

**Laser Assistierte Beschichtungstechnologie für nachhaltige
Gleitlager als effizienter Ersatz des Schleudergussverfahrens
zur Reduktion des Schwermetallgehalts in Lagerbronzen II**

Kurzform:

LAGER II

Abschlussbericht

18. Januar 2019

Firma:	ADMOS Gleitlager GmbH
Ansprechpartner:	Herr Marco Paschke
Straße:	Wilhelminenhofstraße 89 a
Ort:	12459 Berlin

06/02		Projektkennblatt		
		der		
Deutschen Bundesstiftung Umwelt				
Az	32851/02	Referat	Fördersumme	80.401,00
Antragstitel	Laser Assistierte Beschichtungstechnologie für nachhaltige Gleitlager als effizienter Ersatz des Schleudergussverfahrens zur Reduktion des Schwermetallgehalts in Lagerbronzen II			
Stichworte	Beschichtung, Laser			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
1 Jahr	23.10.2017	22.10.2018	2	
Zwischenberichte	-			
Bewilligungsempfänger	ADMOS Gleitlager GmbH		Tel	030 /530 09 0
	Wilhelminenhofstraße 89a		Fax	030 / 530 09 166
	12459 Berlin		Projektleitung	
			Jörg Hosemann	
			Bearbeiter	
			Marco Paschke u.a.	
Kooperationspartner	-			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens				
<p>Ziel des Projekts ist die anwendungsspezifische Weiterentwicklung des Laser-Pulverauftragschweißens als Beschichtungstechnologie für Verbundgleitlager. Die Zielsetzung gliedert sich in zwei Teile. Zum einen soll die Variante einer „bleifreien Pufferschicht in Kombination mit einer Funktionsschicht aus Bleibronze“, wie sie im vorausgegangenem Projekt entwickelt wurde, verbessert werden. Dies bedeutet die Behebung auftretender Schweißnahtunregelmäßigkeiten, die Erhöhung der Prozesssicherheit und eine Steigerung der Auftragsrate zum Zweck der Energieeinsparung. Wohingegen der zweite Projektteil die zielgerichtete Entwicklung bzw. Weiterentwicklung bleifreier Lagerwerkstoffe zur Substitution hochbleihaltiger Lagerwerkstoffe zum Ziel hat.</p> <p>Ausgangspunkt sind die überzeugenden Ergebnisse des vorangegangenen Projekts, im Laufe dessen das Laserauftragschweißen als Alternative zu den herkömmlichen Stand- und Schleudergussverfahren als innovative Beschichtungsmethode im Herstellungsprozess von Verbundgleitlagern eingeführt werden konnte. Insbesondere der im Verhältnis sehr geringe Energie- und Ressourcenverbrauch sowie weitere nachweisliche Produktionsvorteile gaben den Anlass, die Einführung des Laserauftragschweißens in die gesamte Verbundgleitlagerproduktion weiter voranzutreiben. Schließlich liegt hierin ein enormes Potenzial, die weitestgehend ausgeschöpften Optimierungsmöglichkeiten aktueller Produktionsmethoden neu zu beleben und die Abhängigkeit von verfahrensspezifisch zum Einsatz kommenden umweltschädlichen Werkstoffen zu minimieren bzw. gänzlich zu umgehen. In diesem Projekt soll nun auf spezifische und in erheblichem Maß relevante Aspekte der Verbundgleitlagerherstellung eingegangen werden.</p>				
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de				

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Für den ersten Projektteil werden zunächst die entsprechenden Standardsätze zur Klärung der jeweiligen Fehlerart und deren möglicher Ursachen inklusive praktischer Maßnahmen zur Behebung herangezogen. Unter Berücksichtigung genereller Machbarkeitskriterien, werden als nächstes Schweißproben angefertigt. Durch Veränderung einzelner Parameter und anschließender Auswertung mithilfe von Schliffbildern werden die einzelnen Ursachen für die jeweiligen Unregelmäßigkeiten analysiert. Dies bildet wiederum die Grundlage zur Erstellung optimierter Parametersätze, welche je nach Ergebnis der Auswertung zur Minderung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten und Steigerung der Prozesssicherheit beitragen sollen. Angewandt auf realteilnahe Geometrien kann deren Auswirkung untersucht werden. Für den zweiten Projektteil ist das Vorgehen ein ähnliches. Zunächst wird eine Auswahl der aussichtsreichsten Werkstoffe aus den in Betracht kommenden Werkstoffgruppen getroffen. Es folgt eine Reihe von Vorversuchen zur Feststellung der Schweißbarkeit und Qualität. Diese dienen anschließend als Ausgangspunkt für umfassende systematische Schweißversuche, welche notwendig zur Entwicklung der jeweiligen Schweißparameter sind. Abschließend folgt die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf die Beschichtung von Realteilgeometrien und deren Auswertung in Form der entsprechenden Prüfmethoden.

Ergebnisse und Diskussion

Für die Projektphase 1 konnten mit dem geplanten Vorgehen verschiedene Ursache für das Auftreten von Schweißnahtunregelmäßigkeiten eingegrenzt werden. Zu erwähnen sind hier der Einfluss der Wärmeleitung im Schweißprozess bezogen auf die hohe Rissanfälligkeit aufgrund thermisch induzierter Spannung, die Beschaffenheit des pulverförmigen Zusatzwerkstoffes (Verunreinigungen, Kornform und Korngrößenverteilung) und die Auswirkungen des komplexen Zusammenspiels der jeweiligen Schweißparameter auf die verschiedenen Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse konnten Kupferpenetrationen und Rissbildung in nachfolgenden Testschweißungen vollständig vermieden werden. Noch während dieser Projektphase sorgten mehrere äußere Faktoren (Marktsituation, Kundenneuentwicklungen, REACH Verordnung) dafür, den bleifreien Ersatzwerkstoffen einen deutlich größeren Platz als anfänglich vorgesehen einzuräumen. Es wurden neun bleifreie Lagerwerkstoffe aus fünf Werkstoffgruppen untersucht. Große Aufmerksamkeit galt entsprechend dem Interesse der Anwender den Zinnbronzen. Hier konnten die nötigen Parameter erarbeitet und mit diesen bereits Musterteile nach Kundenwünschen gefertigt werden. Des Weiteren ließen sich Aluminiumbronzen ebenfalls defektfrei verarbeiten. Zur Abschätzung der Schweißseignung wurden darüber hinaus erste Untersuchungen an einer Reihe weiterer Gleitwerkstoffe durchgeführt. Dazu zählen ausgewählte Messinglegierungen und Bismut-Bronzen sowie ein Aluminium-Zinn Werkstoff.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Vorträge
- Messeauftritt „PowerGen“ Wien 2018
- Kundenbesuche
- Internetvideos (Webseite, Youtube)

Fazit

Die Variante einer bleifreien Pufferschicht mit bleihaltiger Funktionsschicht wurde erfolgreich zur Produktionstauglichkeit gebracht. Die Ergebnisse der Untersuchung und Optimierung konnten in ersten Durchläufen überzeugend in der Produktion angewandt werden und zeigten dank gesteigerter Prozesssicherheit eine deutliche Eignung für den Einsatz in der Serienproduktion. Die vorher auftretenden Unregelmäßigkeiten konnten gänzlich vermieden oder auf einen akzeptablen Stand reduziert werden. Daraus geht hervor, dass die gesetzten Ziele der Projektphase 1 erreicht wurden. Gleiches gilt für die Ziele des zweiten Projektteils. Im Verlauf der zweiten Projektphase konnte für alle untersuchten bleifreien Lagerwerkstoffe eine allgemeine Eignung als Substitutionskandidat hochbleihaltiger Lagerwerkstoffe nachgewiesen werden. Neben der guten bis sehr guten Schweißseignung überzeugten nach ersten Prüfungen die Schweißresultate. Es wurden Realteile zur Beprobung und Freigabe bei mehreren Kunden eingereicht.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	4
Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken.....	4
Verzeichnis von Tabellen.....	5
1. Einleitung.....	6
2. Projektphase I: bleifreie Pufferschicht.....	8
2.1 Vorgehen / Ursachenfindung.....	10
2.1.1 Identifizierte Einflussfaktoren für Schweißnahtunregelmäßigkeiten.....	11
2.1.2 Zinnbronze mit geringen Pb-Zusätzen (<3%).....	14
2.2 Fazit:.....	21
3. Projektphase II: bleifreie Lagerwerkstoffe.....	22
3.1 Beschreibung des grundsätzlichen Vorgehens bei der Parameterentwicklung.....	22
3.2 Auswertung der Schweißproben.....	23
3.3 Untersuchte Lagerwerkstoffe.....	24
3.3.1 Zinnbronzes.....	25
3.3.2 Aluminiumbronzes.....	27
3.3.3 Weitere Gleitwerkstoffe.....	28
3.4 Fazit bleifreie Lagerwerkstoffe.....	30
4. Fazit.....	31
5. Ausblick.....	32

Verzeichnis der Bilder, Zeichnungen und Grafiken

Abbildung 1: Riss in Auftragsschicht.....	9
Abbildung 2: Querschliff geätzt; Lotbruch im Grundwerkstoff, Porenbildung in Bronzeschicht.....	9
Abbildung 3: mehrlagig geschweißter Probeteppich.....	11
Abbildung 4: PT-Prüfung der sichtgedrehten Probe.....	11
Abbildung 5: Sichtgedrehte Probe.....	11
Abbildung 6: Probe 1 – 11.....	14
Abbildung 7: Probe 1 – 11; schichtweise Auswertung.....	14
Abbildung 8: Probe 4; schichtweise Auswertung.....	15
Abbildung 9: Probe 2, Porenbildung im stark durchmischten Bereich.....	15
Abbildung 10: Probe 12 – 29.....	16
Abbildung 11: Probe 21 – 29; schichtweise Auswertung.....	16
Abbildung 12: Probe 18; ohne Versatz zw. Schichten; Übergangsbereich zw. Grund- und Deckschicht.....	17

Abbildung 13: Probe 35; mit Versatz zw. Schichten; Übergangsbereich zw. Grund- und Deckschicht	17
Abbildung 14: Probe 35; PT-Prüfung; rechts Übergangsbereich zw. GS & DS.....	17
Abbildung 15: Längsschliff, ungeätzt	18
Abbildung 16: Längsschliff geätzt; Bindungsbereich	19
Abbildung 17: Längsschliff geätzt; Bindungsbereich	19
Abbildung 18: Querschliff geätzt; Bindungsbereich	20
Abbildung 19: Querschliff geätzt; Bindungsbereich	20
Abbildung 20: Längsschliff geätzt; Bindungsbereich	26
Abbildung 21: Längsschliff CuSnNi geätzt; Bindungsbereich.....	26
Abbildung 22: Längsschliff CuSnNi geätzt	26
Abbildung 23: Musterteil Zinnbronze	27
Abbildung 24: Musterteil Zinnbronze Sichtgedreht	27
Abbildung 25: Querschliff CuAl ungeätzt; Bindungsbereich.....	27
Abbildung 26: Querschliff CuAl geätzt; Bindungsbereich.....	28
Abbildung 27: Querschliff CuAl ungeätzt; Bindungsbereich.....	28
Abbildung 28: Bolzen Ø 200 mm x 50 mm; C10 - CuAl; h = 2,0 mm; mehrlagig; Sichtgedreht.....	28
Abbildung 29: Innenbeschichtung Ø 220 mm x 150 mm; C10 - CuAl; h = 2,5 mm; mehrlagig.....	28
Abbildung 30: Außenbeschichtung C10 – CuZn (rechts)	29
Abbildung 31: Schweißproben CuZn-Legierung (links)	29
Abbildung 32: Bolzen Ø 85 mm x 50 mm; C10 - AlSnCu; h = 2,5 mm mehrlagig.....	30
Abbildung 33: Bolzen Ø 85 mm x 50 mm; C10 - CuSnBi; h = 2,5 mm mehrlagig.....	30

Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Zusatzwerkstoffe	13
Tabelle 2: Schweißparameter Probe 4	14
Tabelle 3: Schweißparameter	16
Tabelle 4: Übersicht der untersuchten bleifreien Lagerwerkstoffe	25

1. Einleitung

Initiierend für dieses Projekt waren die äußerst positiven Ergebnisse des vorangegangenen bereits von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekts „Lager I“, dessen Zielsetzung *„die Entwicklung eines wirtschaftlichen, laserbasierten Beschichtungsprozesses zum Aufbringen von Gleitschichten für Hochleistungslager auf der Basis von Kupfer und Weißmetalllegierungen“* erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Im nun hier besprochenem Projekt sollten die gewonnenen Erkenntnisse der allgemeinen Machbarkeit des Laserbeschichtens von Gleitlagern mit pulverförmigen Kupfer- und Weißmetalllegierungen, welche nach Projektabschluss vornehmlich auf dem Stand im Labor gefertigter Teststücke beruhten, auf einen für den Produktionseinsatz geeigneten technischen Stand gebracht werden, was im Konkreten vorsah, die gewonnenen Parameter der jeweiligen Versuchsreihen auf die technischen Spezifikationen, Geometrien und Beschichtungsflächen von Realbauteilen zu übertragen. Insbesondere die Aspekte der Auftragsrate, der Prozesssicherheit und der Ermittlung der richtigen Wärmezufuhr für die jeweiligen Lagerwerkstoffe wurden hierfür in den Fokus gestellt und sollten im Projektverlauf in zwei Aufgabenkomplexen ermittelt und sichergestellt werden. Ziel der ersten Projektphase war die auftretende Problematik der Rissbildung von Bleibronzeschichten, einem Ausschlusskriterium für den praxisbezogenen Einsatz des Verfahrens, durch die Weiterentwicklung einer *„bleifreien Pufferschicht in Kombination mit einer Funktionsschicht aus Bleibronze“* zu reduzieren. In der zweiten Projektphase wiederum sollten zielgerichtet bleifreie Lagerwerkstoffe zur Substitution der sich im Einsatz befindlichen hochbleihaltigen Werkstoffe verfahrensspezifisch weiterentwickelt, nach Bedarf und Möglichkeit neuentwickelt werden und am Markt, soweit sich eine Eignung verifizieren ließe, in Verbindung mit dem Verfahren eingeführt werden. Beide Projektabschnitte bildeten nach Ansicht des Antragstellers entscheidende Grundvoraussetzungen für die Etablierung des Laser-Pulverauftragschweißens als ressourcenschonende, wirtschaftliche und innovationsfördernde Alternative zu den herkömmlichen Gießverfahren in der Verbundgleitlagerherstellung.

