

**Laserassistierte Beschichtungstechnologie für nachhaltige Gleitlager als  
effizienter Ersatz des Schleudergussverfahrens zur Reduktion des  
Schwermetallgehalts in Lagerbronzen**

**Kurzform:**

**„LAGER“**


## **Abschlussbericht**

12. Juni 2017

Firma: ADMOS Gleitlager GmbH  
Ansprechpartner: Herr Jörg Hosemann  
Straße: Wilhelminenhofstraße 89 a  
Ort: 12459 Berlin

### **Kooperationspartner**

Firma: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-  
Vorpommern GmbH  
Ansprechpartner: Herr Dr. Rigo Peters  
Straße: Alter Hafen Süd 4  
Ort: 18069 Rostock

06/02		<b>Projektkennblatt</b>		
		der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>		
Az	<b>32851/01</b>	Referat	Fördersumme <b>117.000,00</b>	
<b>Antragstitel</b>	Laserassistierte Beschichtungstechnologie für Gleitlager als effizienter Ersatz des Schleudergussverfahrens zur Reduktion des Schwermetallgehalts in Lagerbronzen			
<b>Stichworte</b>	Beschichtung, Laser			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>1 Jahr und 4 Monate</b>	<b>15.11.2015</b>	<b>15.03.2017</b>	<b>4</b>	
Zwischenberichte	18.07.2016			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	ADMOS Gleitlager GmbH Wilhelminenhofstraße 89a 12459 Berlin		Tel 030 / 530 09 0 Fax 030 / 530 09 166 Projektleitung Jörg Hosemann Bearbeiter Marco Paschke u.a.	
<b>Kooperationspartner</b>	Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Mecklenburg-Vorpommern GmbH Alter Hafen Süd 4 18069 Rostock			
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>				
<p>Ziel des Projektes ist primär die Entwicklung eines wirtschaftlichen, laserbasierten Beschichtungsprozesses mit einem vorzugsweise pulverförmigen Ausgangsmaterial zum Aufbringen von Gleitschichten für Hochleistungslager, auf der Basis von Kupfer- oder Weißmetalllegierungen. Dabei kann eine energetische Einsparung von bis zu 80 % im Vergleich zu der herkömmlichen Fertigungstechnologie (Gießen) erzielt werden. Außerdem kann durch diese Entwicklung der Materialeinsatz (Stahl, Bronze insgesamt) durch das definierte Auftragen um etwa 70 % gesenkt und insbesondere die Anteile Blei um etwa 16 %, Kupfer um 60 % und Zinn um 10 % reduziert werden. In einem sekundären Schritt soll der Legierungsanteil Blei von derzeit 20 % auf möglichst unter 1 % reduziert werden. Damit könnte ein nahezu bleifreies Gleitlager die Anforderungen der RoHS erfüllen, ohne auf die bewährte Bronzelegierung („Cu&lt;Pb1Sn6...“) zu verzichten. Das soll maßgeblich durch den Einsatz von bleifreien Bronzen (z. B. CuSn6) oder Aluminiumbronzen (z. B. CuAl10) als Hauptbestandteile unter geringer Zugabe weiterer Legierungselemente wie z. B. Nickel, Mangan, Silizium oder Eisen u.a. erreicht werden. Dadurch können flexible Lagerbeschichtungen für Anwendungen mit z. B. erhöhtem Verschleiß- oder Korrosionsschutz bei gleichzeitig guten Festigkeiten und Gleiteigenschaften erzielt werden.</p>				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>				

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Im ersten Arbeitsschritt wurde ein grundsätzliches Prozessverständnis erarbeitet. Dies diente zum einen der Festlegung von festen Parametern (beispielsweise Fokusabstand und Pulverdüsengröße) und zum anderen der Charakterisierung der variablen Prozessparameter (Laserleistung, Auftragsgeschwindigkeit usw.). Danach erfolgten erste Beschichtungsversuche mit einzelnen Spuren auf dem Stützkörper, um so das Parameterspektrum weiter eingrenzen zu können. Im darauffolgenden Schritt wurden überlappende Spuren, sogenannte Auftragsteppiche, auf den Stützkörper generiert. Durch das Übereinanderlegen von einzelnen Auftragsteppichen können so unterschiedliche Schichthöhen erstellt werden. Im Anschluss erfolgte die Bewertung der Auftragsteppiche anhand von zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen. Durch die Variationen der Parameter konnten die anfänglich auftretenden Unregelmäßigkeiten reduziert werden. Dieses methodische Vorgehen wurde sowohl bei den Bleibronzelegierungen als auch bei den Weißmetallelegierungen angewendet.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Die im Rahmen des Projekts erlangten Ergebnisse lassen einen laserbasierten Beschichtungsprozess zum Aufbringen von Gleitschichten für Hochleistungslager auf der Basis von Kupfer- oder Weißmetallelegierungen zu. So konnten für ausgewählte Weißmetallelegierungen Parameter bestimmt werden, die eine nahezu von Unregelmäßigkeiten freie Erzeugung einer laserbasierten Gleitschicht ermöglichen. Bei den verwendeten Kupferlegierungen treten in den generierten Schichten noch vermehrt Unregelmäßigkeiten in Form von Poren auf. Durch weitere Optimierung der Prozessparameter sollen diese Unregelmäßigkeiten auf ein normgerechtes Minimum reduziert werden. Jedoch zeigt sich sowohl bei den Weißmetallelegierungen als auch bei den Kupferlegierungen das hohe Einsparpotenzial der Laserbeschichtung gegenüber dem aktuell im Einsatz befindlichen Gussverfahren. Durch die Verwendung des Lasers kommt es zu einer Reduzierung des Energieverbrauches um ca. 50 %. Darüber hinaus kann bei speziell verwendeten Kupfer-Bleilegierungen der Bleigehalt um 86 % reduziert werden, ohne dabei die charakteristischen Merkmale des Gleitlagers zu verändern.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Diverse Messeauftritte unter anderem Hannover Messe 2017.

### ***Fazit***

Die Erzeugung von Gleitschichten für Hochleistungslager auf der Basis von Kupfer- und Weißmetallelegierungen mittels Laserpulverauftragsschweißen ist gegeben. Jedoch treten insbesondere bei den Kupferlegierungen noch vermehrt Unregelmäßigkeiten in den generierten Schichten auf. Bei diesem Legierungstyp besteht noch ein weiterer Optimierungsbedarf. Jedoch zeigen sich schon jetzt die Vorteile des Laserbeschichtens gegenüber dem konventionellen Gussverfahren. So wird der Energieverbrauch um die Hälfte reduziert, es kommt zu einem geringeren Materialverlust und bei ausgewählten Kupfer-Bleilegierungen kann der Bleigehalt minimiert werden.

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	4
Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken .....	5
Verzeichnis von Tabellen .....	7
Zusammenfassung.....	8
1. Einleitung .....	9
2. Hauptteil.....	12
2.1 Beschreibung des Prozesses Laserpulverauftragsschweißen .....	12
2.2 Versuchsaufbau und Versuchswerkstoffe .....	14
2.3 Laserpulverauftragsschweißen von Bleibronze.....	15
2.3.1 Auswertung der Schweißversuche mit Bleibronze.....	16
2.4 Laserpulverauftragsschweißen von neuen Lagerlegierungen .....	27
2.4.1 Auswertung der Schweißversuche mit neuen Lagerlegierungen .....	27
2.5 Gegenüberstellung konventionelles Lager gegen lasergeschweißtes Lager .....	39
2.6 Fazit .....	41
Literaturverzeichnis .....	43

## Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken

Abbildung 1: Prinzip des Laserpulverauftragsschweißens .....	13
Abbildung 2: Ytterbium Faserlaser YLR 10000 .....	14
Abbildung 3: Sechs-Achs Knickarmroboter.....	14
Abbildung 4: verwendeter Laserkopf .....	15
Abbildung 5: Pulverförderer GTV PF 2/2 .....	15
Abbildung 6: Erste Auftragschweißungen mit einer Blei-Bronze-Legierung .....	17
Abbildung 7: Proben 10 bis 17.....	18
Abbildung 8: Übersicht Probe 11; Fokusabstand 30 mm .....	19
Abbildung 9: Übersicht Probe 16; Fokusabstand 40 mm .....	19
Abbildung 10: Übersicht Probe 29 .....	20
Abbildung 11: Probe 29 100-fache Vergrößerung.....	20
Abbildung 12: Probe 29 200-fache Vergrößerung.....	20
Abbildung 13: Übersicht Probe 57 .....	21
Abbildung 14: Übersicht Probe 58 .....	21
Abbildung 15: Probe 57 200-fache Vergrößerung.....	22
Abbildung 16: Probe 58 200-fache Vergrößerung.....	22
Abbildung 17: Übersicht Probe 62 .....	23
Abbildung 18: Übersicht Probe 65 .....	23
Abbildung 19: Probe 62 200-fache Vergrößerung.....	23
Abbildung 20: Probe 65 200-fache Vergrößerung.....	23
Abbildung 21: Übersicht Probe 77 .....	24
Abbildung 22: Probe 77 100-fache Vergrößerung.....	25
Abbildung 23: Probe 77 200-fache Vergrößerung.....	25
Abbildung 24: Übersicht Probe 139 .....	25
Abbildung 25: Spektroskopie Partikel .....	26
Abbildung 26: Probe 85 Beschichtung aus Pufferschicht und Deckschicht.....	27
Abbildung 27: Schweißversuche 7 bis 14 .....	29
Abbildung 28: Proben 15 bis 22 (Pufferschichten und zweilagige Beschichtungen).....	30
Abbildung 29: Probe 18 100-fache Vergrößerung.....	31
Abbildung 30: Kupferpenetration Probe 18 100-fache Vergrößerung.....	31
Abbildung 31: Porosität Probe 18 100-fache Vergrößerung.....	31
Abbildung 32: Porosität in Probe 22 100-fache Vergrößerung .....	32
Abbildung 33: FeSn <sub>2</sub> -Kristalle in Probe 21 200-fache Vergrößerung.....	32

---

Abbildung 34: Proben 23 bis 49 (Einzelspuren für Parameterfindung Pufferlage).....	33
Abbildung 35: Proben 50 bis 76 (Einzelspuren für Parameterfindung Pufferlage).....	33
Abbildung 36: Proben 77 bis 86 (Ermittlung des Versatzes zwischen den Spuren) .....	33
Abbildung 37: Pore in der Anbindungszone Probe 77 100-fache Vergrößerung .....	35
Abbildung 38: Poren in Anbindungszone Probe 78 50-fache Vergrößerung .....	35
Abbildung 39: FeSn <sub>2</sub> -Kristalle in Probe 77 500-fache Vergrößerung .....	35
Abbildung 40: FeSn <sub>2</sub> -Kristalle in Probe 80 1000-fache Vergrößerung .....	35
Abbildung 41: Proben 87 bis 93 - zweilagiger Schichtaufbau mit Parametern der Pufferlage von Probe 79 .....	36
Abbildung 42: Proben 101 bis 111 .....	37
Abbildung 43: Proben 120 bis 130 .....	37
Abbildung 44: FeSn <sub>2</sub> -Kristalle in Probe 125 500-fache Vergrößerung .....	38
Abbildung 45: hoch gewachsene FeSn <sub>2</sub> -Kristalle Probe 125 500-fache Vergrößerung.....	38
Abbildung 46: Übersicht Probe 134 .....	38
Abbildung 47: Übersicht Probe 140 .....	38

## Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1: schematische Übersicht der Bereiche des Auftragsschweißens.....	12
Tabelle 2: chemische Zusammensetzung des metallurgischen Pulvers .....	16
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung S355J2.....	16
Tabelle 4: Prozessparameter Proben 11 und 16.....	18
Tabelle 5: Prozessparameter der Probe 29 .....	20
Tabelle 6: Schweißparameter Probe 60 bis 65 .....	22
Tabelle 7: Schweißparameter Probe 77 .....	24
Tabelle 8: Prozessparameter der Deckschicht .....	25
Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung von Lacomet 3.....	27
Tabelle 10: Prozessparameter Probe 12 bis 14.....	28
Tabelle 11: Prozessparameter der Probe 15 bis 18, 21 und 22 .....	30
Tabelle 12: Prozessparameter Probe 77 bis 80.....	34
Tabelle 13: Prozessparameter Probe 88, 92 und 93.....	36
Tabelle 14: Prozessparameter Probe 125, 134 und 140.....	38
Tabelle 15: absoluter Verbrauch Bleibronze .....	39
Tabelle 16: Energieverbrauch.....	39

## Zusammenfassung

Die traditionell verwendeten Gießprozesse, welche bei der Herstellung von Verbundgleitlagern zum Einsatz kommen, sind mit einem hohen Werkstoff- und Energieaufwand verbunden. Hinzu kommt, dass spezielle Bronzelager immer noch einen sehr hohen Bleianteil über die gesamte Lagerschicht aufweisen. Daher wird nach alternativen Herstellungsverfahren gesucht, welche Ressourcen schonender sind und den Bleigehalt in den Lagern senken können.

