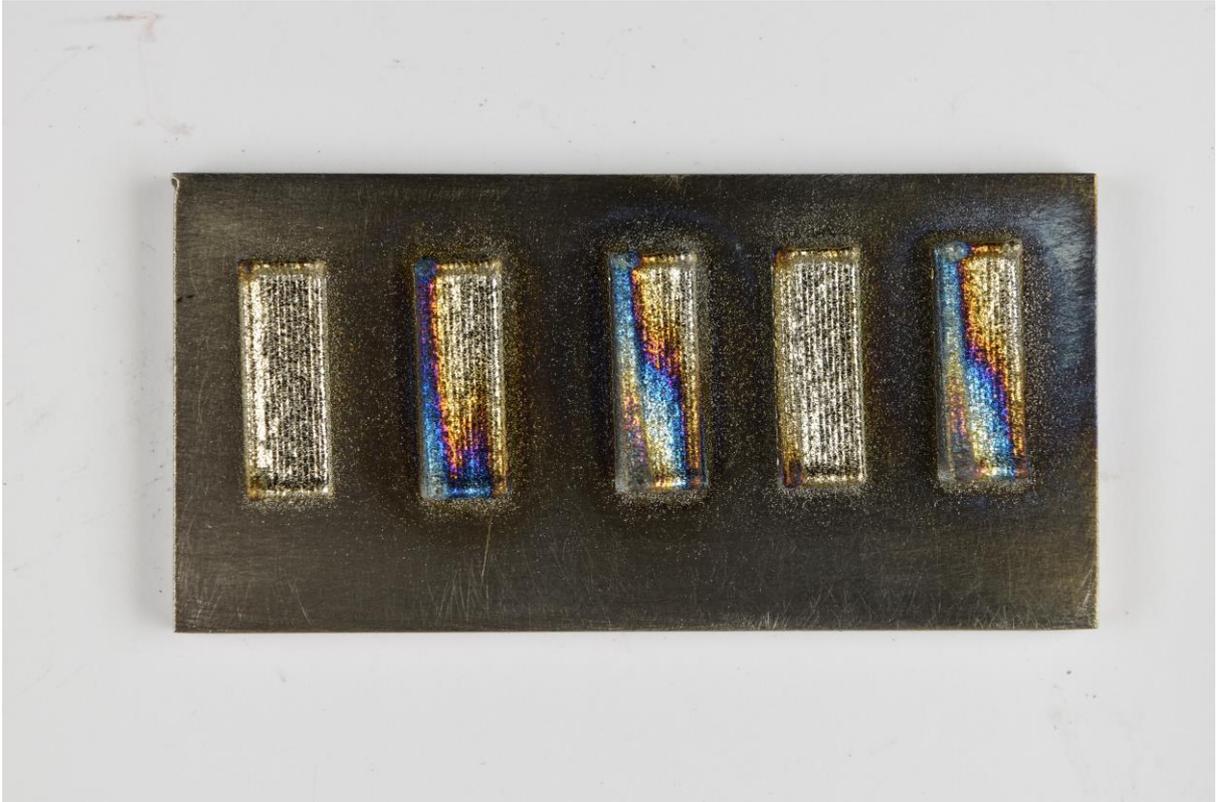


Platte 106.3



Fotos Vorbelichten

Platte 104.2





Platte 104.3





Platte 104.4





Fotos Ofenversuche

Vorwärmen mit 400°C:

Platte 108; Probe 108.1:



Vorwärmen bei 450°C:

Platte 107:



Platte 113:



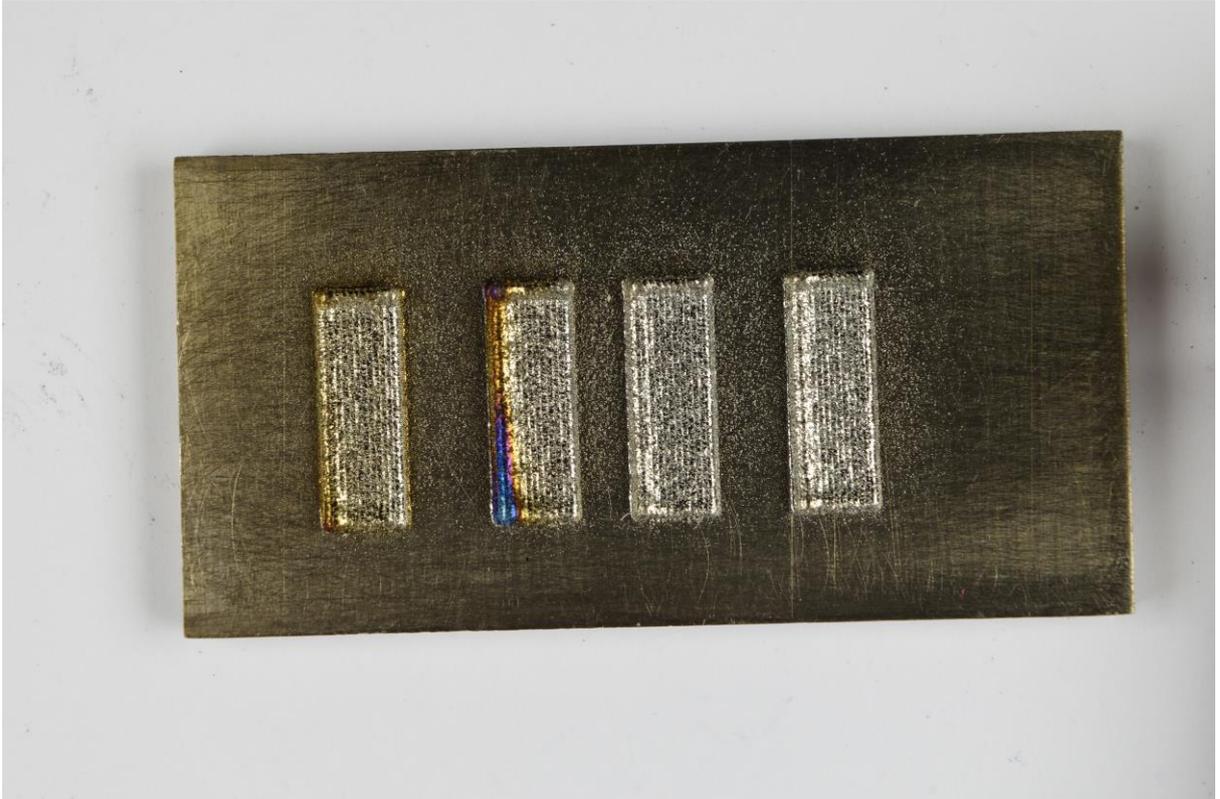


Platte 115:



Vorwärmen bei 550°C:

Platte 114



Vorwärmen bei 600°C:

Platte 108; Proben 108.2; 108.3:





## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Nabil

Vorname: Behzad

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung einer Prozessstrategie zur Erzeugung von Nickel-Titan Dichtflächen mittels Laser-Pulver Auftragschweißen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

22.03.2022

Datum

Unterschrift im Original