Im Laufe des Projektfortschritts ergab sich diesbezüglich eine äußerst günstige Situation für die Markteinführung neuer, bleifreier Lagerwerkstoffe in Kombination mit dem neuen Fertigungsverfahren. Einerseits stieg die Akzeptanz für das Verfahren aufgrund vieler positiver Referenzen seit Antragsstellung erheblich. Zum anderen waren, wie sich zeigte, eine Reihe von Anlagen- und Maschinenbauern in der fortgeschrittenen Planungsphase einer neuen Getriebegeneration, deren neuartigen Ansätzen ein entsprechend innovatives Fertigungsverfahren entgegenkam. Zusätzlich verschärfen sich die Vorgaben und gesetzlichen Bestimmungen für den Einsatz von gesundheitsschädlichen Substanzen wie Schwermetalle, so dass bei Neukonstruktionen ein genereller Verzicht auf bleihaltige Lagerwerkstoffe zunehmend Berücksichtigung findet. So erwies sich mit Aufnahme von Blei in die Kandidatenliste der SVCH (Substances of Very High Concern)¹ der europäischen

¹ <https://echa.europa.eu/de/substance-information/-/substanceinfo/100.028.273>

REACH Verordnung im Juni diesen Jahres die Zielstellungen der Entwicklung und des Einsatzes bleifreier Lagerwerkstoffe als zukunftsweisende Entscheidung. Gemäß den Reaktionen von Kundenseite, dem wachsenden Interesse an bleifreien Lagerwerkstoffen und damit verbunden am Laserauftragschweißen wurde die thematische Ausrichtung des DBU-Projektes an die veränderten Marktbedingungen angepasst und mit deutlicher Gewichtung auf den zweiten Teil der Projektzielsetzung verlagert. Wobei die erste Aufgabenstellung „*Bleibronze mit Pb-freier Pufferschicht*“ keine Vernachlässigung erfuhr und wie im Zwischenbericht beschrieben, weiterentwickelt und auf einen produktionstauglichen Stand gebracht werden konnte.

2. Projektphase I: bleifreie Pufferschicht

Projektphase I widmete sich der Weiterentwicklung der Variante einer „bleifreien Pufferschicht in Kombination mit einer Funktionsschicht aus Bleibronze“ und setzte damit nahtlos an die Ergebnisse des Vorgängerprojektes an. Der Fokus lag folglich auf zwei Schwerpunkten, die schrittweise abgearbeitet wurden. Im ersten Schritt sollten die noch auftretenden Schweißnahtunregelmäßigkeiten reduziert werden, um eine Einsetzbarkeit in der Produktion tatsächlich garantieren zu können. Im zweiten Schritt darauf aufbauend sollte die Prozessoptimierung stattfinden.

Die Schweißnahtunregelmäßigkeiten traten in Form drei verschiedener Phänomene auf. Zum einen kam es zu Rissbildungen, zum anderen war das Auftreten gas- bzw. luftgefüllter Poren zu beobachten. Als drittes konnten nichtmetallische Einschlüsse festgestellt werden. Die Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen diese Unregelmäßigkeiten in ihren jeweils stärksten Ausprägungen. Zur Lösung dieser Problematik erfolgte als erstes die Festlegung von Bewertungskriterien für Form und Größe, um eine Aussage über deren Zulässigkeit treffen zu können. Dies geschah unter Berücksichtigung der Normen „DIN EN ISO 13919-1“ und „DIN EN ISO 5817“.

Bei den Rissen traten zwei voneinander unterscheidbare Riss-Phänomene auf, wobei das Auftreten beider generell unzulässig ist, weswegen hier das Hauptaugenmerk lag. Die erste Rissart stellt einen Riss in der Schweißnaht bzw. Auftragsschicht des Lagerwerkstoffes in Form einer flächigen Werkstofftrennung im aufgetragenen Zusatzwerkstoff dar. Exemplarisch hierzu Abbildung 1: Zu sehen ist, von unten nach oben, der Grundwerkstoff plus Bindungsverlauf, darüber die bleifreie Pufferschicht und ganz oben die bleihaltige Funktionsschicht, welche der Bereich für die Rissentstehung ist. Die zweite Rissart (siehe Abbildung 2), auch als „Lötrissigkeit“ bzw. „Kupferpenetration“ bezeichnet, ist eine Form der interkristallinen Spannungskorrosion. Dabei tritt der kupferhaltige Zusatzwerkstoff bei Temperaturen oberhalb von 700°C in schmelzflüssiger Form rissartig in den Stahl ein. Dieses Phänomen ist aus dem Bereich des HartlöSENS von Stahl mit kupferhaltigen Lotlegierungen bekannt.

Im Gegensatz zu den Rissen sind Einschlüsse und Poren generelle als unkritischer zu bewerten, sofern die Anzahl und Größe ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Ziel ist es daher die Anzahl und die Größe der auftretenden Einschlüsse und Poren auf einen akzeptierten Wert zu beschränken. Gleichzeitig das systematische Auftreten, z.B. von linienförmigen Anzeigen zu verhindern.



Abbildung 1: Riss in Auftragsschicht

50:1

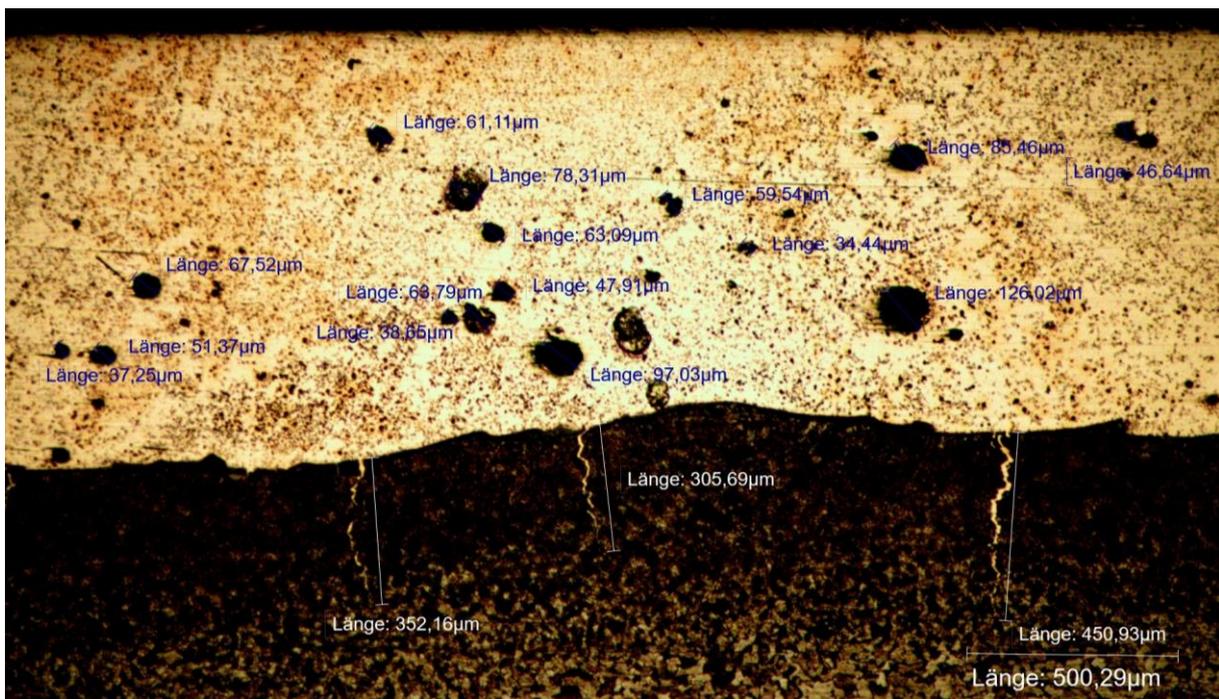


Abbildung 2: Querschliff geätzt; Lotbruch im Grundwerkstoff, Porenbildung in Bronzeschicht

50:1

2.1 Vorgehen / Ursachenfindung

Zunächst wurden die Standardansätze aus dem Bereich der Schweiß- und Löttechnik für die hier auftretenden Unregelmäßigkeiten betrachtet. Der Hintergrund ist, dass bereits umfangreiche Fehlerkataloge und Literatur existieren, die für eine konkrete Fehlerart sowohl die möglichen Ursachen als auch praktische Maßnahmen zu deren Vermeidung beinhalten. Idealerweise ließen sich so die Unregelmäßigkeiten schnell und mit den zur Verfügung stehenden Mitteln reduzieren bzw. ganz vermeiden. Ziel war es, die wesentlichen Einflussfaktoren, welche zum Auftreten der Unregelmäßigkeiten führten zu identifizieren bzw. einzugrenzen oder auszuschließen, um im Anschluss gezielte Maßnahmen zu ergreifen. Das daraus resultierende und im Folgenden beschriebene allgemeine Vorgehen fokussierte sich darauf, dass alle Maßnahmen unter wirtschaftlichen und produktionstechnischen Gesichtspunkten und mit der vorhandenen Anlagentechnik umsetzbar sind. Das maßgebliche Kriterium war die Machbarkeit. Das Vorgehen gliederte sich folgendermaßen. Begonnen wurde mit der Anfertigung von Schweißproben, bei denen gezielt nur ein Parameter bzw. Einflussfaktor geändert wurde. Dabei wurde unter anderem auch gezielt versucht, negative Schweißergebnisse zu erzeugen, um Einflussgrößen zu bestätigen oder auszuschließen. Anhand der Probenauswertung mittels Schliffbildern sollte als nächstes festgestellt werden, ob im Vergleich die erwarteten negativen oder positiven Effekte eingetreten sind. Um im Anschluss einschätzen zu können, ob und in welchen Maßen der jeweilige Einflussfaktor die entsprechende Unregelmäßigkeit beeinflusst. Im Zuge dieses Vorgehens zur Eingrenzung „potenzieller“ Ursachen und Einflussfaktoren für das Auftreten von Unregelmäßigkeiten wurden eine Vielzahl Faktoren untersucht. Folgende Faktoren konnten in Zusammenhang mit den auftretenden Schweißnahtunregelmäßigkeiten gebracht werden.