Im Zeitraum des vorliegenden Projekts wurden Parametersätze ermittelt, welche ein laserasistiertes Beschichten eines Gleitlagers mit einer Bronzelegierung ermöglichen. Durch die Kombination unterschiedlicher Bronzelegierungen kann der Bleigehalt bei entsprechenden Lagertypen signifikant gesenkt werden, ohne dabei die charakteristischen Merkmale des Lagers zu verändern. Des Weiteren stehen Parameter zur Verfügung, die ein Laserbeschichten mit alternativen Lagerlegierungen ermöglichen. Somit können im Vergleich zum aktuell verwendeten Schleuder- und Standguss mehrere Kilogramm an Grund- und Zusatzwerkstoff pro Lager eingespart werden. Mit Bezug auf die Energieeinsparung kommt es bei der Verwendung des Laserpulverauftragsschweißens zur Reduzierung des benötigten Stroms um 50 % im Vergleich zum verwendeten Schleuderguss.

In weiteren Projektphasen sollen die bisher gewonnen Erkenntnisse auch auf andere Lagerlegierungen ausgeweitet werden. Auch die Kombination unterschiedlicher Lagerwerkstoffe in einem Lager ist durch die Verwendung des Laserprozesses nun denkbar und soll erprobt werden. Weiterhin gilt es, auch die bisher untersuchten Lagerlegierungen genaueren Untersuchungen auf entsprechenden Gleitlagerprüfständen zu unterziehen.



## 1. Einleitung

Gleitlager sind neben den Wälzlagern eine der Lagerbauarten, die mit am häufigsten in der Industrie verwendet werden. Im Unterschied zum Wälzlager, haben die sich relativ zueinander bewegendenden Bauteile einen direkten Kontakt miteinander, sie gleiten aufeinander. Durch eine reibungsarme Materialpaarung zwischen den beiden Gleitpartnern kann die hervorgerufene Gleitreibung minimiert werden. Eine unterschiedliche Materialkombination zwischen dem Lager und dem zu lagernden Bauteil kann durch das Einbringen einer Lagerbuchse bewerkstelligt werden. Im Unterschied zu ihrem Gleitpartner sollte die Lagerbuchse bzw. Lagerfläche immer einen geringen Härtewert aufweisen, damit hier etwaiger Verschleiß zuerst immer im Lager stattfindet und nicht am lagernden Bauteil. Eine andere Möglichkeit zur Herstellung der Materialkombination bietet die Beschichtung eines Stützkörpers mit einer Gleitlagerlegierung, man spricht dann von einem Verbundgleitlager. Typische Verbundgleitlagerlegierungen die hierfür verwendet werden, sind Zinnlegierungen, die sogenannten Weißmetalle bzw. Lagermetalle, Aluminiumlegierungen oder Bleibronzelegierungen.

Für die Beschichtung eines Gleitlagers mit einer Bleibronzelegierung werden hauptsächlich zwei konventionelle Fertigungsverfahren genutzt, zum einen das Standgussverfahren und zum anderen das Schleudergussverfahren. Beide Verfahrensvarianten werden im Anschluss genauer beschrieben:

- Schleudergussverfahren

Beschreibung: Ausschleudern von Gleitlagerrohlingen mit Bleibronzen

1. In den Stahlrohling wird die Bleibronze in Form von grobem Granulat eingefüllt, in die Schleudergussmaschine eingespannt und in Rotation versetzt.
2. Der rotierende Rohling wird in eine Kupferspule gefahren. Durch die Erzeugung einer Mittelfrequenz mittels eines Umrichters wird ein Magnetfeld induziert, mit welchem der Rohling auf 1.150 °C erwärmt wird. Durch den glühenden Rohling schmilzt die Bleibronze und setzt sich auf Grund der Fliehkräfte an der Innenwand des Rohlings ab und wird mit Hilfe einer Wasserkaskade abgekühlt.
3. Die aufzuwendende energetische Leistung der Mittelfrequenzanlage liegt bei 200 kWh, die Aufheizzeit hängt von der jeweiligen Stärke des Stahlrohlings ab. Die eingeschleuderte Menge an Bleibronze beträgt das 3- bis 5-fache der benötigten Auslieferungsmenge, da auf Grund der Bearbeitungszugaben ein deutlicher Mehraufguss vorgenommen werden muss.

- Standgussverfahren

Beschreibung: Außen zu beschichtende Stahlrohlinge mit Bleibronze

1. Um den Stahlrohling wird eine Stahlhülse aufgeschumpft und das Bronzegranulat in den Spalt eingefüllt.
2. Wie bei dem Schleudergussprozess wird das System erwärmt. Ausnahme – der Rohling muss nicht rotieren.
3. Die Leistung der Anlage liegt ebenfalls bei bis zu 250 kWh; das Einsatzmaterial beträgt allerdings das 7- bis 10-fache.

Hinzu kommen entsprechend große Bearbeitungszentren, in denen die Stützkörper bzw. späteren Verbundgleitlager mechanisch vor- und nachbehandelt werden müssen. Sowohl beim Standguss als auch beim Schleuderguss haben Temperaturabweichungen großen Einfluss auf die spätere Qualität des Lagers. Eine Prozesskontrolle während des Gießens und Erstarrens ist nur eingeschränkt möglich. Somit ist die Produktion von Verbundgleitlagern, durch die mangelnde Überwachung, Steuerung und Regelung beim Gussprozess sowie dem hohen Energie- und Materialaufwand zur Erzeugung einer homogenen Verbundschicht, ein risikobehaftetes und kostenintensives Herstellungsverfahren.

Ziel des Projektes ist primär die Entwicklung eines wirtschaftlichen, laserbasierten Beschichtungsprozesses mit einem vorzugsweise pulverförmigen Ausgangsmaterial zum Aufbringen von Gleitschichten für Hochleistungslager, auf der Basis von Kupfer- oder Weißmetalllegierungen. Dabei kann eine energetische Einsparung von bis zu 80 % im Vergleich zu der herkömmlichen Fertigungstechnologie, des Gießens, erzielt werden. Diese Annahme ist begründet durch die Bewertung der benötigten Gesamtleistung im Vergleich (Guss: ~200 kWh, Laser: ~40 kWh). Außerdem kann durch diese Entwicklung der Materialeinsatz (Stahl, Bronze insgesamt), durch das definierte Auftragen, insgesamt um etwa 70 % gesenkt werden und insbesondere die Anteile Blei um etwa 16 %, Kupfer um 60 % und Zinn um 10 % reduziert werden. In einem sekundären Schritt soll der Legierungsanteil Blei von derzeit 20 % auf möglichst unter 1 % reduziert werden. Damit könnte ein nahezu bleifreies Gleitlager die Anforderungen der RoHS erfüllen, ohne auf die bewährte Bronzelegierung („Cu<Pb1Sn6“) zu verzichten. Das soll maßgeblich durch den Einsatz von bleifreien Bronzen (z. B. CuSn6) oder Aluminiumbronzen (z.B. CuAl10) als Hauptbestandteile unter geringer Zugabe weiterer Legierungselemente wie z. B. Nickel, Mangan, Silizium oder Eisen u. a. erreicht werden. Dadurch können flexible Lagerbeschichtungen für Anwendungen mit z. B. erhöhtem Ver-

schleiß- oder Korrosionsschutz bei gleichzeitig guten Festigkeiten und Gleiteigenschaften erzielt werden.

Im ersten Projektabschnitt sollen die Prozessparameter für das Laserpulverauftragsschweißen mit einer herkömmlichen Bleibronze ermittelt und optimiert werden. Die Auswertung der Schweißversuche erfolgt parallel zu den durchgeführten Schweißungen, damit die Erkenntnisse der Auswertung direkt für die weitere Parameterbestimmung verwendet werden können. Zeitgleich sollen alternative Lagerlegierungen recherchiert und beschafft werden. Im weiteren Projektverlauf sollen auch für diese alternativen Lagerlegierungen Parameter für das Laserpulverauftragsschweißen ermittelt werden. Zum Abschluss des Projekts werden entsprechende Demonstratoren gefertigt, welche dem späteren Anwender für Tests bereitgestellt werden.

## 2. Hauptteil

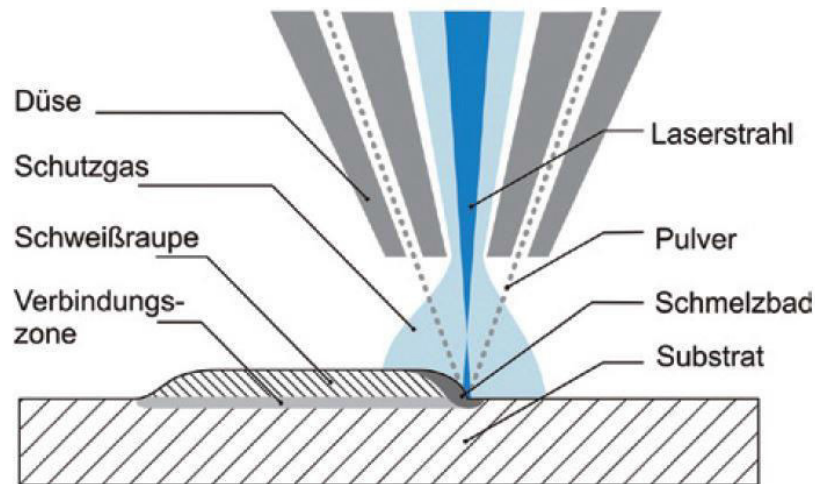
### 2.1 Beschreibung des Prozesses Laserpulverauftragsschweißen

Als Auftragsschweißen wird das Beschichten eines Werkstücks durch Schweißen bezeichnet. Ziel dieses Verfahrens ist die Herstellung einer funktionalen Oberfläche, die vorrangig den Widerstand gegen Verschleiß und Korrosion erhöhen soll. Dies wird durch das Aufbringen eines geeigneten Auftragswerkstoffs erreicht. Grund- und Auftragswerkstoff können in ihren chemischen Zusammensetzungen artgleich oder artfremd sein. In der Regel erfolgt die Beschichtung mit einem artfremden Werkstoff. Das Auftragsschweißen kann in einzelne Bereiche untergliedert werden. Eine schematische Übersicht der Bereiche ist in Tabelle 1 dargestellt. [1]

**Tabelle 1: schematische Übersicht der Bereiche des Auftragsschweißens**

<b>Panzerungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verschleißschutzschichten zur Erhöhung des Verschleißwiderstandes</li> </ul>
<b>Plattierungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Korrosionsschutzschichten zur Erhöhung der chemischen Beständigkeit</li> </ul>
<b>Pufferschichten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewährleistung einer Bindung zwischen nicht artgleichen Werkstoffen</li> </ul>
<b>Formgebendes Auftragsschweißen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herstellung definierter Konturen mit artgleichem Auftrags- und Grundwerkstoff</li> </ul>

Verwendete Beschichtungswerkstoffe sind beim Laserpulverauftragsschweißen metallurgische Pulver. Durch das Hinzufügen von Legierungselementen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Pulverkombinationen möglich. Diese werden mit Hilfe einer geeigneten Pulverdüse und einem Fördergas in das durch einen Laserstrahl erzeugte, streng lokalisierte Schmelzbad eingebracht. Dort schmelzen sie auf und verbinden sich mit dem Grundwerkstoff. Der dabei erzeugte Aufmischungsgrad ist durch den geringfügig angeschmolzenen Grundwerkstoff minimal und beträgt meist nur 2 % bis 5 %. Das Verfahrensprinzip des Laserpulverauftragsschweißens veranschaulicht Abbildung 1. [2, 3, 4]



**Abbildung 1: Prinzip des Laserpulverauftragsschweißens**

Als Vorteile des Laserpulverauftragsschweißens gegenüber konventionellen Verfahren, zu denen das Auftragsschweißen mittels WIG- oder MSG-Verfahren zählen, sind die folgenden Punkte zu nennen:

- Geringer Wärmeeintrag während des Schweißprozesses und eine kleine Wärmeinflusszone
- Minimaler Verzug aufgrund geringfügiger thermischer Beeinflussung des Werkstückes
- Geringer Aufmischungsgrad von Grund- und Auftragswerkstoff
- Sehr gute Reproduzierbarkeit bei hohen Schweißgeschwindigkeiten und hoher erreichbarer Präzision
- Vielfalt kombinierbarer Grund- und Zusatzwerkstoffe
- Möglichkeit einer endkonturnahen Bearbeitung [4, 5]

## 2.2 Versuchsaufbau und Versuchswerkstoffe

Die Versuche im Rahmen dieses Projektes wurden mit einem diodengepumpten Ytterbium-Multi-Mode-Faserlaser der Baureihe YLR 10000 der Firma IPG Laser GmbH durchgeführt, siehe Abbildung 2.



