

Schlussbericht REPTIL

Schlussbericht ILT: 01.01.2014 - 31.12.2016

Aachen, den 27.06.2017

130273 LUFO REPTIL

Entwicklung einer automatisierten Reparatur- und
Fertigungstechnologie mittels Laserauftragschweißen für
Triebwerksschaufeln aus Titanaluminiden

Berichtersteller:

M. Sc. Silja-Katharina Rittinghaus



Inhalt

0	Projektkenndaten	1
1	Kurzdarstellung	2
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Voraussetzungen	3
1.3	Planung und Ablauf	4
1.4	Wissenschaftliche und technische Ausgangsbedingungen	5
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2	Eingehende Darstellung	7
2.1	Ergebnisse und Bezug zur Zielsetzung	7
2.1.1	Pulverherstellung (AP3)	7
2.1.1.1.1	Partikelgrößenverteilung	7
2.1.1.1.2	Agglomerate/Fließfähigkeit	8
2.1.1.1.3	Sauerstoffanalyse und Absorptionsverhalten	8
2.1.2	Verfahrensentwicklung Laserauftragschweißen (AP4)	9
2.1.2.1.1	Umschmelzen und Laserauftragschweißen von ersten Einzelspuren	9
2.1.2.1.2	Herstellung von Volumenkörpern (Milestone 2)	10
2.1.2.1.3	Aufbau dünnwandiger Strukturen	17
2.1.2.1.4	Auffüllen künstlicher Defekte	19
2.1.2.1.5	Demonstration an Dummyblades	20
2.1.3	Wärmebehandlung, mechanische Nacharbeit, mechanische Kennwertermittlung (AP5)	21
2.1.3.1.1	Wärmebehandlung	21
2.1.3.1.2	Herstellung von Prüfkörpern (Aufstockung)	23
2.1.4	Offlineprogrammierung (AP7)	23
2.1.5	Vorwärmung, Schutzgasabschirmung (AP4/8)	25
2.1.6	Evaluierung Fertigungs- und Reparaturtechnologie (AP11)	29
2.2	Wichtigste Kostenpositionen	29
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit	29
2.4	Verwertbarkeit des Ergebnisses	30
2.5	Fortschritt Dritter	30
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	31



0 Projektkenndaten

Zuwendungsempfänger:
Fraunhofer ILT

Förderkennzeichen:
20T1311A

Vorhabensbezeichnung:
Entwicklung einer automatisierten Reparatur- und Fertigungstechnologie mittels Laserauftragschweißen für Triebwerksschaufeln aus Titanaluminiden

Laufzeit des Vorhabens:
01.01.2014 – 31.12.2016

Berichtszeitraum:
01.01.2014 – 31.12.2016



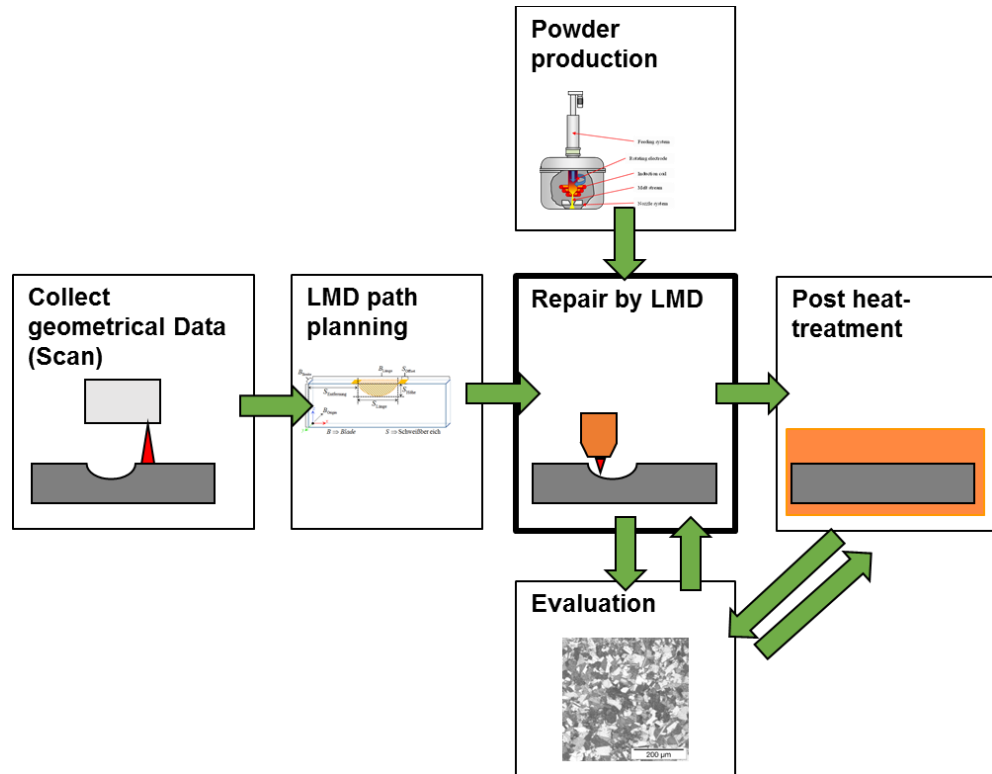
1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Niederdruck-Turbinenschaufeln aus intermetallischen Titanaluminid (TiAl)-Legierungen wurden bereits zum Zeitpunkt der Planung in aktuellen Flugzeugtriebwerken eingesetzt. Vor diesem Hintergrund stellte sich die Frage nach einer adäquaten Reparaturtechnologie sowohl für die Reparatur von defektbehafteten Bereichen, die während der gießtechnischen Fertigung entstehen und gemeinhin zu Ausschuss führen, als auch für die Reparatur von Turbinenschaufeln nach erfolgtem Einsatz. Für konventionelle im Triebwerksbau eingesetzte Werkstoffe wie Ni-Superlegierungen und klassische Titanlegierungen war und ist das Verfahren Laserauftragschweißen (LA) für viele Bauteile bereits etabliert. Die Entwicklung dieser Technologie für TiAl stellte aufgrund hoher Anforderungen hinsichtlich der Vermeidung von Rissen (Spannungsrisse im Unterschied zu Heißrissen bei Nickelbasiswerkstoffen), der Einstellung des Gefüges (komplexe Phasenumwandlung im Festen) und der Verhinderung von Sauerstoffkontamination (hohe Reaktivität der Schmelze, Versprödung auch bei geringer Sauerstoffaufnahme) eine anspruchsvolle Aufgabe dar.