2.1.1 Identifizierte Einflussfaktoren für Schweißnahtunregelmäßigkeiten

Im Rahmen des vorausgegangenen Projekts zeigte sich, dass zu große Temperaturdifferenzen während des Beschichtungsprozesses bzw. schroffe Aufwärm- und Abkühlgeschwindigkeiten die Ausbildung von Rissen in der Auftragsschicht begünstigen und verstärken. Deswegen sollte auch hier der **Einfluss der Wärmeleitung im Schweißprozess** sowie eine daraus abgeleitete Spezifizierung von möglichen Vorwärm- und einzuhaltenden Zwischenlagentemperaturen untersucht werden. Grundsätzlich ist zu sagen, dass infolge der niedrigschmelzenden Bleieinlagerungen in der CuSn-Matrix eine hohe Rissanfälligkeit der hier betrachteten hochbleihaltigen Lagerbronzen vorliegt. Ziel stellte aufgrund dessen die Reduzierung von thermisch induzierter Spannung infolge unterschiedlich starker Wärmedehnung zwischen Grund- und aufgetragenen Zusatzwerkstoff dar. Im Fokus stand hierbei die Vermeidung einer Rissbildung in der Auftragsschicht nach Abbildung 1. Um eine für den Produktionsprozess relevante Aussage zu erhalten, wurden die Schweißversuche an realteilnahen Geometrien durchgeführt. Dazu wurden große Flächen mit repräsentativer Beschichtungszeit an Außengeometrien mehrlagig aufgebracht. Es wurden diverse Proben beschichtet, wobei jede Probe in einem bestimmten Temperaturbereich zwischen 25°C und 300°C gehalten wurde. Dabei wurde der Einfluss der Vorwärmtemperatur, die maximal zulässige Zwischenlagentemperatur sowie der Einfluss einer nachgelagerten Wärmebehandlung betrachtet. Eine erste Auswertung erfolgte nach der Beschichtung im abgekühlten Zustand. Dazu wurden die außenbeschichteten Proben auf drei definierte Schichthöhen sichtgedreht und einer Rissprüfung über ein PT-Verfahren nach DIN EN ISO 3452-1 unterzogen (Abbildung 3 und Abbildung 4). Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurden Vorwärm- und Zwischenlagentemperaturen definiert, bei deren Einhaltung sich eine Rissbildung deutlich reduzieren ließ (Abbildung 5).



Abbildung 3: mehrlagig geschweißter Probeteppich



Abbildung 4: PT-Prüfung der sichtgedrehten Probe



Abbildung 5: Sichtgedrehte Probe

Einen weiteren Punkt stellt die **Anpassung bzw. Optimierung des pulverförmigen Zusatzwerkstoffes** dar. Zum einen sollten mögliche schädliche Bestandteile und Verunreinigungen im Zusatzwerkstoff identifiziert und eingegrenzt werden. Zum anderen der Einfluss der Verdünnungsart, der Kornform und der Korngrößenverteilung betrachtet werden. Dazu wurden acht verschiedene Zusatzwerkstoffe der gleichen Bleibronzelegierung anhand von Probeschweißungen sowie den Auswertungen aus Abschnitt 3.2. hin untersucht. Diese unterschieden sich anhand der Verdünnungsart,

der Kornform, zulässiger Korngrößen und Korngrößenverteilung sowie anhand unterschiedlicher Zulässigkeitsgrenzen für eine Beimengung von Schwefel, Phosphor, Eisen, Zink etc. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden konkrete Zulässigkeitsgrenzen für pulverförmige Zusatzwerkstoffe definiert, womit erhebliche Verbesserungen bzgl. der Prozesssicherheit und der Reduzierung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten erreicht wurden. So hat die Kornform wesentlichen Einfluss auf die Förderfähigkeit und somit auf die Prozesssicherheit. Beispielsweise kommt es bei spratzigen und länglichen Pulverpartikeln schneller und häufiger zu Prozessabbrüchen aufgrund einer verstopften Pulverzufuhr. Die zulässigen Korngrößen und die Korngrößenverteilung haben einen erheblichen Einfluss auf die Schweißparameter. Feinere Pulverkörner besitzen ein günstigeres Oberflächen-Volumen-Verhältnis, weswegen sie sich mit deutlich weniger Leistung aufschmelzen lassen. Demzufolge lässt sich bei gleicher Leistung die Auftragsmenge erheblich steigern. Umgekehrt kann hingegen die Leistungsdichte merklich reduziert werden, was wiederum die Ausbildung von Poren und Lötbrüchen reduziert.

Der nächste wesentliche Einflussfaktor bei der Ausbildung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten sind die Schweißparameter. Während umfangreicher Schweißversuche zeigte sich, dass sie wesentlichen Einfluss auf alle auftretenden Schweißnahtdefekte (Lotbruch, Porenbildung, Rissbildung in der Auftragsschicht) haben.

Für die Porenbildung verantwortlich ist u.a. der niedrige Verdampfungspunkt des Bleis gegenüber der Grundmatrix aus CuSn mit deutlich höherem Schmelzpunkt. Um die Kupfer-Zinn-Anteile in den schmelzflüssigen Zustand zu überführen ist eine gewisse Leistungsdichte notwendig, die ihrerseits zu einem partiellen Verdampfen der Bleianteile führt. Als Folge sind diese Gase in der Schmelze eingeschlossen. Aufgrund der prozessbedingten sehr lokalen Schmelzbadausbildung und der damit einhergehenden schnellen Erstarrung kann die Schmelze nicht ausreichend ausgasen und es kommt zu einer verstärkten Porenbildung. Diese äußert sich über ein feinporöses Gefüge in der Funktionsschicht aus Bleibronze. Daraus folgen gegensätzliche Forderungen an die Leistungsdichte, d.h. Schweißparameter müssen so abgestimmt sein, dass der CuSn-Anteil gerade aufgeschmolzen wird, der Pb-Anteil hingegen nicht übermäßig stark verdampft.

Beim Lotbruch hat sich früh gezeigt, dass das Phänomen des Lötbruchs im direkten Zusammenhang mit der Leistungsdichte in der Grundsicht steht. Überschreitet man kritische Leistungsdichten, treten sogenannte Kupferpenetrationen im Stahl-Grundwerkstoff auf. Entsprechend wurden umfangreiche Variationen der Schweißparameter für die bleifreie Grundsicht durchgeführt. Ziel war es, einen Lotbruch zu verhindern (d.h. solche Parameter bzw. Parameterbereiche zu finden, bei denen dieser Defekt nicht auftritt) sowie einen zulässigen Grenzwert für die Leistungsdichte zu definieren. Zusätzlich wurden in diesem Zusammenhang weitere Einflussfaktoren für die Lotbruchausbildung untersucht. Beispielsweise der Einfluss des Trägermaterials (Grundwerkstoffes) aus Stahl. Untersucht wurden legierte Vergütungs-, Einsatz- und Baustähle. Auch die Nahtvorbereitung stellt einen solchen Einflussfaktor dar. Hierzu zählen der Einfluss verschiedener Vorbehandlungen wie Drehen und Fräsen (mit unterschiedlicher Rauigkeit, Dreh- und Fräsbildern), sowie das Strahlen

zum Einbringen von Druckspannungen im oberflächennahen Bereich. Als letztes sei in diesem Zusammenhang das Spannungsarmglühen genannt. Hierbei handelt es sich um eine vor Beschichtungsbeginn vorgelagerte Wärmebehandlung zum Abbau von im Grundwerkstoff vorhandenen inneren Spannungen, die mögliche Rissbildungen begünstigen (z.B. infolge vorausgegangener Zerspannung). Es lässt sich festhalten, dass das Hauptproblem beim Lotbruch in den gegensätzlichen Anforderungen liegt. Zum Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes ist eine gewisse Leistungsdichte nötig. Allerdings existiert nur ein schmales Prozessfenster in dem das möglich ist ohne einen Lotbruch zu erzeugen. Dieses Prozessfenster erlaubt hingegen bloß die Verarbeitung verhältnismäßig geringer Auftragsmengen, was seinerseits eine geringere Wirtschaftlichkeit zur Folge hat. Aufgrund dessen andere kupferbasierte Legierungen untersucht wurden, die als Pufferwerkstoff in Frage kamen und die folgenden Anforderungen zu erfüllen hatten. Eine defektfreie Verarbeitung großer Auftragsmengen ohne das Auftreten von Lotbruch. Des Weiteren die metallurgische Verträglichkeit mit dem Grundwerkstoff und hochbleihaltigen Lagerbronzen. Idealerweise würde der Pufferwerkstoff eine hohe Duktilität aufweisen und dadurch als spannungskompensierende Zwischenschicht fungieren.

Die in Tabelle 1 aufgelisteten Pufferwerkstoffe wurden zu diesem Zweck näher untersucht.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Zusatzwerkstoffe

Zusatzwerkstoff	Beschreibung
Aluminiumbronzen	- 2 Legierungen - Al-Anteil zwischen 8% und 12%
Kupfer-Nickel-Bronzen	- 4 Legierungen - Abgestufter Ni-Anteil zwischen 5% und 30%
Zinnbronzen	- 3 Legierungen mit Abgestufter Sn-Anteil zwischen 8% und 20% - 4 Legierungen mit geringen Pb-Zusätzen zwischen 1% und 5%
Messing	- 2 Legierungen - Zn-Anteil zwischen 30% und 40%

Für ein besseres Verständnis des schrittweisen Vorgehens, im Folgenden eine ausführliche Beschreibung anhand einer Zinnbronze mit geringen Pb-Zusätzen ($Pb < 30\%$). (Detaillierte Angaben zur Parameterfindung befinden sich unter Abschnitt 3.1.) Sämtliche in Tabelle 1 aufgeführten Legierungen wurden analog untersucht. Aus Gründen des Umfangs wird auf deren genaue Beschreibung allerdings verzichtet. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist unter Punkt 3.3. wiedergegeben.

2.1.2 Zinnbronze mit geringen Pb-Zusätzen (<3%)

Zunächst wird mit Orientierungsschweißungen begonnen. Diese dienen der Abschätzung der allgemeinen Schweißbarkeit des Zusatzwerkstoffes (ZW) sowie der groben Festlegung der Hauptparameter für die nachfolgende Parametervariation. Dazu werden Schweißsteppiche sowie Einzelspuren auf einem Grundwerkstoff (GW) aus unlegierten Baustahl geschweißt.



Abbildung 6: Probe 1 – 11



Abbildung 7: Probe 1 – 11; schichtweise Auswertung

Zunächst werden die Parameter der Grundschicht mit unmittelbarer Anbindung an den Grundwerkstoff untersucht (*Probe 1 – 16*). Der Schweißprozess an sich ist ruhig und weist nur eine sehr geringe Spritzerbildung auf. Alle Schweißsteppiche besitzen außerdem eine gleichmäßige Nahtausbildung.

Die Auswertung erfolgt durch schichtweises Abdrehen in 0,3 bis 0,2 mm Schritten zerspant und jeweils einer Auswertung durch eine Sichtprüfung (*VT-Prüfung*). Alle Proben wiesen eine gute Anbindung zum Grundwerkstoff auf. Die Schichten sind nahezu frei von Poren (*PT-Prüfung*) bzw. sonstigen Defekten. Die besten Ergebnisse lieferten die *Proben Nr. 4* und *Nr. 12* (siehe *Tabelle 2, Abbildung 8*).

Tabelle 2: Schweißparameter Probe 4

Proben-Nr.	Laserleistung [W]	Vorschub [mm/s]	Pulvermenge [g/min]	Versatz [mm]
4	3,0	25	32,5	3,0
12	3,0	25	35,0	3,0

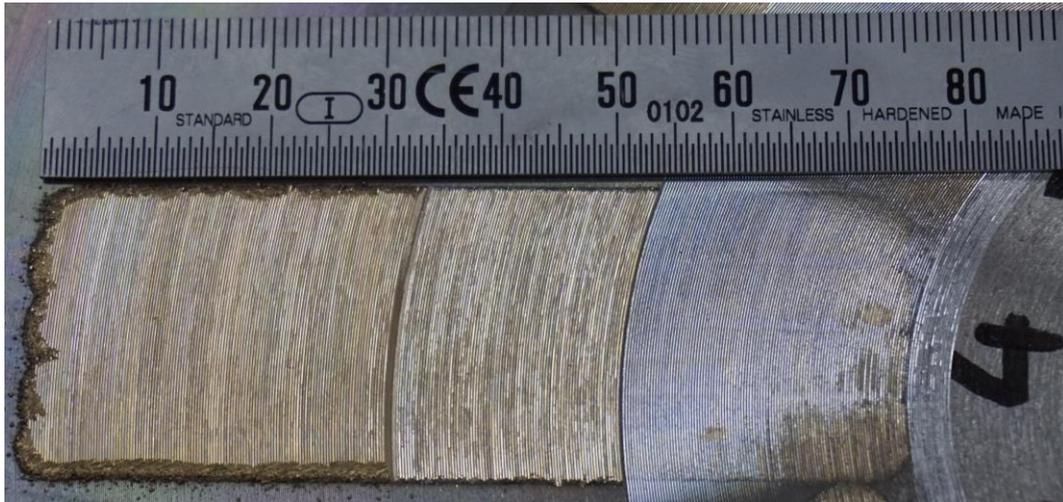


Abbildung 8: Probe 4; schichtweise Auswertung

Bei einigen Proben kam es zu einer partiell starken Durchmischung mit dem Grundwerkstoff. Als Folge wurde in den durchmischten Bereichen eine starke Porenbildung festgestellt (z. B. *Probe 2*; siehe *Abbildung 9*). Zusätzlich traten an der Nahtoberfläche vereinzelt mit Schlacke gefüllte, porenähnliche Vertiefungen auf. Folglich wurde versucht eine zu starke Aufmischung mit dem Grundwerkstoff zu vermeiden.