**Abbildung 2: Ytterbium Faserlaser YLR 10000**



**Abbildung 3: Sechs-Achs-Knickarmroboter**

Die Laserstrahlung der verwendeten Anlage emittiert mit einer Wellenlänge von 1070 nm und verfügt mit einem Strahlparameterprodukt von 11,6 mm\*rad über eine hohe Strahlqualität. Die Ausgangsleistung des Faserlasers ist im kontinuierlichen Betrieb auf maximal 10 kW stufenlos regelbar. Die Laserstrahlung wird über ein 30 m langes flexibles Lichtleiterkabel zur Bearbeitungsoptik YW50 der Firma Precitec geführt. Das Lichtleiterkabel besitzt einen Faserkerndurchmesser von 200  $\mu\text{m}$  und ist speziell für hohe Laserausgangsleistungen ausgelegt. Für die Versuche wurde vorwiegend eine Optik mit einer Fokussierbrennweite von 250 mm verwendet.

An der Bearbeitungsoptik ist ein koaxialer Auftragsschweißkopf des Fraunhofer IWS Dresden befestigt. Es wird ein COAXpowerline Bearbeitungskopf verwendet, dessen Vorteile in einer koaxialen Pulverzufuhr und in einer geschützten innenliegenden Medienzufuhr für metallurgisches Pulver, Schutzgas und Kühlflüssigkeit liegen. Der Beschichtungskopf

COAXpowerline ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Laserkopf ist an einem Sechs-Achs-Knickarmroboter der Firma Fanuc montiert, siehe Abbildung 3. Die Zufuhr des metallurgischen Pulvers erfolgt durch den Pulverförderer GTV PF 2/2, siehe Abbildung 5. Dieser transportiert unter Verwendung des Fördergases Argon das Pulver vom Förderer über einen Schlauch zu der Beschichtungsdüse. Entsprechend der genutzten Pulverdüse variiert der Arbeitsabstand und Pulverfokus zwischen 13 mm und 18,8 mm. Die Schweißversuche wurden meist mit einer Pulverdüse von 7,8 mm Durchmesser durchgeführt, woraus sich ein Arbeitsabstand von 13 mm ergibt.



Abbildung 4: verwendeter Laserkopf



Abbildung 5: Pulverförderer GTV PF 2/2

### 2.3 Laserpulverauftragsschweißen von Bleibronze

Das für die Versuche verwendete Beschichtungsmaterial ist ein metallurgisches Pulver auf Kupferbasis, welches mit Blei und Zinn legiert ist. Die Bezeichnung des Herstellers für das Beschichtungspulver lautet CuPb19Sn3. Die chemische Zusammensetzung des Pulvers wurde durch eine Spektralanalyse ermittelt und ist in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2: chemische Zusammensetzung des metallurgischen Pulvers**

	<b>Zn in Ma%</b>	<b>Pb in Ma%</b>	<b>Sn in Ma%</b>	<b>P in Ma%</b>	<b>Mn in Ma%</b>	<b>Fe in Ma%</b>	<b>Ni in Ma%</b>
<b>CuPb19Sn3</b>	<0,004	~19,00	3,68	0,0057	<0,0015	0,0068	0,0027
	<b>Si in Ma%</b>	<b>Cr in Ma%</b>	<b>As in Ma%</b>	<b>Sb in Ma%</b>	<b>S in Ma%</b>	<b>Cu in Ma%</b>	
<b>CuPb19Sn3</b>	<0,002	<0,0035	0,0142	0,0335	0,0099	77,21	

Als Stützkörpermaterial kommt ein Baustahl der Güte S355J2 mit der Werkstoffnummer 1.0577 zum Einsatz. S355J2 ist ein typischer Stahl für die Verwendung im Gleitlager. Ein Kohlenstoffgehalt < 0,2 % ist Voraussetzung für eine gute Bindung, da mit steigendem Kohlenstoffgehalt auch der Perlitanteil im Gefüge steigt. Tabelle 3 beinhaltet die chemische Zusammensetzung des verwendeten Baustahls und die vorgeschriebenen Grenzwerte nach DIN EN 10025-2.

**Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung S355J2**

	<b>C in Ma%</b>	<b>Si in Ma%</b>	<b>Mn in Ma%</b>	<b>P in Ma%</b>	<b>S in Ma%</b>	<b>Cu in Ma%</b>
DIN EN 10025-2	≤ 0,20	≤ 0,55	≤ 1,60	≤ 0,025	≤ 0,025	≤ 0,55
Analyse	0,042	0,190	0,381	0,013	0,011	0,294

### 2.3.1 Auswertung der Schweißversuche mit Bleibronze

Die hier durchgeführten Versuche dienen der Parameterfindung und dem generellen Prozessverständnis des Laserpulverauftragsschweißens mit einer Bleibronzelegierung. Es wurden die wesentlichen Prozessparameter, wie die Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit und Pulverfördertrate, eingegrenzt, um eine Auftragsschicht zu realisieren. In Anlehnung an die bereits durchgeführten Vorversuche (aus dem Jahr 2012) bei der SLV M-V sollten diese Parameter hinsichtlich des Einflusses auf die Bildung der Kupferpenetrationen und Poren untersucht werden. Die folgenden Darstellungen beziehen sich auf ausgewählte Proben der Vorversuche. Die wichtigsten Schweißparameter werden explizit genannt.

Zu Beginn der Versuche wurden einige Einzelspuren geschweißt. Die ersten Schweißversuche, welche mit einer Laserleistung von 1000 bis 2000 W und einer Schweißgeschwindigkeit von 0,5 m/min durchgeführt wurden, sind in Abbildung 6 dargestellt. Wäh-



rend des Schweißens konnte ein instabiler Prozess beobachtet werden. Dem wurde mit einer Erhöhung der zunächst gewählten Schutzgasdurchflussmenge des Argons von 10 l/min auf 20 l/min entgegen gewirkt. Für alle weiteren Versuche blieb diese konstant bei 20 l/min. Die anschließende Sichtprüfung der Spuren ergab eine unzureichende Auftragshöhe und einen tiefen Einbrand in den Stützkörper, da nicht genügend Pulver zum Aufschmelzen zur Verfügung stand. Diese Erkenntnis führte zum Tausch der Dosierscheibe, da bereits die maximale Umdrehungszahl des Pulverförderers eingestellt war.



**Abbildung 6: Erste Auftragsschweißungen mit einer Blei-Bronze-Legierung**

Anschließend wurden mehrere Einzelspuren nebeneinander gelegt und sogenannte Teppiche geschweißt. Die ersten Schweißteppiche sind in Abbildung 7 dargestellt. Bei der Sichtprüfung von Probe 10 und 11 fiel auf, dass der Einbrand in den Grundwerkstoff noch sehr tief ist. Daraufhin erfolgte eine Anpassung des Fokusabstands der Fokussieroptik von 20 mm auf zunächst 30 mm und schließlich auf 40 mm. Ab Probe 15 blieb der Fokusabstand konstant bei 40 mm. Erste Mikroschliffe nach DIN EN ISO 17639 verdeutlichten die bereits bekannten Schweißnahtunregelmäßigkeiten in der Anbindungszone.

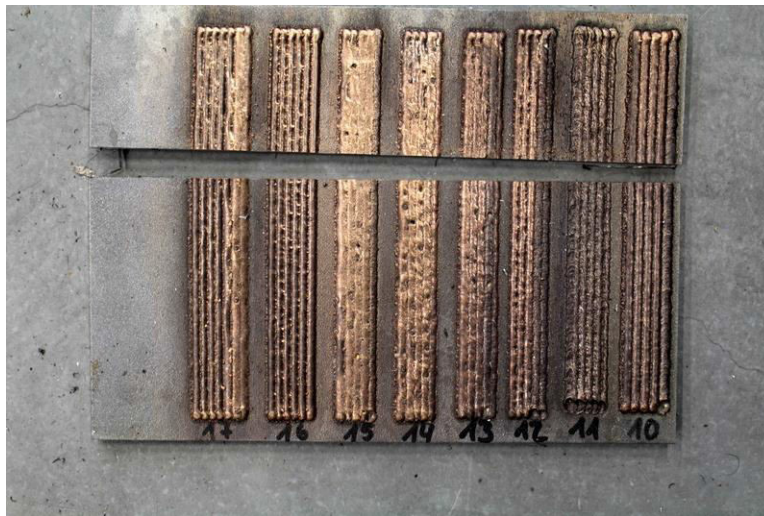


Abbildung 7: Proben 10 bis 17

Tabelle 4: Prozessparameter Proben 11 und 16

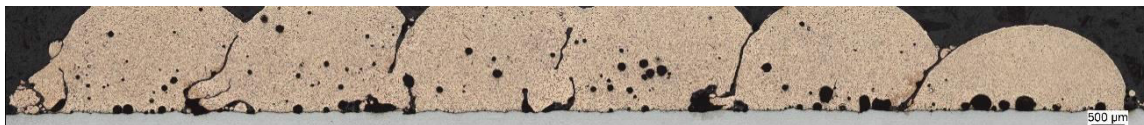
	Laserleistung in W	Schweißgeschwindigkeit in m/min	Versatz in mm	Umdrehungen Dosierscheibe in U/min	Streckenenergie in J/cm	Fokusabstand in mm
<b>Probe 11</b>	2000	0,5	2,5	0,5	2400	30
<b>Probe 16</b>	1400	0,5	2,5	0,5	1680	40

Die Probe 11 und die Probe 16 sollen den Einfluss des Fokusabstandes auf das Schweißergebnis veranschaulichen. Die verwendeten Prozessparameter der untersuchten Proben sind in Tabelle 4 aufgelistet. Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigen den Einfluss des verringerten Fokusabstandes und der reduzierten Laserleistung auf die Tiefe des Einbrands. Im Mikroschliff der Probe 11 (Abbildung 8) ist ein sehr tiefer Einbrand von etwa 2,5 mm und ein dementsprechend hoher Aufmischungsgrad zu sehen. Durch die Vergrößerung des Fokusabstandes und Reduzierung der Leistung um 600 W konnte eine Aufmischung von metallurgischem Pulver und Grundwerkstoff und ein tiefer Einbrand vermieden

werden. In Probe 16 sind zwischen den einzelnen Spuren Bindefehler und in der Anbin-  
dungszone und der Auftragsschicht Poren zu erkennen, siehe Abbildung 9.



**Abbildung 8: Übersicht Probe 11; Fokusabstand 30 mm**

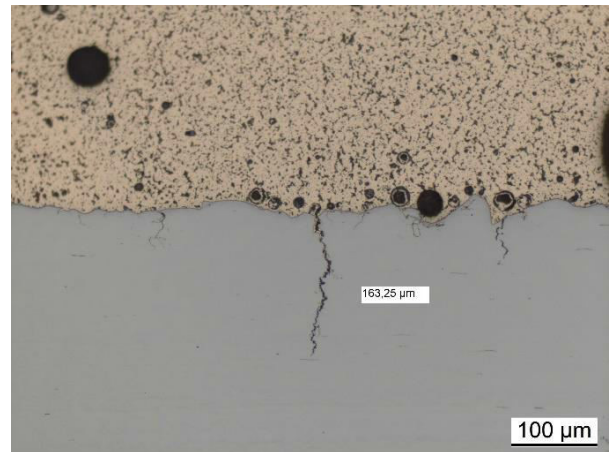


**Abbildung 9: Übersicht Probe 16; Fokusabstand 40 mm**

Bei weiteren Versuchsschweißungen variierten die Laserleistung und die Schweißge-  
schwindigkeit. Aufgrund der im Mikroschliff der Probe 16 detektierten Bindefehler zwischen  
den einzelnen Spuren erfolgte eine Verringerung des Versatzes von 3 mm auf 2,4 mm. Nach  
der optischen Bewertung der Proben 18 bis 30 wurde von Probe 29 ein Mikroschliff angefer-  
tigt. Die Schweißparameter dieses Versuches zeigt Tabelle 5, eine Übersicht der Probe  
stellt Abbildung 10 dar. Deutlich erkennbar sind im Schliff die Schweißnahtunregelmäßig-  
keiten in der Anbindungszone. Dies sind zum einen erneut Poren in der Bindezone und zum  
anderen Kupferpenetrationen in den Grundwerkstoff. Abbildung 11 und Abbildung 12  
stellen die Problematik der Schweißnahtunregelmäßigkeiten anschaulich dar. Während  
der Auswertung konnte eine maximale Eindringtiefe der Kupferpenetrationen von rund  
165 µm gemessen werden. Durch die Verringerung des Versatzes konnten Bindefehler  
zwischen den Spuren vermieden werden. Weiterhin wurde die geforderte Schichthöhe nicht  
erreicht. Aus der geforderten Auftragshöhe von 0,8 mm nach einer mechanischen Endbe-  
arbeitung ergibt sich eine Höhe von mindestens 1,5 mm nach dem Beschichten. Die ge-  
messene Schichthöhe von circa 0,8 mm bei Probe 29 ist dementsprechend ungenügend.

**Tabelle 5: Prozessparameter der Probe 29**

	Laserleistung in W	Schweiß- geschwindigkeit in m/min	Versatz in mm	Umdrehungen Dosierscheibe in U/min	Streckenenergie in J/cm
<b>Probe 29</b>	1700	2	2,4	0,6	510

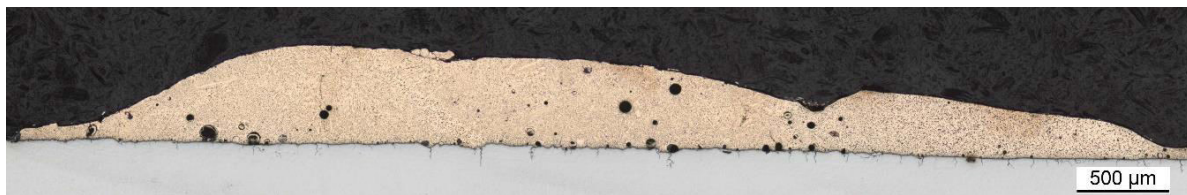
**Abbildung 10: Übersicht Probe 29****Abbildung 11: Probe 29 100-fache Vergrößerung****Abbildung 12: Probe 29 200-fache Vergrößerung**

Aufgrund der zu geringen Schichthöhe sollte im weiteren Verlauf der Versuche die Beschichtung zweilagig erfolgen. Das heißt, dass zunächst eine Grundschicht auf den Stützkörperwerkstoff aufgetragen und anschließend eine zweite Lage, die Decklage, auf die Grundschicht geschweißt wird. Da sich die Herstellung einer fehlerfreien Anbindungszone in den vorherigen Schweißversuchen als problematisch erwies, sollte in den folgenden Versuchen zunächst nur die Grundschicht geschweißt werden. Dazu wurden mehrere Parametersätze getestet und ausgewertet. Vermutlich liegt die Ursache der Kupferpenetrationen in den Grundwerkstoff in einer zu hohen Streckenenergie während des Schweißprozesses. Als Schlussfolgerung daraus erfolgte bei den weiteren Versuchen eine Senkung der Streckenenergie durch Verringerung der Laserleistung bzw. Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit. Die Auswertung der Proben 57 und 58 zeigte, dass durch eine höhere Laserleistung

tung und Auftragsgeschwindigkeit und einer daraus resultierenden geringeren Streckenenergie, im Vergleich zu den vorherigen Versuchen, keine Verbesserung in der Anbindungszone bezüglich der Schweißnahtunregelmäßigkeiten erreicht werden konnte. Es sind weiterhin Poren und Kupferpenetrationen in den Schlifflinien erkennbar. Dies verdeutlichen die folgenden Abbildungen der Probe 57 und 58. In Abbildung 13 ist eine Übersicht der Probe 57, welche sehr große Poren in der Beschichtung aufweist, dargestellt. Weiterhin sind zahlreiche kleinere Poren in der Anbindungszone ersichtlich. Verglichen mit Probe 58 (Abbildung 14) ist hinsichtlich der Porenanzahl kein Unterschied feststellbar.

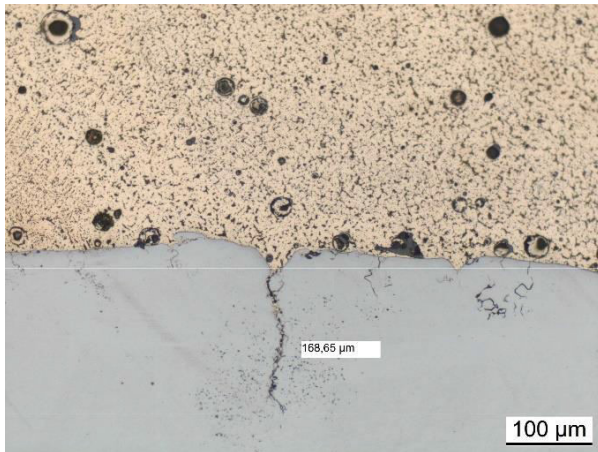


**Abbildung 13: Übersicht Probe 57**

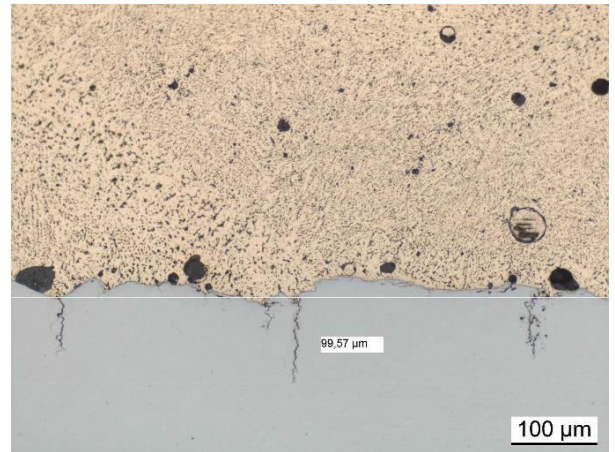


**Abbildung 14: Übersicht Probe 58**

Die auftretenden Kupferpenetrationen in den Grundwerkstoff konnte im Vergleich zu den vorherigen Versuchen nicht minimiert werden. Es treten weiterhin tiefe Penetrationen von Kupfer auf. Dies veranschaulichen Abbildung 15 und Abbildung 16. Hier sind Kupferpenetrationen in den Stützkörperwerkstoff ersichtlich. Die maximale Eindringtiefe der auftretenden Penetrationen liegt zwischen 100 µm bei Probe 58 und 169 µm bei Probe 57. Weiterhin zeigen die Abbildungen kleinere Poren in der Beschichtung und der Anbindungszone.



**Abbildung 15: Probe 57 200-fache Vergrößerung**

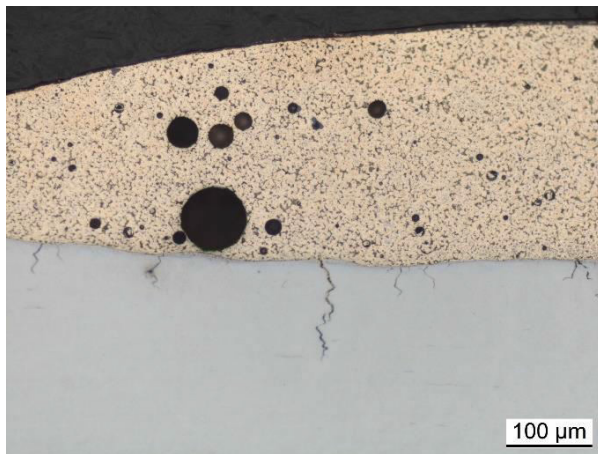
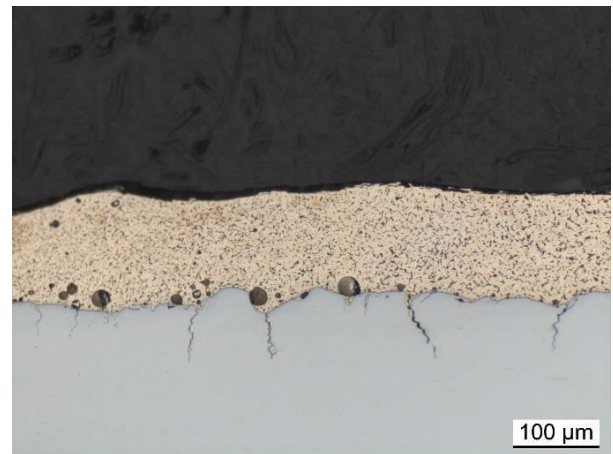


**Abbildung 16: Probe 58 200-fache Vergrößerung**

Die weiteren Versuche erfolgten mit nochmals reduzierter Streckenenergie durch eine Erhöhung der Auftragsgeschwindigkeit mit konstanter Laserleistung bei 2500 W. Die Schweißparameter der Proben 60 bis 65 sind in Tabelle 6 aufgeführt. Auch durch die weitere Reduzierung der Streckenenergie konnten die auftretenden Schweißnahtunregelmäßigkeiten nicht vermindert oder vermieden werden. Dies zeigen z. B. die Proben 62 und 65 deutlich (Abbildung 17 und Abbildung 18). Beide Proben weisen Poren in der Anbindungszone auf. Ebenfalls sind bereits in den Übersichten der Versuche 62 und 65 Kupferpenetrationen ersichtlich. Abbildung 19 und Abbildung 20 verdeutlichen, dass diese zahlreich auftreten und sehr tief in den Stützkörperwerkstoff eindringen. Die maximalen Eindringtiefen von circa 160 µm sind vergleichbar mit denen der Proben 57 und 58.

**Tabelle 6: Schweißparameter Proben 60 bis 65**

	Laserleistung in W	Schweiß- geschwindig- keit in m/min	Versatz in mm	Umdrehungen Dosierscheibe in U/min	Strecken- energie in J/cm
<b>Probe 60</b>	2500	5,0	2	2	300
<b>Probe 61</b>	2500	5,5	2	2	272,7
<b>Probe 62</b>	2500	6,0	2	2	250
<b>Probe 63</b>	2500	6,5	2	2	230,8
<b>Probe 64</b>	2500	7,0	2	2	214,3
<b>Probe 65</b>	2500	7,5	2	2	200

**Abbildung 17: Übersicht Probe 62****Abbildung 18: Übersicht Probe 65****Abbildung 19: Probe 62 200-fache Vergrößerung****Abbildung 20: Probe 65 200-fache Vergrößerung**

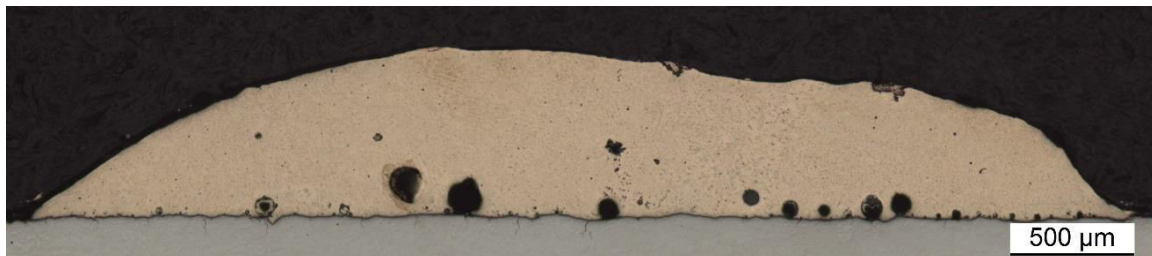
Weiterhin ist ein unregelmäßiger Schichtauftrag in den dargestellten Abbildungen zu erkennen. Dies lässt sich durch die zu hohe Auftragsgeschwindigkeit und die zu geringe Pulverfördererrate begründen. Mit steigender Auftragsgeschwindigkeit wird eine ungenügende Pulvermenge gefördert, um eine gleichmäßige Schicht aufzutragen. Wird die Schweißgeschwindigkeit erhöht, sollte auch die Pulverfördererrate durch Anpassung der Umdrehungen der Dosierscheibe angehoben werden. Auch durch eine Reduzierung der Streckenenergie konnten keine zum Schleudergussverfahren vergleichbaren Ergebnisse erzielt werden. Da durch die Reduzierung der Streckenenergie die Schweißnahtunregelmäßigkeiten nicht vermindert werden konnten, wurden Versuche mit einer sehr geringen Laserleistung und Auftragsgeschwindigkeit und einer daraus resultierenden hohen Streckenenergie durchgeführt. Eine Anpassung der Einstellungen am Pulverförderer, der Laserleistung und der

Auftragungsgeschwindigkeit waren notwendig. Tabelle 7 zeigt eine ausgewählte Probe und deren Prozessparameter.