Abbildung 9: Probe 2, Porenbildung im stark durchmischten Bereich

Für die Auffindung geeigneter Parameter für die Deckschichten erfolgte eine systematische Variation der Hauptparameter, wobei jeweils nur eine Größe pro Schweißprobe verändert wurde. Zunächst wurde der Einfluss der Leistung und der Pulvermenge (*Probe 16 – 21*) betrachtet und anschließend die Vorschubgeschwindigkeit und die Überlappung (*Probe 22 – 30*) untersucht. Um eine Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten wurden die Parameter der Grundschicht konstant gehalten (*Parameter Probe 4*). Die anschließende Auswertung erfolgte wie unter *Punkt 3.2* beschrieben.

Tabelle 3: Schweißparameter

Proben-Nr.	Laserleistung [W]	Vorschub [mm/s]	Pulvermenge [g/min]	Versatz [mm]
17 – 1 (GS)	3,0	25	35,0	3,0
17 – 2 (DS)	4,5	25	35,0	3,0
18 – 1 (GS)	3,0	25	35,0	3,0
18 – 2 (DS)	4,0	25	35,0	3,0

Es lässt sich festhalten, dass auch bei der Aufbringung der Deckschichten (mehrlagiges Schweißen) eine gute schweißtechnische Verarbeitung gegeben ist. Gegenüber der Grundschicht wiesen alle Schweißsteppiche in mindestens einer ausgewerteten Schicht eine unterschiedlich starke Porosität auf. Die Poren treten verstärkt im Übergangsbereich zwischen der Grund- und der Deckschicht, sowie in abgeschwächter Form auch im Übergang zwischen zwei Deckschichten auf. Die optische Auswertung ergibt, dass der Durchmesser der Poren deutlich unter 0,5 mm liegt. Die besten Ergebnisse wiesen die Proben Nr. 17 und Nr. 18 auf, dort sind Poren in Hinblick auf Anzahl und Größe am geringsten ausgeprägt. Andere Defekte wie Risse oder Einschlüsse konnten nicht festgestellt werden.



Abbildung 10: Probe 12 – 29



Abbildung 11: Probe 21 – 29; schichtweise Auswertung

Zur Reduzierung der Poren im Überlappungsbereich zwischen der Grund- und Deckschicht (siehe *Abbildung 12*) wurden weitere Schweißversuche (*Probe 30 – 36*) durchgeführt. Dabei wurde unter anderem der Fokusabstand variiert als auch mit einem Versatz zwischen den einzelnen Schweißlagen gearbeitet. Bei letzterem wurde die Bahnmitte, als Bereich der höchsten Leistungsdichte, über dem Überlappungsbereich der vorherigen Lage gelegt. Dadurch ließen sich Anzahl und Größe der Poren nochmals reduzieren (siehe *Abbildung 14* und *Abbildung 13*).

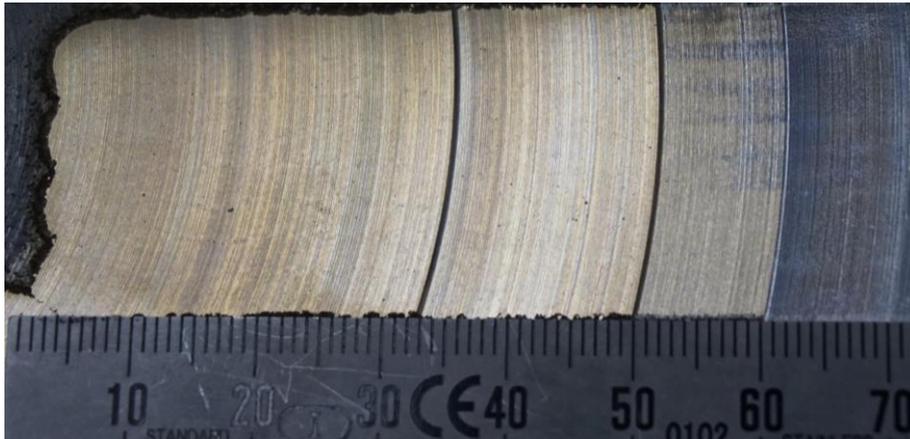


Abbildung 12: Probe 18; ohne Versatz zw. Schichten; Übergangsbereich zw. Grund- und Deckschicht



Abbildung 13: Probe 35; mit Versatz zw. Schichten; Übergangsbereich zw. Grund- und Deckschicht

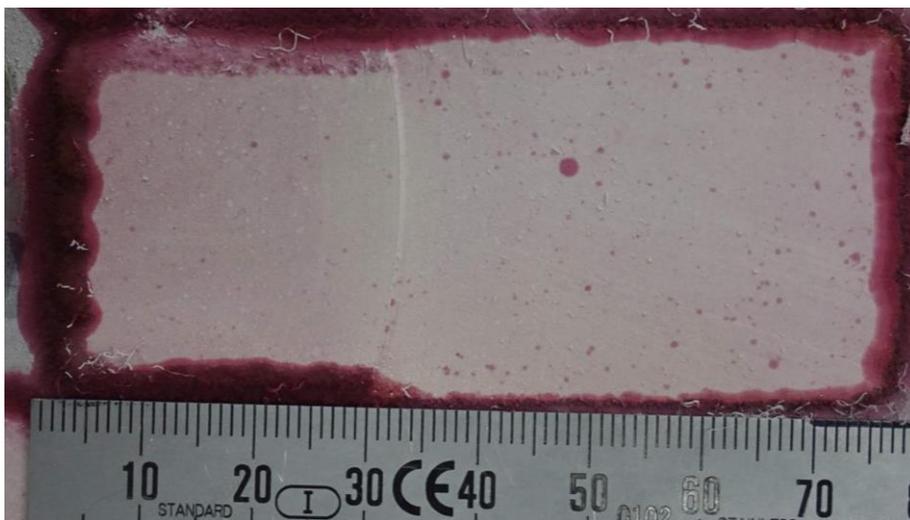


Abbildung 14: Probe 35; PT-Prüfung; rechts Übergangsbereich zw. GS & DS

Die vorab entwickelten Parametersätze mit den bisher besten Ergebnissen wurden mikroskopisch untersucht (*Probe Nr. 34* und *Nr. 37*). Dabei wird vorrangig der Bindungsbereich betrachtet (siehe *Abbildung 16* bis *Abbildung 19*). Die ausgewerteten Quer- & Längsschliffe beider Proben weisen im Bindungsbereich keinerlei Auffälligkeiten auf, wie beispielsweise Bindungsablösungen, Rissen im Grundwerkstoff oder Porennester. Die Anbindung zwischen dem Grund- und dem Zusatzwerkstoff

erfolgt nahezu aufmischungsfrei. D. h. die Bindungslinie in den Querschliffen (*Abbildung 18, Abbildung 19*) ist gerade und ohne die charakteristischen, riefenförmigen Einbrand-Mulden. Die in *Abbildung 16* dargestellte Wärmeeinflusszone (WEZ) ist sehr gering ausgeprägt und liegt im Bereich zwischen $167\ \mu\text{m}$ bis $414\ \mu\text{m}$.

Die Auswertung der Auftragsschicht zeigt viele feine und weitgehend gleichmäßig verteilte Ausscheidungen. In beiden Proben lassen sich kleinere Poren feststellen. Für Probe 37 (*Abbildung 15*) ergibt die Auswertung einen gemittelten Poren-Durchmesser von $48\ \mu\text{m}$, wobei die größte Pore einen Durchmesser von $121\ \mu\text{m}$ nicht überschreitet. *Abbildung 15* stellt dabei den Bereich mit den meisten Poren dar.