**Tabelle 7: Schweißparameter Probe 77**

	Laserleistung in W	Schweiß- geschwindig- keit in m/min	Versatz in mm	Umdrehungen Dosierscheibe in U/min	Strecken- energie in J/cm
<b>Probe 77</b>	700	0,2	2	0,1	2100

Die Probe 77, bei der die Streckenenergie im Vergleich zu den vorherigen Versuchen deutlich erhöht wurde, zeigt im Schliff eine signifikante Reduzierung der Kupferpenetrationen in den Grundwerkstoff bezüglich Eindringtiefe und Anzahl. Abbildung 21 unterstützt diese Aussage. In der Abbildung sind nur vereinzelt Kupferpenetrationen mit einer, im Vergleich zu den bereits durchgeführten Versuchen, geringeren Eindringtiefe zu erkennen. Dies veranschaulicht zusätzlich Abbildung 22. In der Auswertung der Probe konnte eine maximale Eindringtiefe von etwa 82 µm ermittelt werden, siehe Abbildung 23. Penetrationen dieser Größenordnung stellen jedoch die Ausnahme dar. Die Poren in der Anbindungszone konnten auch mit diesem Parametersatz nicht vermieden werden.



**Abbildung 21: Übersicht Probe 77**



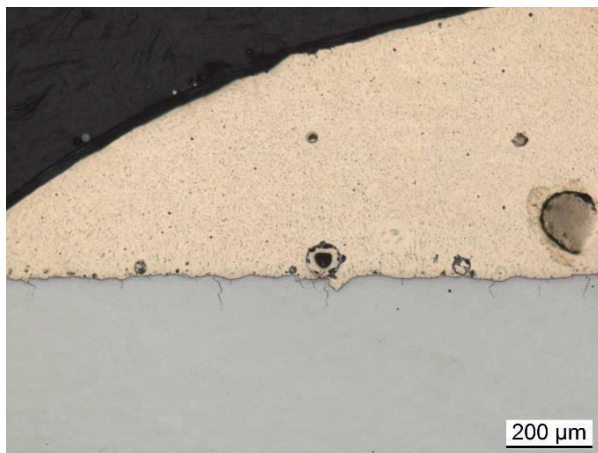


Abbildung 22: Probe 77 100-fache Vergrößerung

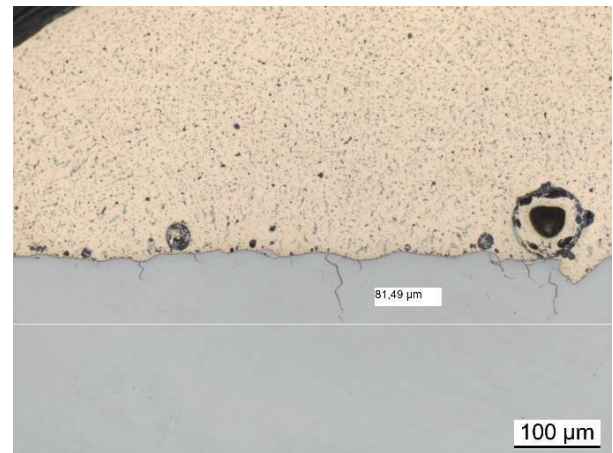


Abbildung 23: Probe 77 200-fache Vergrößerung

Die Prozessparameter der Probe 77 führten zu den bisher besten Schweißergebnissen. Auftretende Schweißnahtunregelmäßigkeiten, vor allem die Kupferpenetrationen konnten erheblich reduziert werden. Diese Parameter kamen im weiteren Verlauf zum Einsatz, um die Grundsicht einer zweilagigen Auftragsschweißung zu erzeugen. Auf die Grundsicht wurde dann eine Deckschicht geschweißt, um die geforderte Schichthöhe zu erreichen. Die Parameter für die Deckschicht wurden ebenfalls in den Versuchen ermittelt. Die Probe 139 zeigt einen solchen Mehrlagenaufbau bestehend aus Puffer- und Deckschicht, siehe Abbildung 24.



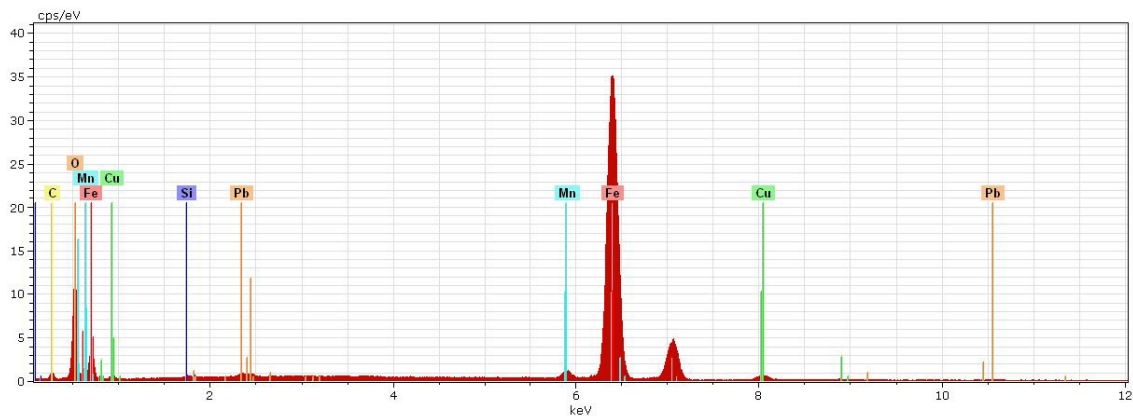
Abbildung 24: Übersicht Probe 139

Geeignete Schweißparameter für die Deckschicht sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Prozessparameter der Deckschicht

	Laserleistung in W	Schweißgeschwindigkeit in m/min	Versatz in mm	Umdrehungen Dosierscheibe in U/min	Streckenenergie in J/cm
<b>Pufferschicht</b>	700	0,2	2	0,1	2100
<b>Deckschicht</b>	1600	0,9	1,7	0,7	1067

In Analogie zu den einlagigen Auftragsschweißungen kam es auch bei den mehrlagigen Schweißungen immer zum Aufschwimmen einzelner Partikel an die Beschichtungsoberfläche. Mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenspektroskopie im Rasterelektronenmikroskop wurden diese immer wieder auftretenden Partikel auf ihre einzelnen Bestandteile hin untersucht. Die anfängliche These, dass es sich hierbei um Bleipartikel handelt, wurde durch diese Untersuchung nicht bestätigt. Die Analyse zeigte, dass ein hoher Anteil an Eisen in den einzelnen Partikeln vorhanden ist, siehe Abbildung 25. Da Eisen kein Bestandteil des pulverigen Zusatzwerkstoffes ist, kann das Element nur aus dem Grundwerkstoff gelöst worden und in Verbindung mit anderen Elementen an die Oberfläche diffundiert sein. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass es zu einer starken Aufmischung zwischen Grund- und Zusatzwerkstoff gekommen ist.



**Abbildung 25: Spektroskopie Partikel**

Um diese Aufmischung zu reduzieren, hat man sich für das Aufbringen einer Pufferschicht auf Basis einer bleifreien Bronzelegierung auf den Grundwerkstoff entschieden, da diese ähnliche Werkstoffeigenschaften aufweist wie die Bleibronzelegierung. Diese Pufferschicht verhindert zum einen, dass Eisen nicht so stark an die Oberfläche diffundieren kann und zum anderen konnten die immer wieder entstehenden Kupferpenetrationen in den Grundwerkstoff vermieden werden. Weiterhin kann durch die Verwendung einer Pufferschicht der Anteil an Bleibronze in einem Gleitlager reduziert werden, da nur der oberste Teil, auf dem die spätere Gleitbewegung stattfindet, mit einer Bleibronze beschichtet ist. Jedoch konnten die auftretenden Poren in der Bleibronzeschicht nicht weiter minimiert werden, siehe Abbildung 26.



**Abbildung 26: Probe 85 Beschichtung aus Pufferschicht und Deckschicht**

Diese Poren gilt es in weiteren Parameterstudien zu reduzieren.

## 2.4 Laserpulverauftragsschweißen von neuen Lagerlegierungen

Für die Beschichtungsversuche mit einer neuen Lagerlegierung wurde ein metallurgisches Pulver auf Zinnbasis, welches mit Kupfer und Antimon legiert ist, verwendet. Die Bezeichnung des Herstellers für diese Lagerlegierung lautet Laser-Coating-Metal 3, kurz Lacomel, von der Firma ECKA Granulate. Die chemische Analyse des pulverförmigen Zusatzwerkstoffes ist in Tabelle 9 aufgeführt.

**Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung von Lacomel 3**

Sb in Ma%	Cu in Ma%	Zn in Ma%	Ag in Ma%	Pb in Ma%	As in Ma%	Sn in Ma%
12,4	6,8	0,88	0,2	0,03	0,01	~ 80

Als Stützkörpermaterial wird ähnlich zu den Schweißversuchen mit der Bleibronzelegierung ein Baustahl der Güte S355J2 verwendet.

### 2.4.1 Auswertung der Schweißversuche mit neuen Lagerlegierungen

In diesen Versuchen sollten vorwiegend verschiedene Parameter für die Pufferlage geprüft werden, da insbesondere die Anbindung des Lagermetalls an den Stützkörper von essentieller Bedeutung für die Auftragsschweißungen ist. Weiter sollte der Zusammenhang der unterschiedlichen Prozessparameter ermittelt werden. Zielstellung der Versuche war es Schweißparameter für die Pufferlage zu finden, die nach der Durchführung der Biegeprüfung nicht zum Abplatzen der Schicht, sondern zu keinen oder nur kleinen Rissen in der Beschichtung führen. Auch eine Beurteilung der Anbindungszone hinsichtlich der intermetallischen Phasen sollte mit Hilfe von Mikroschliffen erfolgen. Auf Grundlage der ermittelten Prozessparameter für die Pufferlage wurde anschließend eine zweilagige Schicht geschweißt, um die angestrebte Schichthöhe zu generieren. Auch für das Auftragen der

sogenannten Decklage wurden unterschiedliche Parameter getestet und ausgewertet. Aufgrund des Abplatzens der Beschichtung von Probe 1 bis 6 wurde vermutet, dass die eingebrachte Streckenenergie von 810 J/cm für das Herstellen einer Anbindung bei dieser Legierung nicht ausreicht. In den folgenden Versuchen erfolgte dementsprechend eine Erhöhung der Streckenenergie durch Steigerung der Laserleistung. Alle anderen Schweißparameter blieben vorerst konstant.

Die Schweißversuche 7 bis 14, bei denen die Laserleistung stufenweise erhöht wurde, zeigen, dass mit zunehmender Laserleistung und Streckenenergie ein Abplatzen der Pufferlage während des Biegeversuchs verhindert werden konnte, siehe Abbildung 27. Die Auftragschweißungen 7 bis 11 weisen große Risse in der Beschichtung bzw. ein Abplatzen dieser auf. Die Anbindung des Lagermetalls an den Stützwerkstoff ist zu gering und erfüllt nicht die geforderten Qualitätskriterien. Bei den Proben 12 bis 14 konnten hingegen nur kleinere Risse in der Beschichtung detektiert werden. Vor allem die Auftragschweißungen mit einer Laserleistung von 3800 W und 4000 W zeigen eine deutlich verbesserte Anbindung an den Stützkörper und infolgedessen treten nur sehr kleine Risse in der Beschichtung nach der Biegeprüfung auf. Die Prozessparameter dieser Schweißversuche sind in Tabelle 10 aufgeführt.

**Tabelle 10: Prozessparameter Proben 12 bis 14**

	<b>Laserleistung in W</b>	<b>Auftrags- geschwindigkeit in m/min</b>	<b>Pulverförder- rate in g/min</b>	<b>Spur- versatz in cm</b>	<b>Strecken- energie In J/cm</b>
<b>Probe 12</b>	3600	200	25,2	3,5	1080,00
<b>Probe 13</b>	3800	200	25,2	3,5	1140,00
<b>Probe 14</b>	4000	200	25,2	3,5	1200,00



**Abbildung 27: Schweißversuche 7 bis 14**

Da die Ergebnisse der Biegeprüfung von Probe 14 die Kriterien erfüllt haben, sollte anschließend ein zweilagiger Schichtaufbau mit den Prozessparametern dieser Versuchsschweißung erfolgen. Das Auftragen der Deckschicht erfolgte bei diesen Schweißungen mit den Parametern von Lacomet 3. Weiterhin wurde die Laserleistung für das Auftragen der Pufferlage nochmals bis auf 4600 W erhöht, um die Risse in der Beschichtung ganz zu vermeiden. Die Prozessparameter der durchgeführten Versuche sind in Tabelle 11 aufgeführt. Die Sichtprüfung der Pufferlagen (Proben 15, 17, 19 und 21) ergab keine Oberflächenunregelmäßigkeiten in der Auftragsschicht. Bei den zweilagig aufgebauten Beschichtungen (Proben 16, 18, 20 und 22) konnte bereits während des Prozesses und auch bei der Sichtprüfung ein teilweise unregelmäßiger Auftrag des Pulvers festgestellt werden. Die anschließend durchgeführte Biegeprüfung führte zu einem Abplatzen bzw. starken Einreißen der zweilagigen Beschichtung. Bei den Pufferlagen konnten die Risse infolge der Erhöhung der Laserleistung und einer Steigerung der Streckenergie auf 1380 J/cm vermieden werden. Die Ergebnisse der Biegeprüfung zeigt Abbildung 28. Für die weitere Beurteilung der Beschichtung und der Qualität der Anbindungszone wurden den Schweißversuchen Mikroschliffe entnommen.