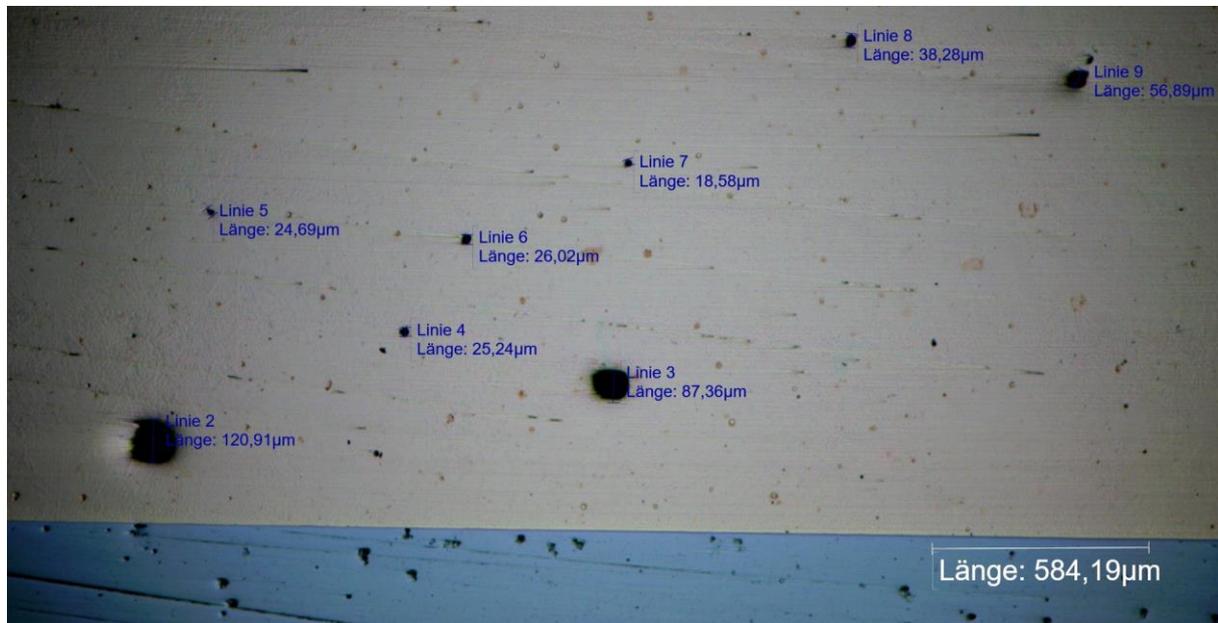


Abbildung 15: Längsschliff, ungeätzt

Probe 37 / 1

50:1

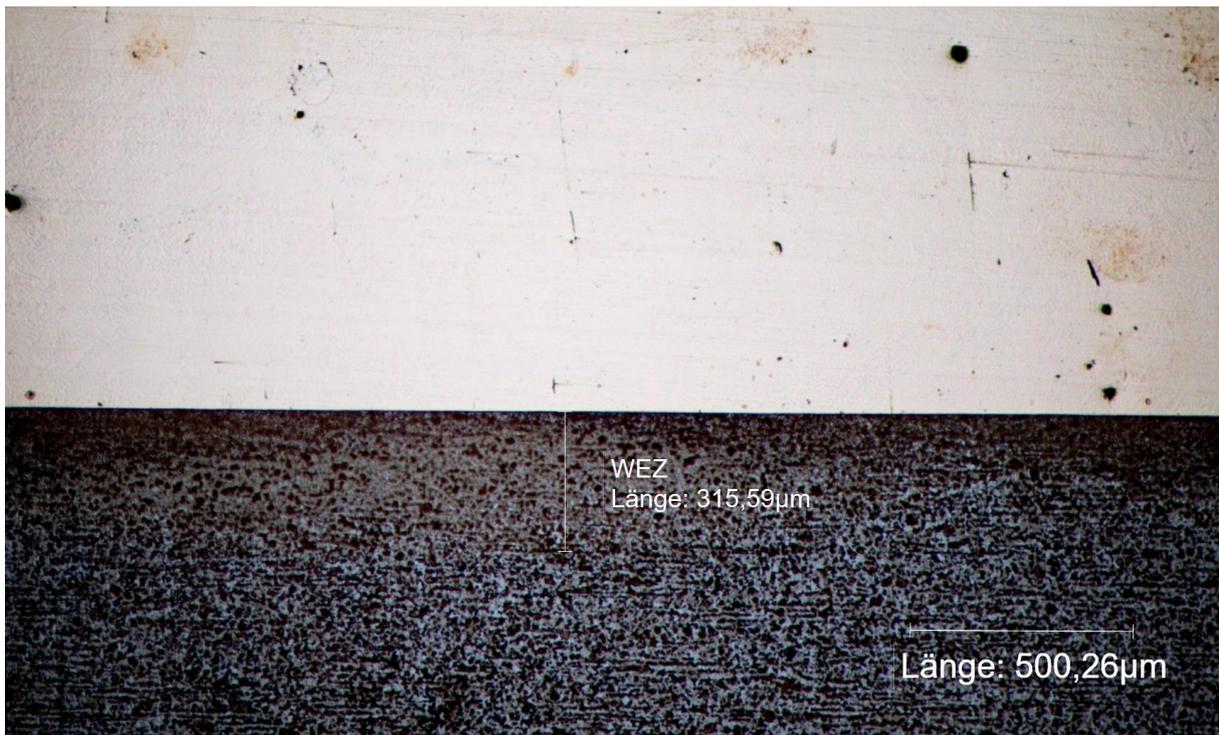


Abbildung 16: Längsschliff geätzt; Bindungsbereich

Probe 37 / 2

50:1

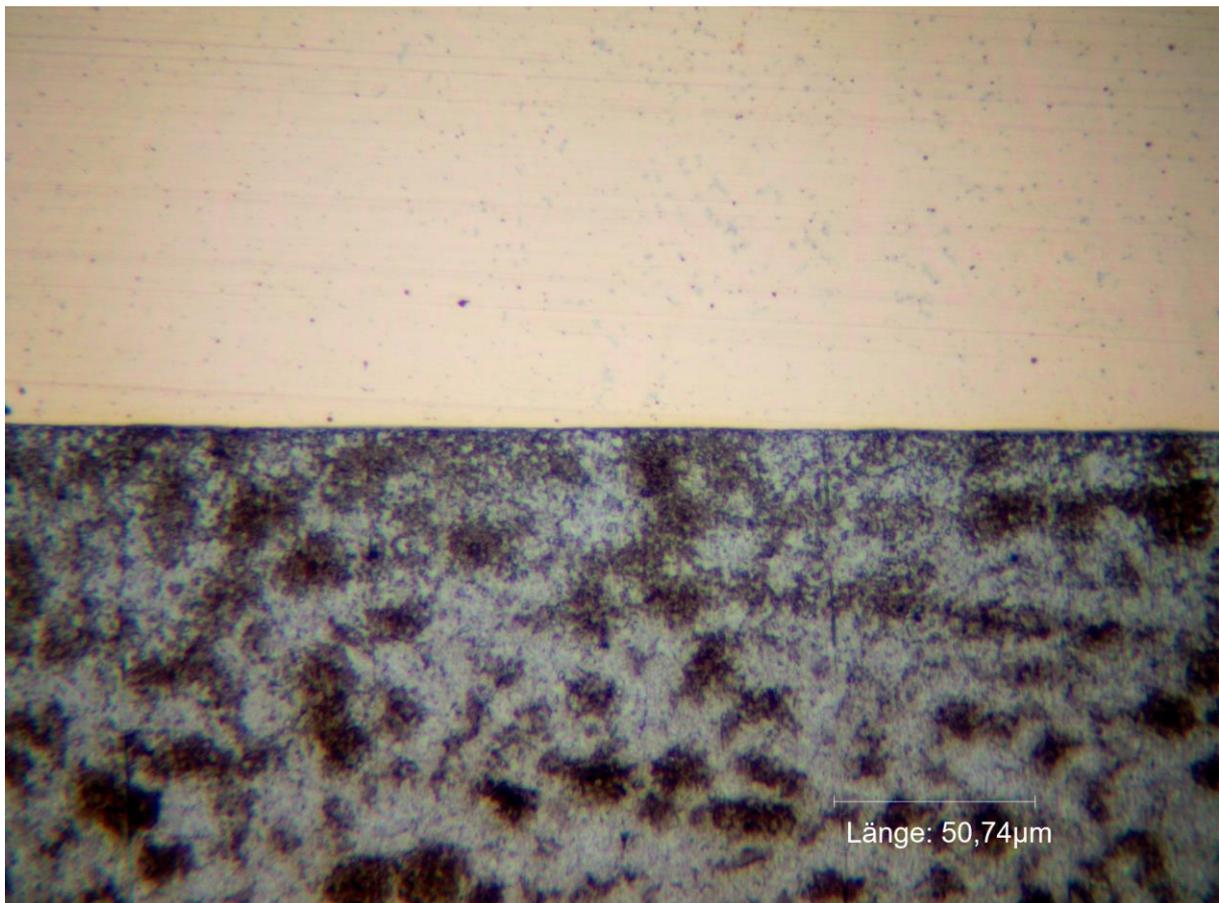


Abbildung 17: Längsschliff geätzt; Bindungsbereich

Probe 37 / 3

400:1

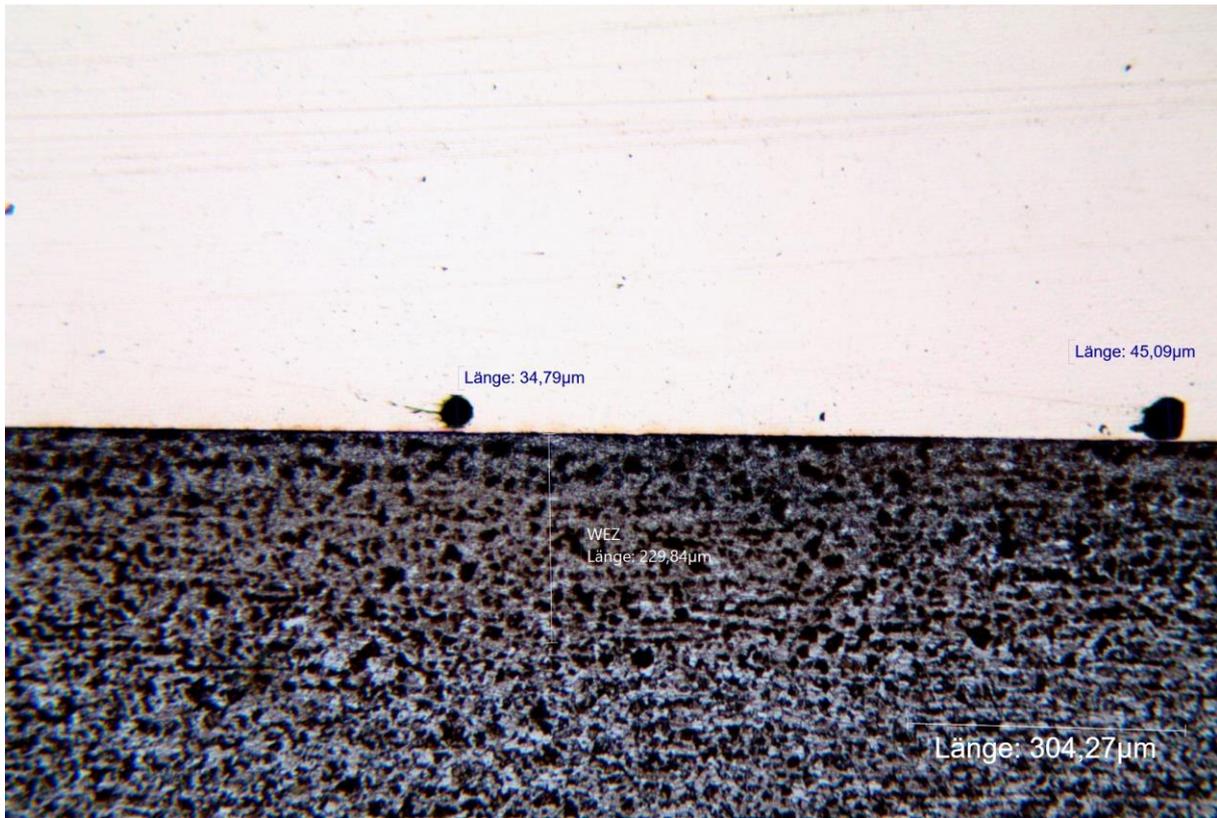


Abbildung 18: Querschliff geätzt; Bindungsbereich

Probe 37 / 4 100:1

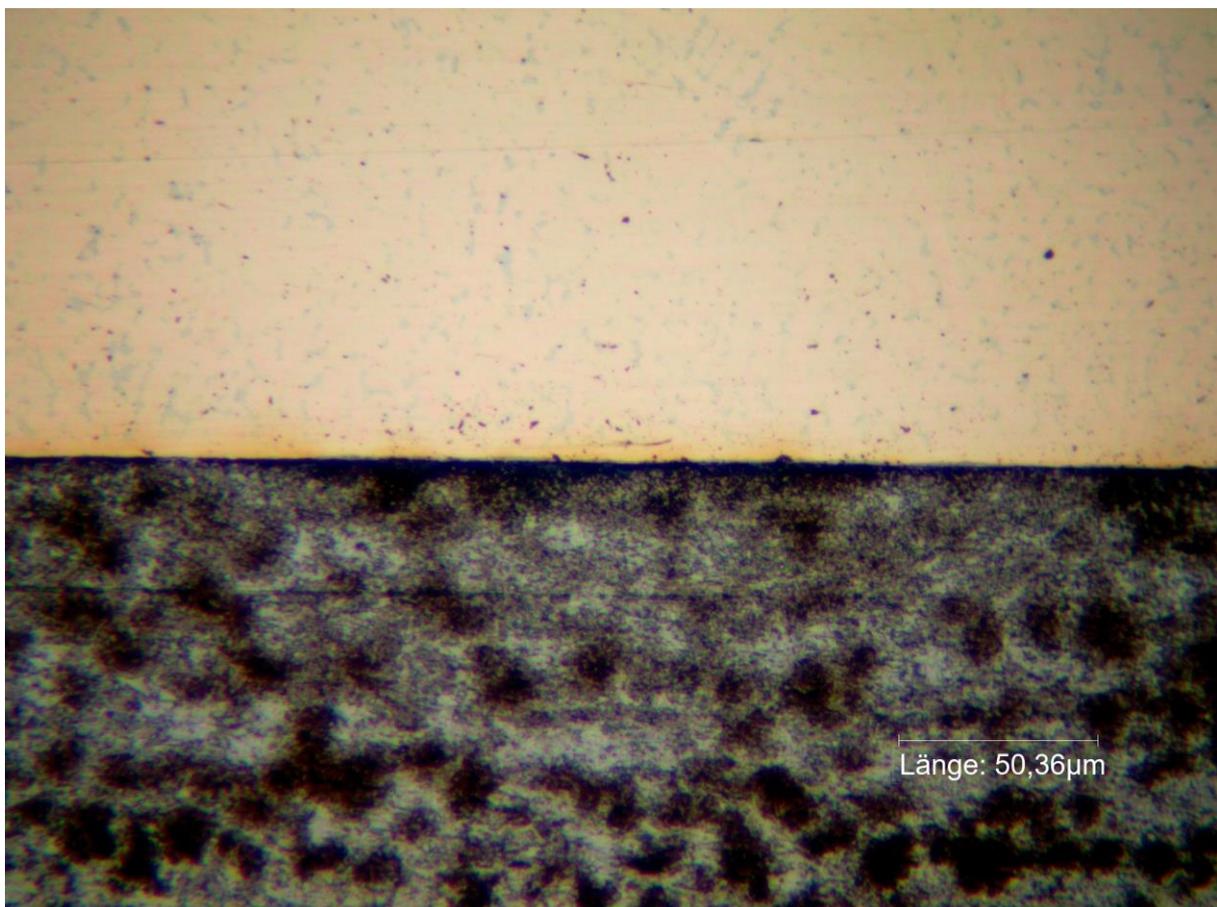


Abbildung 19: Querschliff geätzt; Bindungsbereich

Probe 37 / 5 400:1

2.2 Fazit:

Im Rahmen umfangreicher Schweißversuche konnten die Ursachen, die für die auftretenden Schweißnahtunregelmäßigkeiten verantwortlich sind, auf eine Reihe von Faktoren eingegrenzt werden. Es zeigte sich, dass aufgrund des gleichzeitigen Wirkens mehrerer, teils komplexer Einflussfaktoren, keine Eingrenzung auf eine einzelne Ursache möglich ist. Die Defekte entstehen vielmehr infolge des simultanen Wirkens und gegenseitigen Beeinflussens mehrerer Faktoren. Deutlich zeigte sich dies z.B. bei den Rissphänomenen. Daraus ergibt sich, dass für einen defektfreien Prozess einander teils entgegenwirkende Anforderungen erfüllt sein müssen. So die Abstimmung der Schweißparameter aufeinander. Wie sich zeigte, werden alle Unregelmäßigkeiten durch schlecht aufeinander abgestimmte Schweißparameter erheblich verstärkt. Entsprechend ist eine saubere Abstimmung der Schweißparameter (Vorschub, Leistung, Pulvermenge, Fokusbildung, Spurversatz usw.) einer der Haupteinflussfaktoren bei der Defektminderung. Darüber hinaus zeigte sich der wesentliche Einfluss der Wärmeführung auf die Ausbildung von Rissen im Zusatzwerkstoff. Aus dieser Beobachtung heraus wurden Vorwärm- & Zwischenlagertemperaturen definiert, deren Einhaltung die Ausbildung von Rissen in der Funktionsschicht erheblich reduziert. Ein weiterer Faktor ist die Anpassung des pulverförmigen Zusatzwerkstoffes. Dieser stellt einen zentralen Bestandteil des Beschichtungsprozesses dar. Die Kornform, die zulässigen Korngrößen und die Korngrößenverteilung beeinflussen die Parameter und dadurch die Schweißergebnisse in erheblichen Maßen. Im Ergebnis der Untersuchungen konnten die einzelnen Anforderungen an den Zusatzwerkstoff genau definiert werden, um ein möglichst optimales Ergebnis zu erreichen. Ferner spielt die Wahl des Pufferwerkstoffes eine Rolle. Die überzeugendsten Ergebnisse erzielte eine Zinnbronze mit sehr geringem Pb-Zusatz. Dieser Zusatz bewirkte eine bessere Einkopplung der Laserleistung, wodurch sich die zur Verarbeitung notwendige Leistungsdichte vorteilhaft senken ließ.

3. Projektphase II: bleifreie Lagerwerkstoffe

Wie in der Einführung erwähnt, zeigte sich während des Projektverlaufs eine geänderte Marktsituation mit einer zunehmend hohen Nachfrage an Pb-freien Lagerwerkstoffen. Daraus ergab sich eine äußerst günstige Situation für die Markteinführung neuer, bleifreier Lagerwerkstoffe in Kombination mit einem neuen Fertigungsverfahren. Die Änderung der Marktsituation lässt sich auf mehrere Gründe zurückführen. Einerseits stieg in der Zwischenzeit die Akzeptanz für das neue Fertigungsverfahren Laser-Pulverauftragschweißen anlässlich vieler positiver Reverenzen erheblich. Zum anderen waren eine Reihe namhafter Anlagen- und Maschinenbauer in der Planungsphase für neue zukunftstaugliche Getriebegenerationen. Gleichzeitig verschärften sich die Vorgaben (gesetzliche und kundenseitige) für den Einsatz von gesundheitsschädlichen Substanzen (Schwermetallen), so dass bei der Entwicklung von Neukonstruktionen u.a. auf bleihaltige Lagerwerkstoffe nach Möglichkeit vollständig verzichtet werden soll. Diese Umstände führten dazu, dass die thematische Ausrichtung des DBU-Projekts an die veränderten Randbedingungen angepasst wurde, indem der Arbeitsschwerpunkt auf den zweiten Teil der Projektausrichtung verlagert wurde.

3.1 Beschreibung des grundsätzlichen Vorgehens bei der Parameterentwicklung

Für jeden Werkstoff (Zusatzwerkstoff) und jede Werkstoffkombination (Grund- und Zusatzwerkstoff) wurde nach einem mehrstufigen Ablaufkonzept vorgegangen. Dies beinhaltete die entsprechenden Vorversuche bis zur abschließenden Realteilbeschichtung. Nach jedem Zwischenschritt bestand die Möglichkeit des Abbruchs (Verwerfen der Legierung), falls die entsprechenden Zwischenziele nicht erreicht werden konnten bzw. sich herausstellte, dass die jeweilige Legierung nicht schweißtauglich ist.

1. Vorversuche

Die hier durchgeführten Versuche dienen der Parameterfindung und dem generellen Prozessverständnis des Laserpulverauftragsschweißens der untersuchten bleifreien Legierung (siehe Tabelle 4). Es wurden die wesentlichen Prozessparameter wie die Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, die Pulverförderrate und der Versatz eingegrenzt, um eine Auftragsschicht zu realisieren. Dazu wurden Schweißproben an vereinfachter Geometrie auf einem unlegiertem Stahl als Grundwerkstoff geschweißt.

Zunächst erfolgte die Bestimmung von Parametern für die Grundsicht und anschließend für die darüber liegenden Deckschichten. Ziel stellt dabei die Auffindung eines Parametersatzes zum möglichst defektfreien, mehrlagigen Auftragsschweißen dar. Im Anschluss wurden die so ermittelten Parameter auf diverse Grundwerkstoffe übertragen. Dies ist notwendig da kundenseitig verschiede-

ne Grundwerkstoffe vorgegeben sind und die Schweißparameter der Grundschicht auf den jeweiligen Grundwerkstoff angepasst werden müssen. Unlegierte Bau- (S235, S355 usw.) und Einsatzstähle (C10, C15 usw.) sowie legierte Vergütungsstähle (16MnCr5, 42CrMo4 usw.). Dies erhöht die Anzahl der Parameterversuche und vervielfacht entsprechend den Entwicklungsaufwand. Eine Auswertung erfolgte auf Grundlage von Schlibbildern, schichtweiser Zerspanung, Ultraschall- sowie Penetrationsprüfungen und Sichtprüfung. Näheres dazu in Abschnitt 3.2. und Folgenden.

2. Parameterentwicklung

Um die jeweiligen Parameter definieren zu können, wurden systematisch Schweißversuche unternommen. Während dieser wurden verschiedene Variationen der Hauptschweißparameter wie Vorschub, Leistung, Pulvermenge, Spurversatz usw. systematisch abgearbeitet. Optional wurden Variationen weiterer Einflussparameter wie Fokusslage, Schweißposition, Schutzgasabschirmung und dergleichen in den Tests berücksichtigt. Die Beschichtung fand auf vereinfachten Probengeometrien statt. Die Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse wie in Abschnitt 3.2. beschrieben. Dieser Vorgang bildete insgesamt aufgrund der hohen Anzahl an Schweißproben einen Großteil des Arbeitsaufwandes.

3. Realteilbeschichtung

Basierend auf den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Schritten wurden die ermittelten Schweißparameter auf gängige Realteilgeometrien übertragen. Infolge der komplexeren Bedingungen durch die Realteilgeometrien, kamen weitere Einflussgrößen ins Spiel, die in der Regel eine Anpassung der Schweißparameter zur Folge hatten, weswegen u.a. unter Punkt 2 ein „Parameterbereich“ definiert wurde, der einen gewissen Spielraum einräumt. Zu den besagten Einflussgrößen beim Realteil gehört z.B. ein unterschiedliches Prozessverhalten aufgrund gewölbter Oberflächen (Außen- und Innenbeschichtung). Auch zeigten sich kleine Teile aufgrund ihrer geringeren Wärmekapazität anfällig gegenüber Temperaturüberhöhungen, die verdeutlichten, wie wichtig zur richtigen Wärmeleitung Schweißstrategien und Parameteranpassungen sind. Bei großen Teilen zeigte sich hingegen die Notwendigkeit einer hohen Prozessstabilität infolge der langen Schweißzeiten.

3.2 Auswertung der Schweißproben

Die Auswertung der Schweißsteppiche erfolgt im ersten Schritt über eine Sichtprüfung (VT) unmittelbar nach dem Schweißen. Dabei wird auf äußerlich feststellbare Unregelmäßigkeiten geprüft. Zusätzlich werden alle Schweißproben durch einen „schichtweise mechanischen Abtrag“ mittels Drehen bzw. Fräsen ausgewertet. Bei dieser zerstörenden Prüfung wird die Auftragsschicht in 0,1

mm bis *0,4 mm* Schritten schichtweise abgetragen und so die Probe über ihre gesamte Höhe bis in den Bindungsbereich hin untersucht. Dies ermöglicht eine schnelle Auswertung einer großen Anzahl von Proben. Jede Schicht wird dabei mittels Sichtprüfung begutachtet. Zusätzlich werden einige Schichten mittels Farbeindringprüfung (PT) zur Auffindung feiner Oberflächenrisse und Poren sowie Ultraschallprüfung (UT) untersucht. Letztere Prüfung zeigt mögliche Bindungstrennungen zwischen dem Grundwerkstoff und der Auftragsschicht an. Zusätzlich dazu werden vorläufiger Parametersätze anhand von Schlibfbildern mikroskopisch untersucht um eine detaillierte Aussage zu erhalten.

3.3 Untersuchte Lagerwerkstoffe

Es existiert eine Vielzahl von Bronzelegierungen, die sich als Gleitwerkstoffe eignen und bereits langjährig als solche Verwendung finden. Wie als massive Bronzegleitlager oder als walzplattierte Lager und Sinterlager im Automotivbereich. Die Problematik bestand bisher darin, dass der Großteil dieser Gleitwerkstoffe nicht für die Verarbeitung mittels eines Verbundgussverfahrens (Schleuder- und Standguss) geeignet ist, wodurch sie bisher kaum Zugang in den Bereich der Antriebs- und Getriebetechnik fanden. Beim Laser-Pulverauftragschweißverfahren bestehen solche Werkstoffbeschränkungen kaum und treten, falls überhaupt in stark abgeminderter Form auf. Bei den untersuchten Legierungen wurde ausschließlich auf bekannte aber bisher nicht im Verbund mit massiven Stahlkörpern verarbeitbare Gleitwerkstoffe zurückgegriffen. Der Vorteil bestand in der erheblichen Reduzierung des Beprobungsaufwands gegenüber komplett neuen Lagerwerkstoffen mit gänzlich unbekanntem Eigenschaften. Zudem konnte man sich dadurch einer höheren Kundenakzeptanz sicher sein.

Bei der Werkstoffauswahl kamen die folgenden Bedingungen zum Tragen. Die chemische Zusammensetzung sollte frei von potenziell gesundheits- und umweltgefährdenden Bestandteilen sowohl im Herstellungsprozess als auch in der Anwendung sein. Der Werkstoff sollte grundsätzlich als Lager- bzw. Gleitlagerwerkstoff mit bekannten Referenzanwendungen geeignet sein. Dies bedeutet die Erfüllung der Anforderungen und Randbedingungen des tribologischen Systems eines hydrodynamischen Gleitlagers. Außerdem vergleichbare mechanische Eigenschaften wie Zug- und Druckfestigkeit, Härte, Elastizität und weitere gegenüber den substituierten hochbleihaltigen Lagerbronzen vorweisen. Darüber hinaus eine abschätzbare Schweißeignung mit den klassischen Grundwerkstoffen (unlegierten Stählen) gewährleisten. In Tabelle 4 sind die im Rahmen des Projekts untersuchten bleifreien Lagerwerkstoffe aufgeführt. Teilweise wurden aus den jeweiligen Werkstoffhauptgruppen mehrere Legierungen schweißtechnisch untersucht. Die Untersuchung fand nach Maßgabe des unter Abschnitt 3.1. beschriebenen Vorgehens statt.

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten bleifreien Lagerwerkstoffe

Zusatzwerkstoff (ZW)	Beschreibung	Phase nach Punkt 3.1
Zinnbronze	<ul style="list-style-type: none"> - Cu-Basis mit Verchiedenen Sn-Gehalte von 8-14% - diverse Zusätzen u. a. Ni 	Phase 1 - 3
Aluminiumbronze	<ul style="list-style-type: none"> - Cu-Basis mit Verchiedenen Al-Gehalteb (8-10%) - diverse Zusätzen u. a. Ni, Fe 	Phase 1 - 3
Messing-Legierung	<ul style="list-style-type: none"> - Cu- Matrix mit Zn-Gehalt von 30 – 40% - Diverse Zusätze wie Sn, Al, Mn, Si, ... 	Phase 1
Bismut-Bronze	<ul style="list-style-type: none"> - Cu-Sn Matrix mit Bi-Gehalt von 5 – 10% 	Phase 1
Aluminium-Zinn Werkstoffe	<ul style="list-style-type: none"> - Al-Sn Matrix - Zusätzen z. B. Cu 	Phase 1

3.3.1 Zinnbronzen

Aufgrund des eingangs beschriebenen großen Kundeninteresses lag der Fokus auf der Gruppe der Zinnbronzen. Es wurden zwei Legierungen betrachtet, die sich zum einen in ihrem Zinnanteil unterschied, zum anderen wies eine der beiden Legierungen einen geringeren Anteil von Zusätzen wie Nickel auf. Bei beiden Legierungen handelt es sich um zähnharte Werkstoffe mit einer hohen Verschleiß- und guten Warmfestigkeit. Obwohl sie im Vergleich mit den Bleibronzen über eingeschränkte Notlaufeigenschaften verfügen, sind sie unter der Voraussetzung einer ausreichenden Schmierstoffzufuhr für den Einsatz bei hohen Gleitgeschwindigkeiten mit gleichzeitig hohen Flächendrücken geeignet. Aufgrund dieser Eigenschaften bilden die Zinnbronzen einen geeigneten Ersatz für die hochbleihaltigen Lagerbronzen im Anwendungsbereich der Getriebelager. Gemäß des in Abschnitt 3.1. beschriebenen Vorgehens, konnten im ersten Schritt sowohl für die Grundsicht als auch die Decksicht Parameterbereiche erarbeitet werden, innerhalb derer sich die Legierungen defektfrei verarbeiten ließen bis hin zur erfolgreichen Beschichtung mehrerer Realteile (Abbildung 23 und Abbildung 24). Die Schliffbilder in Abbildung 22 und Abbildung 21 zeigen den aktuellen Stand am Realteil. Die in Abbildung 20 ersichtlichen vereinzelt auftretenden Unregelmäßigkeiten wie Mikroporen gelten aufgrund ihrer geringen Größe ($< 60\mu\text{m}$) als zulässig. Auf Grundlage dessen wurden mehrere Realteile mit verschiedenen geometrischen Abmaßen erfolgreich beschichtet. Aufbauend darauf wurden für mehrere Kunden Musterteile angefertigt, die der kundenseitigen Beprobung und der Freigabe des Fertigungsverfahrens dienen.