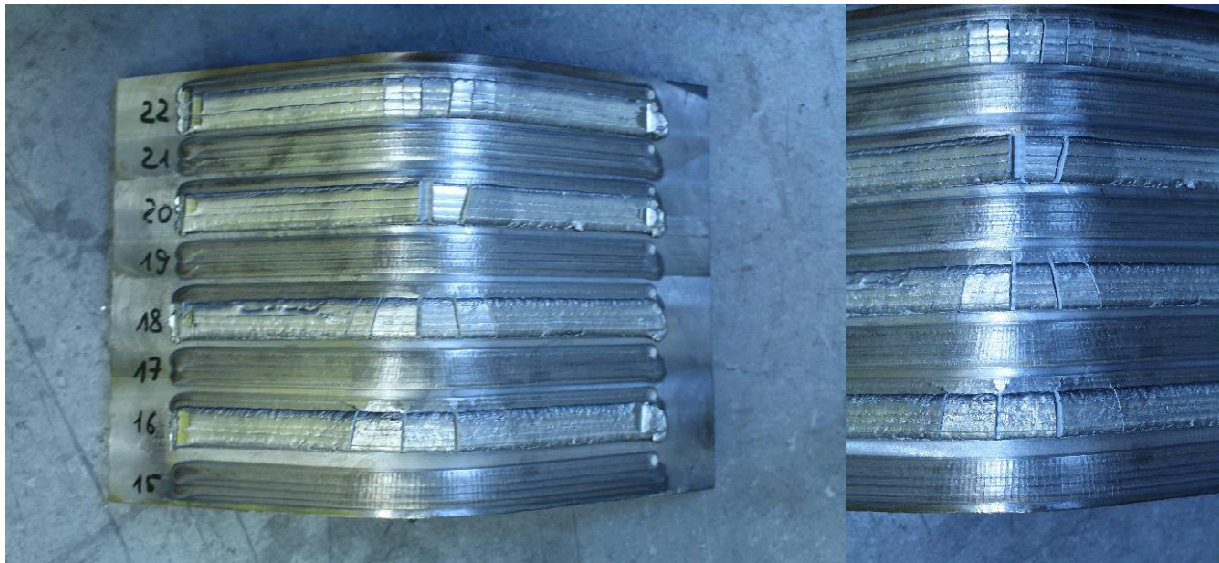


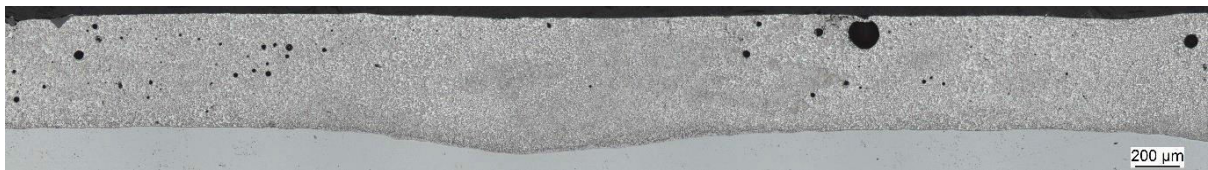
Abbildung 28: Proben 15 bis 22 (Pufferschichten und zweilagige Beschichtungen)

Tabelle 11: Prozessparameter der Proben 15 bis 18, 21 und 22

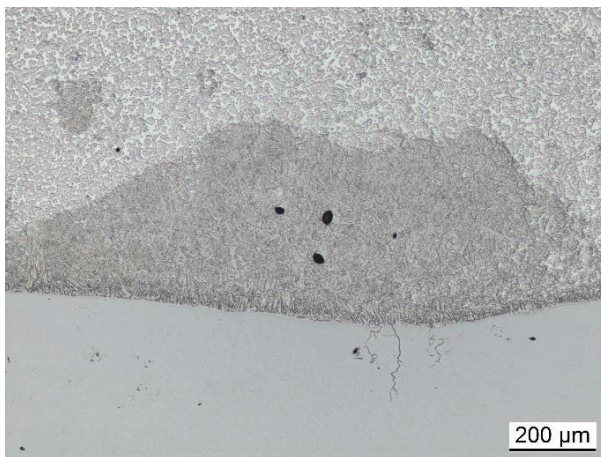
Probennummer		Laserleistung in W	Auftragungsgeschwindigkeit in m/min	Pulverförder rate in g/min	Spurversatz in cm	Streckenenergie In J/cm
Probe 15	PL	4000	2,0	25,2	3,5	1200,00
Probe 16	PL	4000	2,0	25,2	3,5	1200,00
	DL	2200	1,5	100,1	3,5	880,00
Probe 17	PL	4200	2,0	25,2	3,5	1260,00
Probe 18	PL	4200	2,0	25,2	3,5	1260,00
	DL	2200	1,5	100,1	3,5	880,00
Probe 21	PL	4600	2,0	25,2	3,5	1380,00
Probe 22	PL	4600	2,0	25,2	3,5	1380,00
	DL	2200	1,5	100,1	3,5	880,00

In der Analyse der Mikroschliffe konnten Schweißnahtunregelmäßigkeiten unterschiedlicher Art detektiert werden. Alle in Abbildung 28 dargestellten Schweißversuche weisen in der Beschichtung Poren auf. Diese treten jedoch nicht primär in der Anbindungszone auf und sind daher zunächst als nicht kritisch zu bewerten. Probe 18 zeigt vereinzelt unzulässige Kupferpenetrationen von rund 200  $\mu\text{m}$  in den Grundwerkstoff, siehe Abbildung 30. In den Beschichtungen 18 und 22 sind weiterhin größere Ansammlungen von Poren und Lunkern zu erkennen (Abbildung 29 und Abbildung 31). Eine weitere Unzulässigkeit in den

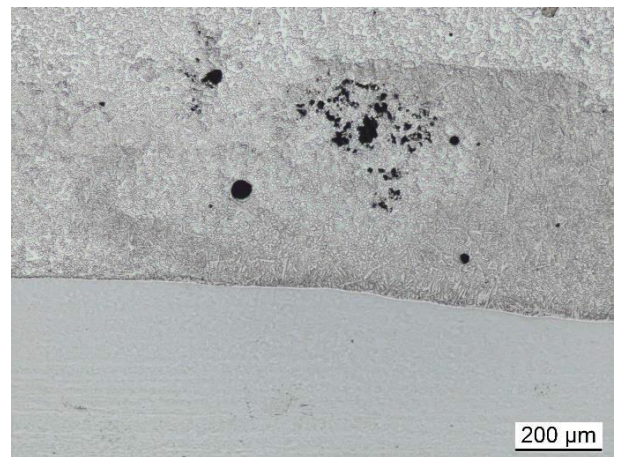
Auftragsschweißungen ist in den hoch wachsenden Eisen-Zinn-Kristallen ( $\text{FeSn}_2$ -Kristalle) zu sehen, siehe Abbildung 29. Diese treten großflächig in allen Beschichtungen auf und entsprechen auf Grund ihrer Größe von bis zu  $50\ \mu\text{m}$  nicht den geforderten Qualitätsansprüchen. Die bisher durchgeführten Schweißversuche der Pufferlage lieferten bei den Biegeversuchen teilweise gute bis sehr gute Ergebnisse, konnten jedoch bei der weiteren Beurteilung unter dem Mikroskop nicht den Anforderungen Genüge leisten. Im Folgenden sollten daher weitere Parameter für die Pufferlage erprobt werden.



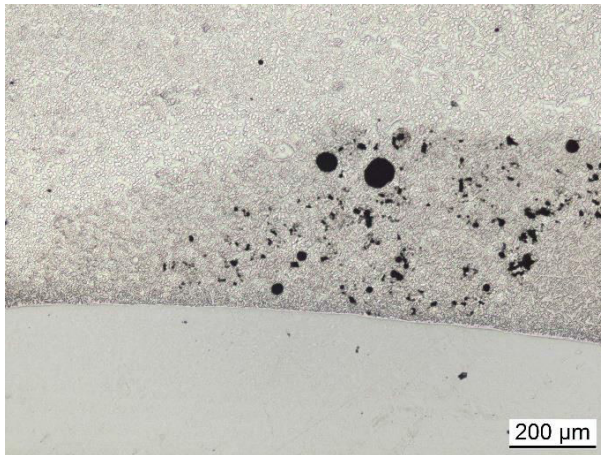
**Abbildung 29: Probe 18 100-fache Vergrößerung**



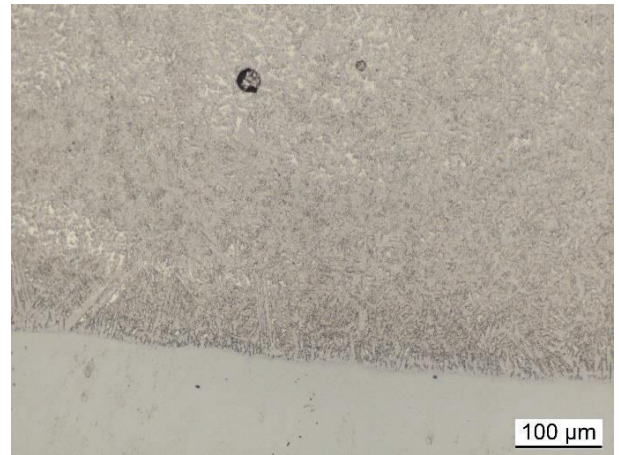
**Abbildung 30: Kupferpenetration Probe 18  
100-fache Vergrößerung**



**Abbildung 31: Porosität Probe 18 100-fache  
Vergrößerung**



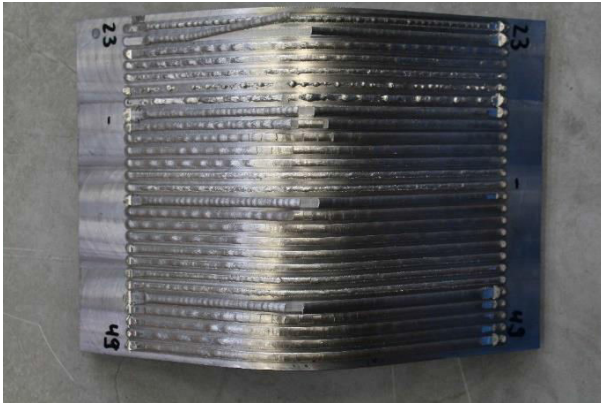
**Abbildung 32: Porosität in Probe 22 100-fache Vergrößerung**



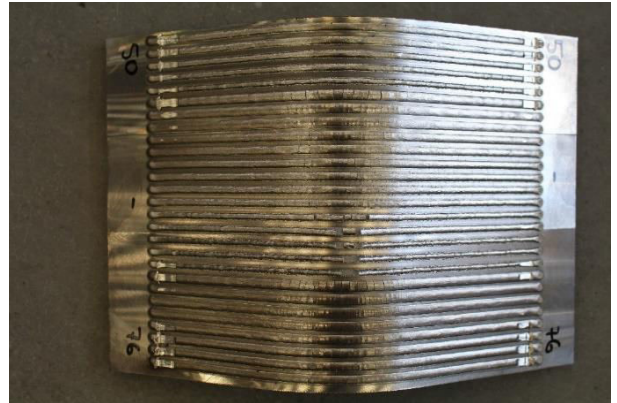
**Abbildung 33: FeSn<sub>2</sub>-Kristalle in Probe 21 200-fache Vergrößerung**

In den weiteren Versuchen wurden zunächst nur Einzelspuren mit verschiedensten Prozessparametern durchgeführt, um möglichst viele Variationen der Parameter zu testen. Es erfolgte eine Variation der Laserleistung bei unterschiedlichen Auftragsgeschwindigkeiten und Pulverförderraten. Die einzelnen Parameter der Proben 23 bis 76 werden hier auf Grund der hohen Anzahl nicht explizit aufgeführt. Anhand der Sichtprüfung und der anschließenden Biegeprüfung konnten innerhalb kurzer Zeit erste Aussagen über die Güte der Pufferlage getätigt werden. Die Ergebnisse dieser Schweißversuche waren von sehr unterschiedlicher Qualität und werden in Abbildung 34 und Abbildung 35 gezeigt. Die qualitativ besten Auftragsschweißungen konnten mit den Parametern der Proben 50 bis 53 erzielt werden. Der Schichtauftrag erfolgte hier gleichmäßig und nach dem Biegeversuch waren keine Risse in der Beschichtung erkennbar.



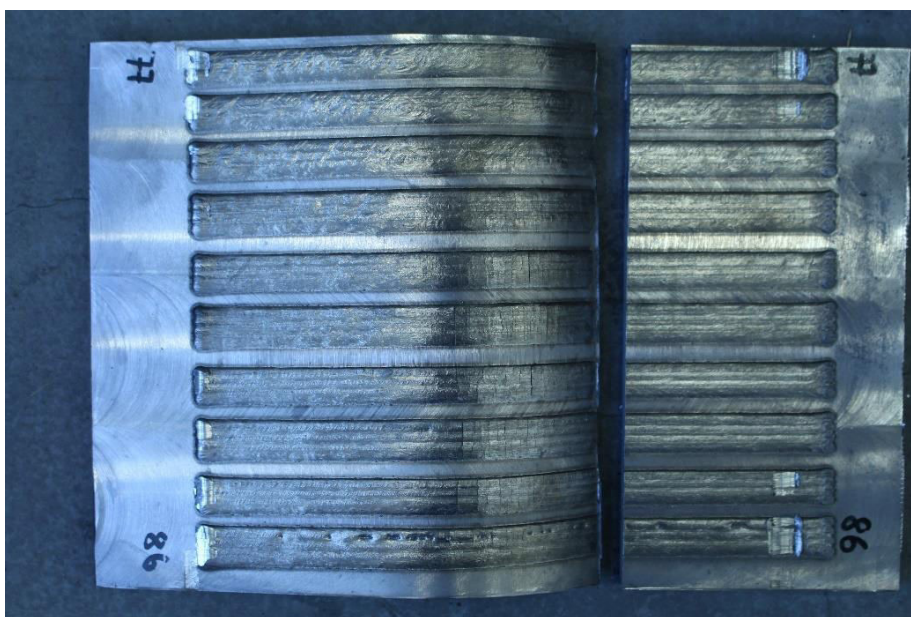


**Abbildung 34: Proben 23 bis 49 (Einzelspuren für Parameterfindung Pufferlage)**



**Abbildung 35: Proben 50 bis 76 (Einzelspuren für Parameterfindung Pufferlage)**

Im Anschluss an den Auftrag der Einzelspuren wurden mit den Prozessparametern der Proben 50 bis 53 mehrere Spuren überlappend nebeneinander beschichtet. Um einen optimalen Schichtaufbau zu erproben, wurde der Versatz zwischen den einzelnen Spuren variiert. Abbildung 30 zeigt die Versuche 77 bis 86. Deutlich zu erkennen ist, dass der zu große Spurversatz (3,5 mm) in Kombination mit der zu hohen Schweißgeschwindigkeit von 1,4 m/min in Probe 86 zu einem unregelmäßigen Schichtaufbau führte. Weiter kam es bei den Schweißversuchen 81 bis 85 nach der Biegeprüfung zu Rissen in der Beschichtung. Die Versuche 77 bis 80 weisen hingegen keine Schweißnahtunregelmäßigkeiten, sondern eine gute Bindefestigkeit auf. Die Prozessparameter dieser Versuche sind in Tabelle 12 aufgeführt.

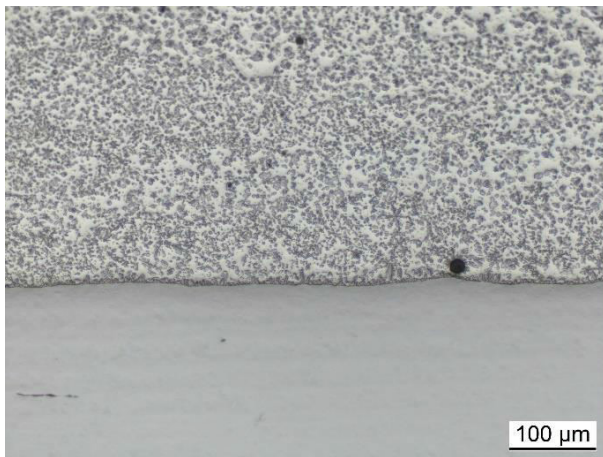


**Abbildung 36: Proben 77 bis 86 (Ermittlung des Versatzes zwischen den Spuren)**

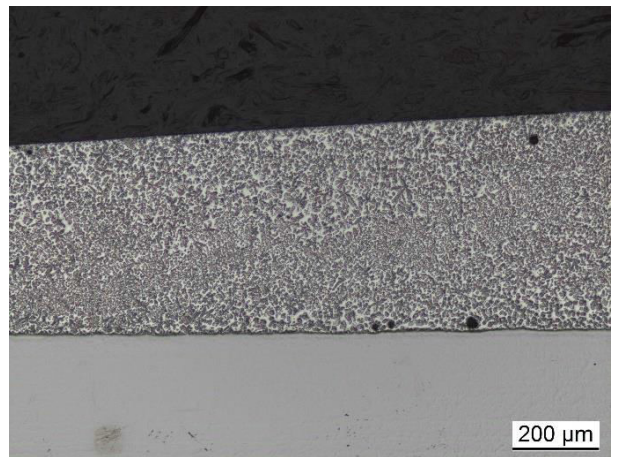
**Tabelle 12: Prozessparameter Proben 77 bis 80**

Probennummer		Laserleistung in W	Auftragungsgeschwindigkeit in m/min	Pulverförderrate in g/min	Spurversatz in cm	Streckenenergie In J/cm
<b>Probe 77</b>	PL	1600	1,0	12,2	2,5	960,0
<b>Probe 78</b>	PL	1600	1,0	12,2	2,7	960,0
<b>Probe 79</b>	PL	1600	1,0	12,2	3,0	960,0
<b>Probe 80</b>	PL	1600	1,0	12,2	3,5	960,0

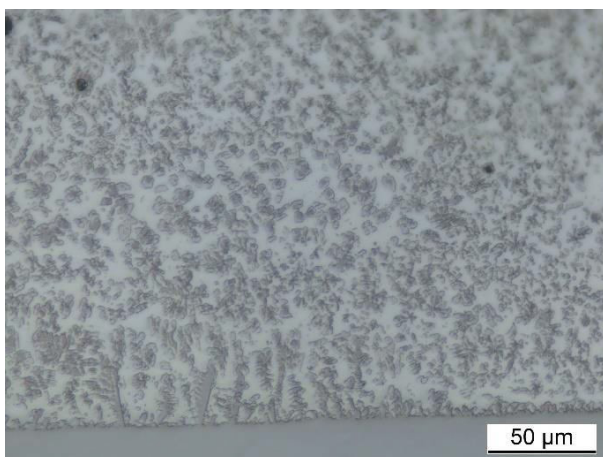
Die weitere Beurteilung der Proben erfolgte durch die Analyse der angefertigten Mikroschliffe unter dem Mikroskop. Hier konnte eine Verbesserung bezüglich der Proben 17, 19 und 21 festgestellt werden. Die Anzahl der Poren in den Beschichtungen konnten vermindert werden. Jedoch treten diese vereinzelt in der Bindezone auf, wie in den Proben 77 und 78 zu erkennen ist (Abbildung 37 und Abbildung 38). Ebenfalls ließ sich eine Reduzierung der Anzahl hoch gewachsener  $\text{FeSn}_2$ -Kristalle beobachten. Diese sind nicht mehr großflächig in der gesamten Anbindungszone verteilt, sondern beschränken sich auf einzelne größere Kristalle, siehe Abbildung 39 und Abbildung 40. Der Großteil der intermetallischen Phase  $\text{FeSn}_2$  liegt jedoch im Bereich der vorgeschriebenen Größenordnung von  $10\ \mu\text{m}$ . In Bezug auf die Variation des Spurversatzes zwischen 2,5 und 3,5 mm erwies sich ein Versatz von 3 mm als die bestmögliche Variante. Mit diesem konnte eine nahezu konstant gleich hohe Schicht generiert werden. Alle weiteren Versuche wurden demzufolge mit einem Spurversatz von 3 mm durchgeführt. Die anschließenden zweilagig aufgebauten Versuche wurden mit den Prozessparametern der Probe 79 beschichtet. Hier sollte ein möglicher Einfluss der Decklage auf die Güte der Pufferlage untersucht werden. Weiter erfolgte eine Variation der Prozessparameter, wie Laserleistung, Auftragungsgeschwindigkeit und Pulverförderrate sowie der Decklage, um den Schichtauftrag zu optimieren.



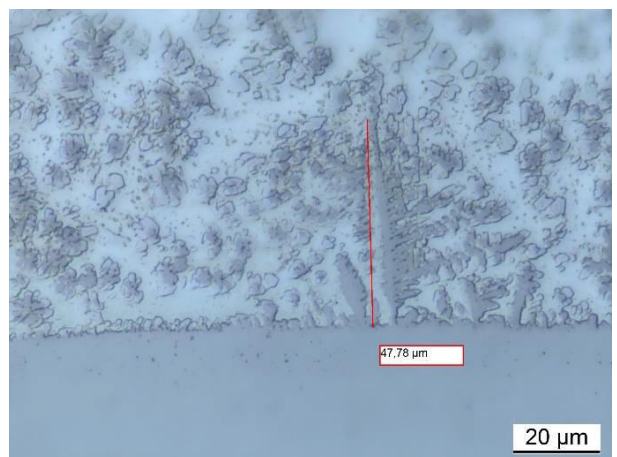
**Abbildung 37: Pore in der Anbindungszone Probe 77 100-fache Vergrößerung**



**Abbildung 38: Poren in Anbindungszone Probe 78 50-fache Vergrößerung**



**Abbildung 39: FeSn<sub>2</sub>-Kristalle in Probe 77 500-fache Vergrößerung**



**Abbildung 40: FeSn<sub>2</sub>-Kristalle in Probe 80 1000-fache Vergrößerung**

In Abbildung 41 sind die Schweißversuche 87 bis 93 dargestellt. Die Pufferlagen wurden mit den Parametern der Probe 79 geschweißt, bei den Decklagen erfolgte eine Parametervariation. Tabelle 13 zeigt beispielhaft die Parameter der Proben 88, 92 und 93. Bei der Sichtprüfung der Schweißungen konnten keine Oberflächenunregelmäßigkeiten in der Beschichtung erkannt werden. Die anschließende Biegeprüfung führte jedoch zum Reißen und sofortigen Abplatzen der Beschichtung. Auf Grund des Abplatzens der Schicht wurde angenommen, dass die Bindefestigkeit der Pufferlage an den Stützkörperwerkstoff ungenügend ist. Es erfolgten dementsprechend weitere Versuche um die optimalen Prozessparameter der Pufferschicht zu finden.



Abbildung 41: Proben 87 bis 93 - zweilagiger Schichtaufbau mit Parametern der Pufferlage von Probe 79

Tabelle 13: Prozessparameter Proben 88, 92 und 93

Probennummer		Laserleistung in W	Auftragsgeschwindigkeit in m/min	Pulverförder-rate in g/min	Spurversatz in cm	Streckenenergie in J/cm
Probe 88	PL	1600	1,0	12,2	3,0	960,0
	DL	2200	1,5	83,9	3,0	880,0
Probe 92	PL	1600	1,0	12,2	3,0	960,0
	DL	2500	2,0	100,1	3,0	750,0
Probe 93	PL	1600	1,0	12,2	3,0	960,0
	DL	2200	1,5	61,1	3,0	880,0

In den Schweißversuchen 101 bis 111 und 120 bis 130, die in den Abbildung 42 und Abbildung 43 dargestellt werden, erfolgte eine erneute Variation der Laserleistung, Auftragsgeschwindigkeit und Pulverförder-rate. Die Laserleistung wurde stufenweise von 1600 W bis auf einschließlich 3000 W erhöht. Für die einzelnen Laserleistungen erfolgte ein Schichtauftrag mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Pulverförder-raten. Die besten Ergebnisse nach der Biegeprüfung zeigten die Schweißversuche 123 bis 126, 129 und 130. Eine vollständig rissfreie Beschichtung konnte auch bei den genannten Proben nicht realisiert werden, diese beschränken sich jedoch auf ein Minimum.