Im Zusammenhang mit legierten Stählen als Grundwerkstoff kam es zu teils hohen Aufhärtungen in der Wärmeeinflusszone (WEZ). Allerdings sind diese abhängig vom Anwendungsfall zu bewerten. Bestehen Anforderungen bezüglich eines maximal zulässigen Härtewertes in der WEZ, sind weitere Untersuchungen und Versuche unabdingbar.

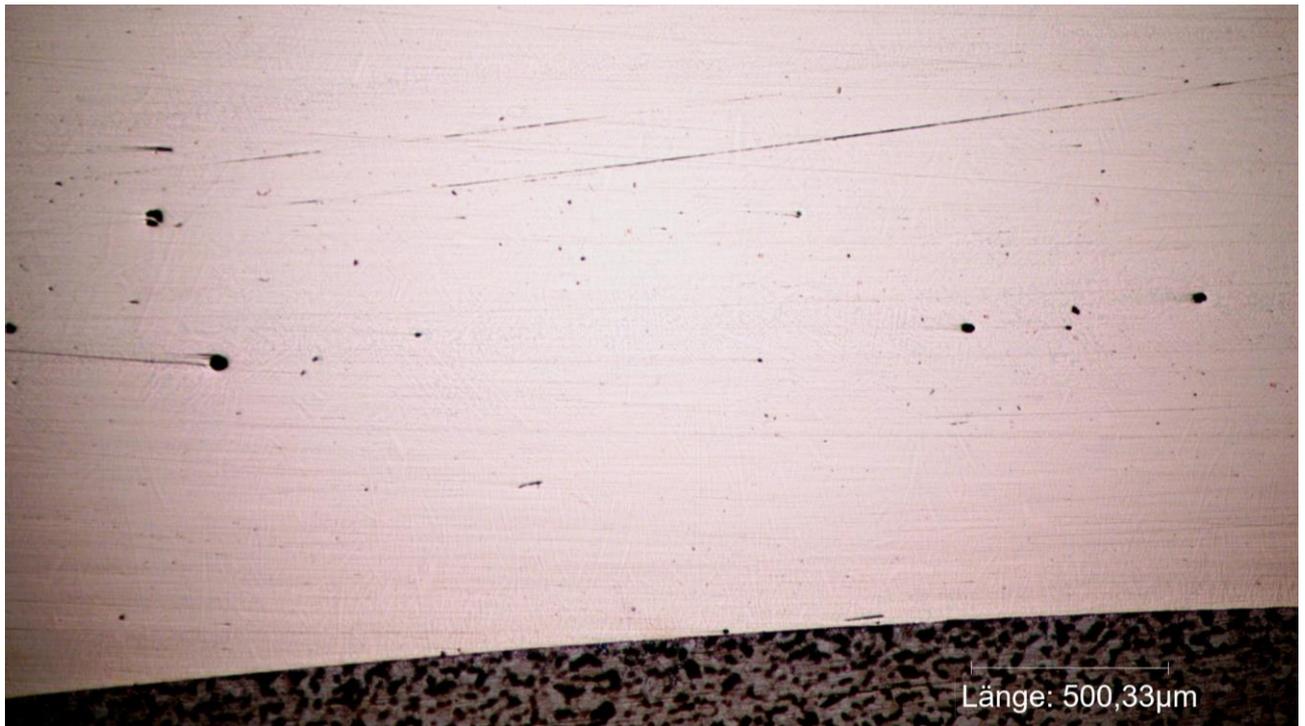


Abbildung 20: Längsschliff geätzt; Bindungsbereich

Probe 16 / 02

50:1

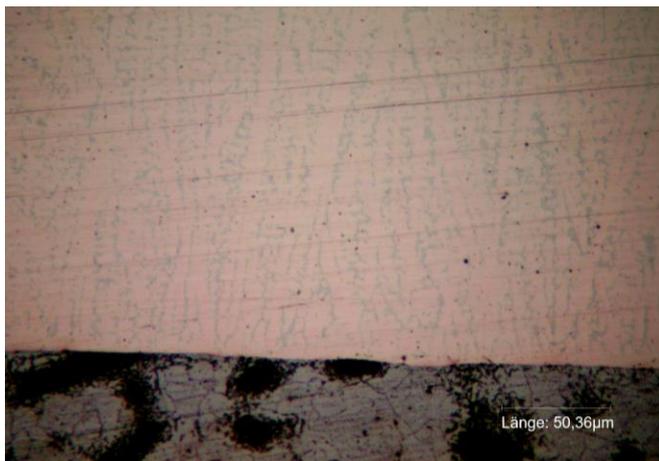


Abbildung 21: Längsschliff CuSnNi
geätzt; Bindungsbereich

Probe 16 / 21
400:1

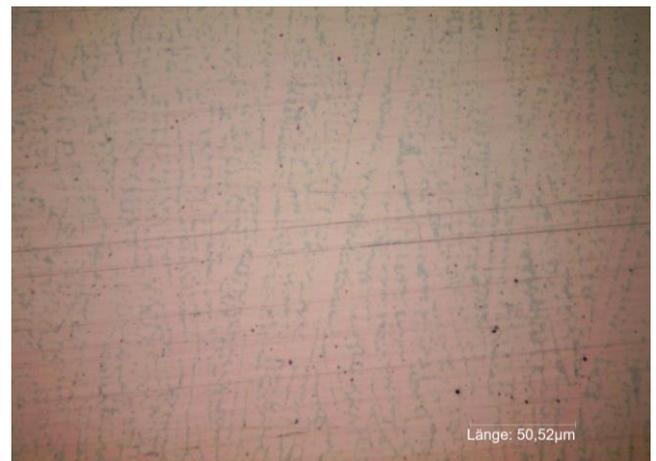


Abbildung 22: Längsschliff CuSn-
Ni geätzt

Probe 16 / 22
400:1



Abbildung 23: Musterteil Zinnbronze



Abbildung 24: Musterteil Zinnbronze Sichtgedreht

3.3.2 Aluminiumbronzes

Hierbei handelt es sich um harte Konstruktionswerkstoffe mit sehr hohen Festigkeitswerten, die jedoch gegenüber Bleibronzen schlechtere Notlaufeigenschaften besitzen. Für ihren Einsatz als Gleitwerkstoff ist eine gute Schmierung ebenso notwendig wie eine ausreichende Fluchtung. Demgegenüber eignen sich die Aluminiumbronzes für höchste statische und dynamische Lagerbelastungen sowie sehr hohe thermische Beanspruchung. Hinsichtlich ihrer schweißtechnischen Verarbeitbarkeit auf unlegierten Stählen zeigten sie eine sehr gute Eignung, d.h. sie ließen sich in einem sehr breiten Prozessfenster nahezu defektfrei verarbeiten. Der Parameterbereich wurde analog zu den Zinnbronzes im ersten Schritt sowohl für die Grundsicht als auch die Decksichten ermittelt und anschließend festgesetzt. Abschließend wurde dieser Stand ebenfalls auf Realteile übertragen, im Zuge dessen verschiedene Geometrien beschichtet wurden. Dazu gehören Axialsegmente (Abbildung 27), Außenbeschichtungen von Planetwellen für Umlaufgetriebe (Abbildung 28) und Innenbeschichtungen von Lagerbuchsen (Abbildung 29).



Abbildung 25: Querschliff CuAl ungeätzt; Bindungsbereich

Probe B / 01

50:1



Abbildung 26: Querschliff CuAl ungeätzt; Bindungsbereich Probe 200:1 B / 03

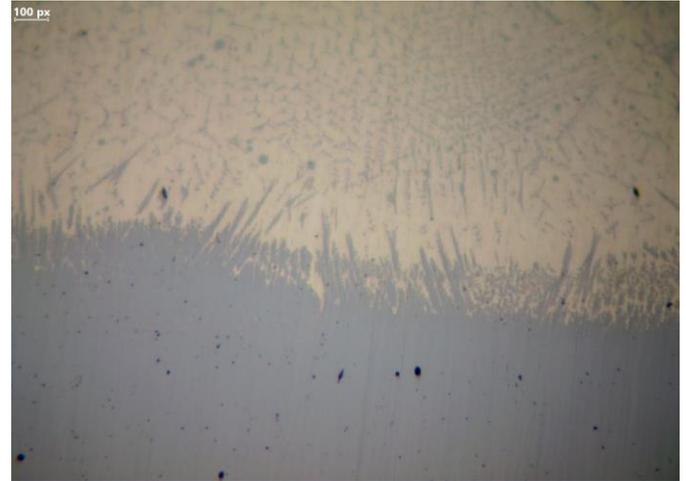


Abbildung 27: Querschliff CuAl ungeätzt; Bindungsbereich Probe 400:1 B / 04

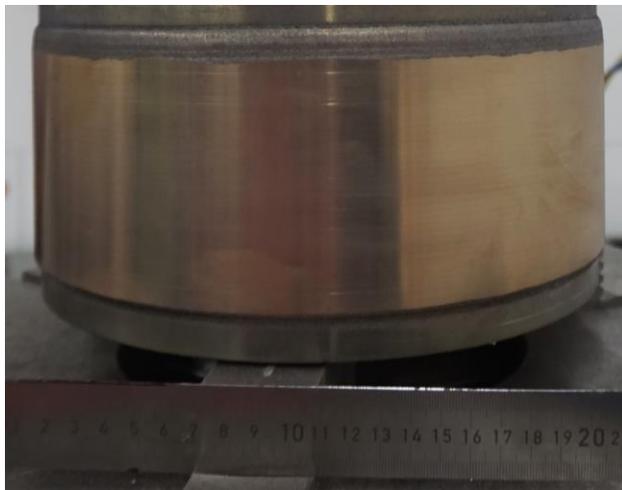


Abbildung 28: Bolzen \varnothing 200 mm x 50 mm; C10 - CuAl; h = 2,0 mm; mehrlagig; Sichtgedreht



Abbildung 29: Innenbeschichtung \varnothing 220 mm x 150 mm; C10 - CuAl; h = 2,5 mm; mehrlagig

3.3.3 Weitere Gleitwerkstoffe

Neben den bereits genannten wurden für weitere potenziell interessante Werkstoffgruppen Schweißversuche bzw. Orientierungsschweißungen durchgeführt. Die Zielsatzung bestand darin, mit verhältnismäßig wenig Versuchsaufwand eine erste Aussage bezüglich der schweißtechnischen Verarbeitung treffen zu können. Um hierdurch aussichtsreiche Ansatzpunkte für ein zukünftiges Vorgehen (mögliche Folgeprojekte) vorzudefinieren.

Messing:

Innerhalb dieses Projekts wurden zwei verschiedene Messinglegierungen betrachtet, deren Zn-Gehalt im Bereich von 30% bis 40% lag. Bei der ersten Legierung handelte es sich um eine Kupfer-Zinklegierung. Bei der zweiten um eine sogenannte Mehrstofflegierung mit Zusätzen aus Zinn, Aluminium, Mangan und Silizium. Bei der schweißtechnischen Verarbeitung verhielten sich beide Legierungen sehr ähnlich. Die Orientierungsschweißungen und erste Schweißversuche zeigten eine geringe Neigung zur Ausbildung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Außerdem ließen sich große

Auftragsraten an Pulver verarbeiten. Das Hauptproblem bei der Verarbeitung stellte jedoch der sog. Zinkabbrand dar. Dieser verursachte die Ausbildung eines starken Schmauch- bzw. Schweißrauchs. Dies führte einerseits dazu, dass die optischen Komponenten der Strahlformung schnell verschmutzten, was zum unweigerlichen Prozessabbruch führte. Lange Beschichtungszeiten waren dadurch nicht möglich. Zum anderen koppelte die Laserleistung in den Schweißrauch ein und schmolz den pulverförmigen Zusatzwerkstoff nicht weiter auf. Dies ließe sich durch eine konstruktive Anpassung der gesamten Schweißoptik zwar beheben, der dafür notwendige Änderungsaufwand ist allerdings verhältnismäßig groß. Allerdings könnte diese Problematik mit überschaubarem Aufwand im Rahmen eines Folgeprojekts eingehender untersucht werden.