Abbildung 42: Proben 101 bis 111

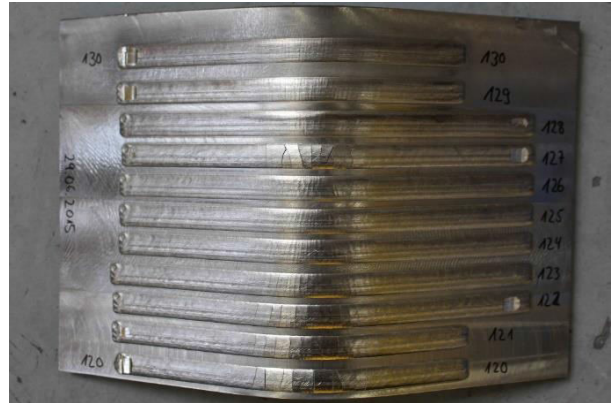


Abbildung 43: Proben 120 bis 130

Die Analyse der Mikroschliffe der genannten Proben ergab, dass die Probe 125 in der Anbindungszone die geringste Anzahl hoch gewachsener  $\text{FeSn}_2$ -Kristalle aufweist. Der Großteil der Eisen-Zinn-Kristalle ist unterhalb der vorgeschriebenen  $10\ \mu\text{m}$ , siehe Abbildung 44. Jedoch sind auch kleinere Bereiche in der Anbindungszone vorhanden, in denen die intermetallische Phase  $\text{FeSn}_2$  den vorgeschriebenen Wert überschreitet. Der Abstand dieser Bereiche ist regelmäßig und entspricht in etwa dem Spurversatz. Die größten detektierten  $\text{FeSn}_2$ -Kristalle besitzen eine Größe von rund  $30\ \mu\text{m}$  und sind in Abbildung 45 dargestellt. Schweißnahtunregelmäßigkeiten in der Bindezone, wie z. B. Poren, konnten in Probe 125 nicht gefunden werden. Auch die Ergebnisse des zweilagigen Beschichtungsaufbaus konnten im Vergleich zu den vorherigen Proben verbessert werden. Dies zeigen die Proben 134 und 137 in Abbildung 46. Die Biegeprüfung dieser Schweißversuche ergab ein mehrfaches Einreißen der Beschichtung, jedoch führte diese nicht zum Abplatzen der Beschichtung und stellt somit eine nach Qualitätsanforderungen gültige Auftragsschweißung dar. Bei der Analyse des Mikroschliffs von Probe 134 zeigte sich ein unzureichendes Aufschmelzen der Pufferlage beim Auftragen der Decklage. Durch eine Erhöhung der Laserleistung für das Beschichten der Decklage um  $300\ \text{W}$  konnte dies verhindert werden. Mit den Prozessparametern der Probe 125 und 140, siehe Tabelle 14; konnten die bislang besten Schweißergebnisse für die Pufferlagen und den zweilagigen Schichtaufbau erzielt werden. Diese ermittelten Parameter bilden die Grundlage für alle weiteren Beschichtungsversuche mit den Weißmetalllegierungen.

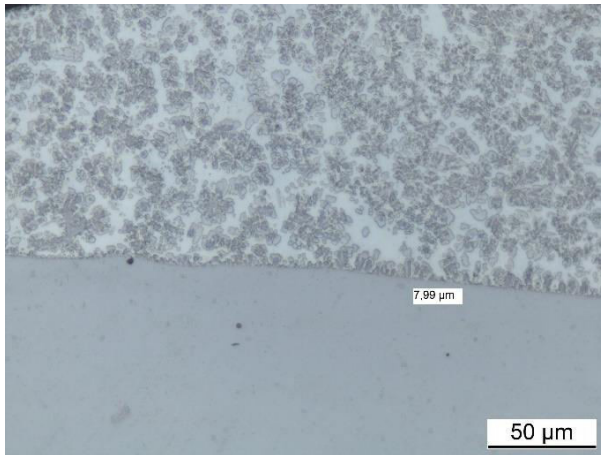


Abbildung 44: FeSn<sub>2</sub>-Kristalle in Probe 125 500-fache Vergrößerung

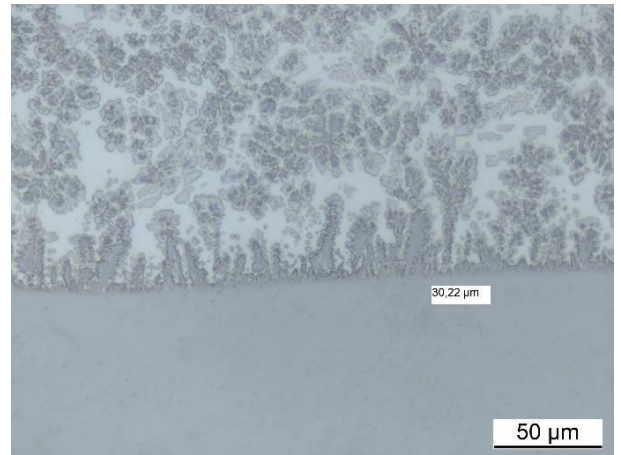


Abbildung 45: hoch gewachsene FeSn<sub>2</sub>-Kristalle Probe 125 500-fache Vergrößerung

Tabelle 14: Prozessparameter Proben 125, 134 und 140

Probennummer		Laserleistung in W	Auftragsgeschwindigkeit in m/min	Pulverförderrate in g/min	Spurversatz in cm	Streckenenergie in J/cm
Probe 125	PL	3000	1,0	15,5	3,0	1800,0
Probe 134	PL	3000	1,0	15,5	3,0	1800,0
	DL	1800	1,0	38,3	3,0	1080,0
Probe 140	PL	3000	1,0	15,5	3,0	1800,0
	DL	2100	1,0	38,3	3,0	1260,0



Abbildung 46: Übersicht Probe 134



Abbildung 47: Übersicht Probe 140

## 2.5 Gegenüberstellung konventionelles Lager gegen lasergeschweißtes Lager

Um eine quantitative Aussage hinsichtlich ökologischer Aspekte treffen zu können, wurde eine exemplarische Angebotskalkulation für einen großen Getriebebolzen mit einer Fertigschichtstärke von 3 mm Bleibronze durchgeführt. Dabei wird das Standgussverfahren mit der geschweißten Variante einer bleifreien Pufferschicht verglichen. Die den zugrunde gelegten Prozessparameter entstammenden entsprechenden Musterteile. Anhand der durchgeführten Kalkulationen erhält man die in Tabelle 15 dargestellten Mengen an verarbeiteter Bleibronze.

**Tabelle 15: absoluter Verbrauch Bleibronze**

	Eingesetzte Bleibronze	reiner Bleianteil
Standguss	74,5 kg	14,2 kg
Laserauftragsschweißen	21,4 kg	2,0 kg
Einsparung	53,1 kg	12,2 kg (= 86,2 %)

Dieser Gegenüberstellung ist zu entnehmen, dass durch den Einsatz des Laserauftragsschweißens, in Kombination mit einer bleifreien Pufferschicht, die im Herstellungsprozess benötigte Menge an Blei um 86 % reduziert wurde (gegenüber dem Standgussverfahren). Den Grund für die Reduzierung stellt das minimale Aufmaß von rund 1 mm über der Fertigschichtstärke beim Laserbeschichten dar. Demgegenüber muss beim Gussverfahren technologiebedingt ein Vielfaches der späteren Fertigschichtstärke aufgetragen werden. Neben der Reduzierung der Bleimenge wird zusätzlich der Energieverbrauch der jeweiligen Beschichtungsverfahren betrachtet. Dabei wurden neben den jeweiligen Haupt- und Nebenverbräuchen auch die jeweiligen Betriebszeiten erfasst. Aus Tabelle 16 wird ersichtlich, dass bei der Herstellung eines laserauftragsgeschweißten Teils in Summe um 55 % weniger Strom verbraucht wird.

**Tabelle 16: Energieverbrauch**

	Energieverbrauch in kWh
Standguss	250
Laserauftragsschweißen	112
Einsparung	138 (55,2 %)

Dies lässt sich wiederum auf den hohen Energieverbrauch beim Guss durch die Induktionsanlage und dem dazugehörigen Kühlsystem zurückführen. Die Kalkulationsgrundlage der Laserbeschichtung basiert auf den Prozessdaten der gefertigten Realbauteile. Diese weisen eine sehr lange Beschichtungszeit und damit einen unwirtschaftlichen Prozess auf. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die mit der Steigerung der Auftragsrate verbundene Verkürzung der Bearbeitungsdauer weiteres Potential für Energieeinsparung besitzt. Parallel zur Bleibronzebeschichtung soll die Entwicklung alternativer, bleifreier Gleitwerkstoffe weitergeführt werden. Die erfolgreiche Verarbeitung von Zinnbronzen und Aluminium-Zinn Legierungen würden eine partielle Substitution der Bleibronzen ermöglichen.



## 2.6 Fazit

Unser Projektziel: „Die Entwicklung eines wirtschaftlichen, laserbasierten Beschichtungsprozesses zum Aufbringen von Gleitschichten für Hochleistungslager auf der Basis von Kupfer- und Weißmetalllegierungen“ kann nach Abschluss aller Untersuchungen als erfüllt bezeichnet werden. Sowohl für die Kupferlegierungen als auch die Weißmetalllegierungen stehen Parametersätze zur Verfügung, welche ein Beschichten mittels Laserpulverauftragsschweißen von unterschiedlichen Stützkörpern zulassen.

Das Ziel, einen alternativen Werkstoff zu finden, welcher die Bleibronze substituiert, konnte im Rahmen dieses Projekts nicht umgesetzt werden. Jedoch wurde ein Ansatz gefunden, wie der Bleigehalt in Bleibronzelagern deutlich reduziert werden kann, ohne dabei die wesentlichen Eigenschaften der Bleibronzelegierung zu ändern. Durch das Aufbringen einer Bronzelegierung in Form einer Pufferschicht kommt es zur Einsparung von Bleibronze, da nur das oberste Drittel des späteren Lagers mit einer bleihaltigen Bronze beschichtet wird. Ist eine 3 mm dicke Schichthöhe vom Kunden gefordert, können ca. 2 mm mit der umweltfreundlichen Bronzelegierung beschichtet werden, bevor man eine 1 mm dicke Schicht aus Bleibronze über die bestehende Pufferschicht aufträgt. Ein weiterer Vorteil dieses Lösungsansatzes ist, dass auftretende Kupferpenetrationen in den Grundwerkstoff vermieden werden. Hierdurch kommt es zu einer höheren Standzeit der Lager. Jedoch sind bei allen bisherigen Beschichtungsversuchen vermehrt Poren in der generierten Schicht aufgetreten. Diese gilt es in einem Folgeprojekt weiter zu reduzieren.

Bei den alternativen Lagerwerkstoffen auf Basis einer Weißmetalllegierung konnten ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden. So lassen sich durch die Verwendung eines mehrlagigen Schichtaufbaus unterschiedlich hohe Gleitschichten realisieren. Durch die Adaption des Laserprozesses auf die Herstellung von Gleitlagern können nachweislich mehrere Kilogramm an Grundwerkstoff und Lagerlegierung pro hergestelltem Lager eingespart werden. Im Vergleich zum Gussprozess kann, durch die Verwendung des Laserprozesses, auch Energie in Form von Strom eingespart werden. Hier traten ebenso vereinzelt Poren in der Beschichtung auf, welche es durch weitere Prozessoptimierung zu reduzieren gilt.

In weiteren Projektphasen sollen die schon angesprochenen Unregelmäßigkeiten in der Lagerschicht reduziert werden. Auch andere aktuell verwendete Lagerlegierungen sollen auf ihre Einsatzfähigkeit für das Laserpulverauftragsschweißen hin geprüft werden, da sich hier ein ähnliches Einsparpotenzial abzeichnet wie bei den Bleibronze- und auch den Weißme-

talllegierungen. Weiterhin ist auch die Kombination unterschiedlicher Lagerwerkstoffe in einem Lager beabsichtigt. So können sich Synergieeffekte zwischen den unterschiedlichen Lagermaterialien ergeben.

## Literaturverzeichnis

- [1] H. J. Fahrenwaldt, V. Schuler und J. Twrdek, *Paxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Prozesse, Fertigung* (5. Auflage), Springer-Verlag, 2014.
- [2] B. Graf, A. Gumenyuk und M. Rethmeier, „Verschleißschutz im Werkzeugbau mittels Laser-Pulver-Auftragsschweißen,“ *WOMag - Kompetenz in Werkstoff und funktionaler Oberfläche*, pp. 24-25, 02 2014.
- [3] B. Graf, *Laser-Pulver-Auftragsschweißen*, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik.
- [4] „DVS Merkblatt 3215 - Laserstrahl-Auftragsschweißen,“ Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren, 2011.
- [5] SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH, [Online]. Available: <http://www.lttz.de/forschung-entwicklung/lasermakrobearbeitung/laser-auftragsschweißen/>. [Zugriff am 09 Februar 2015].