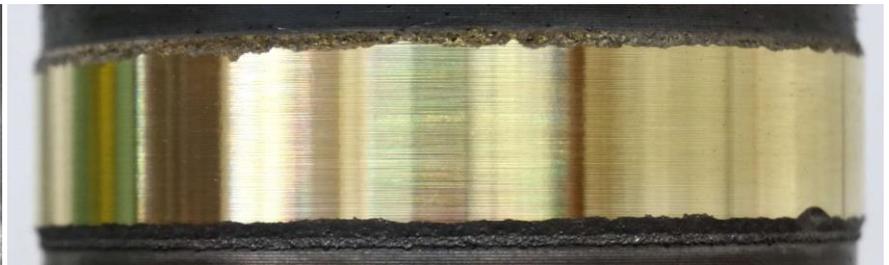
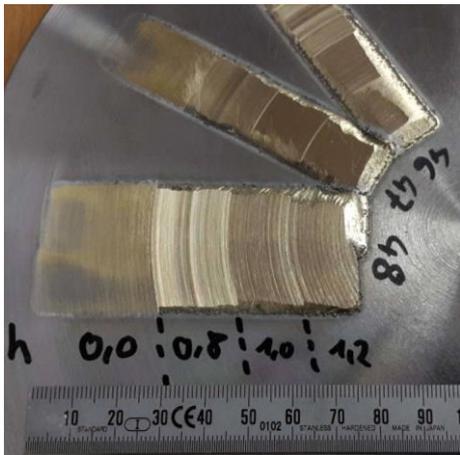


Abbildung 30: Außenbeschichtung C10 – CuZn (rechts)

Abbildung 31: Schweißproben CuZn-Legierung (links)

Bismut-Bronzen:

Bismut weist technologisch ähnliche Eigenschaften wie Blei auf, so dass Kupfer-Bismut-Legierungen auf dem asiatischen und nordamerikanischen Markt mitunter als Ersatzwerkstoff für bleihaltige Lagerbronzen eingesetzt werden. Während dieses Projekts wurden zwei Legierungen dieser Werkstoffgruppe mit verschiedenen Anteilen an Bismut schweißtechnisch untersucht. Die schweißtechnische Verarbeitung von bismuthaltigen Zinnbronzen konnte in ersten Versuchen erfolgreich nachgewiesen werden (Abbildung 33). Weitere Schweißversuche sollen folgen.

Aluminium-Zinn-Legierung

Anwendungstechnisch betrachtet handelt es sich hierbei um einen ausgesprochen interessanten Lagerwerkstoff, der aufgrund seiner Eigenschaften das Potenzial hat, die hochbleihaltigen Lagerbronzen vollständig zu substituieren. Das belegt das Fazit nach den ersten Schweißversuchen von AlSn-Legierungen. Die untersuchte Legierung ließ sich gut mittels Laser verarbeiten (Abbildung 32). Die Hauptschwierigkeit besteht in der Herstellung eines metallurgischen Verbunds aus dem Stahl-Grundwerkstoff mit dem Zusatzwerkstoff auf Aluminiumbasis. Eine vereinfachte Schweißparameterentwicklung der Grundschichtparameter lieferte zunächst keine befriedigenden Ergebnisse im Hinblick auf die Anbindung an den Grundwerkstoff. Dazu sind weitere bzw. genauere Untersuchungen nötig. Des Weiteren wurde ein sprödes Werkstoffverhalten beobachtet, welches grundsätzlich die schweißtechnische Verarbeitung erschwert. Trotz der hohen Anforderung ist eine schweißtechni-

sche Verarbeitung grundsätzlich möglich. Auch existieren bereits Lösungsansätze für die festgestellten Probleme (z.B. das Arbeiten mit Pufferschichten; eine Anpassung der Legierungszusammensetzung usw.). Es sind lediglich weitere Untersuchungen notwendig.



Abbildung 32: Bolzen \varnothing 85 mm x 50 mm; C10 - AlSnCu; h = 2,5 mm mehrlagig

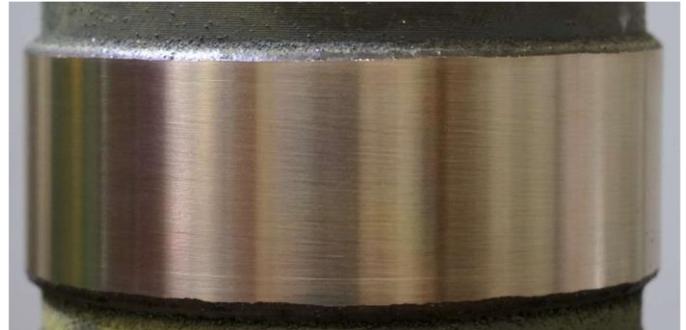


Abbildung 33: Bolzen \varnothing 85 mm x 50 mm; C10 - CuSnBi; h = 2,5 mm mehrlagig

3.4 Fazit bleifreie Lagerwerkstoffe

Die betrachteten Zinnbronzen weisen eine gute Schweißbeignung in Kombination mit unlegierten Stählen auf. Bei der Parameterentwicklung für Grund- und Deckschichten konnten Bereiche der Schweißparameter definiert werden, die für eine defektfreie Beschichtung geeignet sind. Darauf aufbauend wurden Realteile erfolgreich beschichtet sowie eine Reihe von Musterteilen zur kundenseitigen Untersuchung und Verfahrensfreigabe. Die zwei untersuchten CuAl-Legierungen (Aluminiumbronzen) überzeugten mit einer sehr guten Schweißbeignung. Wie bei den Zinnbronzen konnten breite Parameterbereiche für Grund- und Deckschicht definiert werden, die anschließend auf verschiedene Realteilgeometrien übertragen wurden. eine Reihe von Realteilen konnte somit beschichtet werden. Gute schweißtechnische Verarbeitung war ebenfalls bei den Messinglegierungen gegeben, doch infolge des Zinkabbrandes ist eine aufwendige Anpassung der Anlagentechnik notwendig. Letzteres ist aber technisch möglich, weswegen diese Werkstoffgruppe weiter betrachtet werden sollte. Ähnlich sieht es bei den Aluminium-Zinn-Legierungen aus. Deren schweißtechnische Verarbeitung stellt hohe Anforderungen, besonders im Hinblick der Erzeugung einer Anbindung an den Grundwerkstoff aus Stahl. Aufgrund der sehr interessanten technischen Eigenschaften sollten zu den Aluminium-Basis-Werkstoffen ebenfalls weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

4. Fazit

Projektteil I „bleifreie Pufferschicht“

Die Variante der bleifreien Pufferschicht mit einer bleihaltigen Funktionsschicht wurde erfolgreich zu einem produktionstauglichen Stand weiterentwickelt. Zunächst erfolgte im Rahmen umfangreicher Schweißversuche die systematische Eingrenzung der wesentlichen Ursachen für die Entstehung der Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Durch die genaue Identifikation der jeweiligen Ursachen ließen sich anschließend die auftretenden Unregelmäßigkeiten gezielt beeinflussen. Diese Einflussgrößen wurden im weiteren Verlauf so variiert bzw. angepasst, dass die Unregelmäßigkeiten auf ein zulässiges Maß reduziert werden konnten. Wesentlich verantwortlich dafür waren die Optimierung der Pufferschicht, die Spezifizierung der Wärmeleitung im Schweißprozess, die Parameteroptimierung der Grund- sowie Deckschicht und die Anpassung des pulverförmigen Zusatzwerkstoffs. Das Auftreten von Kupferpenetrationen sowie von Rissbildungen wurde mithilfe dieser Maßnahmen vollständig vermieden. Die Ausbildung von Poren sank auf einen akzeptablen Stand in Form eines feinporigen Gefüges. Außerdem konnte die Prozesssicherheit soweit gesteigert werden, dass lange Beschichtungszeiten zu realisieren waren, was eine notwendige Voraussetzung für den Einsatz in der Serienproduktion darstellt. Im Anschluss erfolgten erste Produktionen von Realteilen. Mehrere Einzelteile und Kleinserien wurden parallel zum herkömmlichen Fertigungsverfahren des Standgusses mit dem Laser-Pulverauftragschweißverfahren angefertigt. Ziel dieser internen Testaufträge war das Sammeln von Prozess- und Produktionserfahrungen.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Projektziele dieses Projektabschnitts erreicht wurden. In Anbetracht einiger Bereiche besteht noch Optimierungspotenzial, so die Reduzierung der auftretenden Porosität in Größe und Anzahl oder in der Steigerung der Auftragsmenge pro Beschichtungszeit, doch wurden diese aus gegebenem Anlass im Rahmen dieses Projekts aufgrund des hohen Interesses an Pb-freien Lagerwerkstoffen nicht weiterverfolgt.

Projektteil II „bleifreie Lagerwerkstoffe“

Insgesamt wurden fünf Werkstoffgruppen bzw. neun verschiedene bleifreie Lagerwerkstoffe auf ihre schweißtechnische Verarbeitung hin untersucht. Allgemein betrachtet sind alle untersuchten Legierungen interessant und sollten weiter untersucht werden. Innerhalb der Gruppe der Zinn- und Aluminiumbronzen wurden für insgesamt vier verschiedene Legierungen sehr umfangreiche Schweißversuche unternommen, ebenso Parameterentwicklungen in Kombination mit allen gängigen Grundwerkstoffen durchgeführt. Diese vier untersuchten Werkstoffe weisen eine gute bis sehr gute Schweißeignung auf. Für Versuchszwecke wurden auf Basis der Resultate der durchgeführten Untersuchungen Realteilgeometrien erfolgreich beschichtet. Gleichzeitig besteht bei den Kunden eine

hohe Nachfrage für den Einsatz dieser Legierungen. Dies bedeutet einen erfolgreichen Ersatz der hochbleihaltigen Lagerbronzen in diesem Bereich. Aufgrund dessen wurden und werden aktuell für mehrere Kunden Musterteile für die Beprobung und Freigabe erstellt. Mehrere Freigaben laufen zum Zeitpunkt dieser Veröffentlichung. Den nächsten Schritt nach einer erfolgreichen Freigabe stellt die Einführung der Legierungen in die Serienproduktion dar. Somit lässt sich zusammenfassen, dass in einigen Anwendungsbereichen des Getriebebaus die erfolgreiche Substitution hochbleihaltiger Lagerwerkstoffe durch bleifreie Gleitwerkstoffe gelang. Die Verarbeitung dieser bleifreien Lagerbronzen ist nur mittels des Laser-Pulverauftragschweißens möglich und wurde im Rahmen dieses DBU-Projekts entwickelt.

Zur Gruppe der Messing-, Kupfer-Bismut und Aluminium-Zinn-Legierungen lässt sich feststellen, dass erste Schweißversuche die grundsätzliche schweißtechnische Verarbeitung bei allen betrachteten Legierungen bestätigten. Aufgrund ihrer Eigenschaften als Lagerwerkstoffe sind diese Werkstoffe ungemein interessant und bieten sich alternativ in den Bereichen an, wo Zinn- und Aluminiumbronzen nicht als Bleibronzeersatz in Frage kommen. Eine Weiterverfolgung dieser Werkstoffe ist somit zwingend notwendig, um die hochbleihaltigen Lagerbronzen in wirklich allen Anwendungsbereichen substituieren zu können. Allerdings sind dazu weitere Untersuchungen und erheblicher Entwicklungsaufwand nötig, die während dieses Projekts nicht umgesetzt werden konnten.

5. Ausblick

Trotz der überzeugenden Ergebnisse und ersten Erfolge der bisherigen Projekte, ist das Potenzial dieser für die Herstellung von Verbundgleitlagern neuen Technologie längst nicht ausgeschöpft. Vielmehr kann hier von ersten Schritten auf einem langwierigen wie zukunftsweisenden Weg die Rede sein. So ließe sich weiter bei zunehmend breiterer Anwendung des Laser-Pulverauftragschweißens nicht nur der Energie- und Rohstoffaufwand reduzieren, es ergäben sich gänzlich neue konstruktive Möglichkeiten aufgrund der Einsetzbarkeit neuer Werkstoffe und verfahrensbedingter Beschichtungsvorteile, womit auf den Wunsch der Anwender nach Leistungsoptimierung reagiert werden könnte. Gleichzeitig bieten sich produktionstechnische Verbesserungen durch den viel geringeren Platzbedarf, ganz zu schweigen von der größeren Arbeitssicherheit für Bediener und Personal, als es bei den herkömmlichen Verfahren der Fall ist. Neben diesen ökonomischen Aspekten treten jedoch augenschlich die noch dringlicheren ökologischen Vorteile zu tage. Absehbarer Rohstoffverknappung, hoher Belastungen durch nach wie vor im Einsatz befindlicher giftiger Werkstoffbestandteile, klimatischer Veränderungen angesichts flächendeckenden Rohstoffabbaus und stetig steigenden Energieverbrauchs kann mit der Weiterentwicklung dieser Technologie im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus nachhaltig und spürbar entgegengewirkt werden. Als nächste konkrete Schritte auf diesem Weg empfehlen wir daher die weitere Konzentration auf

Lösungsansätze zur Substitution hochgiftiger Werkstoffbestandteile. So könnten die gängigen stark bleihaltigen Bleibronzen durch höherfeste Weißmetalle ersetzt werden, die höherfesten Weißmetalle, deren Legierungsgefüge Arsen, Cadmium und Antimon enthalten kann, ihrerseits dort, wo es von Anwenderseite zulässig ist, durch Aluminium-Zinn-Bronzen. Diese Problemlösungen beinhalten die weitere Verfahrensoptimierung hin zu höherer Prozesssicherheit und optimaler Ressourcennutzung.