Zielsetzung des Vorhabens war daher die Entwicklung einer Verfahrenstechnik für das additive Laserauftragschweißen (LA) zum defektfreien (keine Risse und Poren) Auftragschweißen von TiAl-Werkstoffen auf artgleichem Substrat. Die Untersuchungen sollten sukzessive an verschiedenen TiAl-Legierungen und Probengeometrien mit jeweils steigendem Schwierigkeitsgrad durchgeführt werden. Basierend auf einem bestehenden roboterbasierten Anlagenkonzept sollte eine Demonstratoranlage mit Vorwärmeinrichtung und Schutzgaskammer aufgebaut und die Prozesskette (Bild 1) von der Defekt-Geometrieerfassung bis zur thermischen Nachbehandlung zur Gefügeeinstellung demonstriert werden.

Bild 1: Skizze der Prozesskette zur Reparatur von TiAl-Turbinenschaufeln (GAT2017)



1.2 Voraussetzungen

Voraussetzung für das Projekt war, dass im Projektkonsortium alle notwendigen Kompetenzen vertreten sind. Die konventionelle Herstellung von TiAl-Material mittels Feinguss und Knowhow über prozess- und werkstofftypische Fehlerbilder und Eigenschaften können von ACCESS abgedeckt werden. Kenntnisse zur Verarbeitung von anspruchsvollen Werkstoffen mittels LA haben das ILT und LASERVORM. Hierbei liegen die besonderen Stärken der Partner jeweils in der Entwicklung der Prozessführung (ILT) und Anlagentechnik (LASERVORM). Der Prozess der Herstellung von für das LA benötigten Metallpulvern wird bei TLS (Gasverdüsung) entwickelt. Die Charakterisierung der Pulver und der Gefüge erfolgt gemeinschaftlich durch die Projektpartner ACCESS und ILT unter Einbeziehung externer Dienstleister zur Untersuchung der chemischen Zusammensetzungen. Die prozesstechnischen Randbedingungen zur Verarbeitung von TiAl mittels LA werden am ILT evaluiert und durch LASERVORM durch Aufbau der Demonstratoranlage und Entwicklung der spezifischen benötigten Anlagenkomponenten zur Vorheizung und Schutzgasabschirmung umgesetzt. Die Expertise zur schrittweisen Automatisierung des Reparaturprozesses durch Geometrieerfassung durch Scannertechnik, Offline-Bahnprogrammierung und Vernetzung liegt bei MABOTIC. Die Implementierung erfolgt in enger Zusammenarbeit mit

LASERVORM. Die Herstellung von LA-Proben wird hauptsächlich vom ILT durchgeführt. Die Postprozesse der mechanischen Nacharbeit und Wärmebehandlung sowie die Charakterisierung der Gefüge und des mechanischen Verhaltens können über ACCESS abgebildet werden.

1.3 Planung und Ablauf

Arbeitsschritte und deren zeitliche Planung sind im Projektablaufplan (Bild 2) dargestellt. Halbjährliche Projekttreffen zur Abstimmung aktueller Arbeitspunkte wurden jeweils unter Beteiligung aller Projektpartner durchgeführt. Alle vorgesehenen Aufgabenstellungen wurden erfolgreich bearbeitet und innerhalb des Zeitrahmens abgeschlossen.

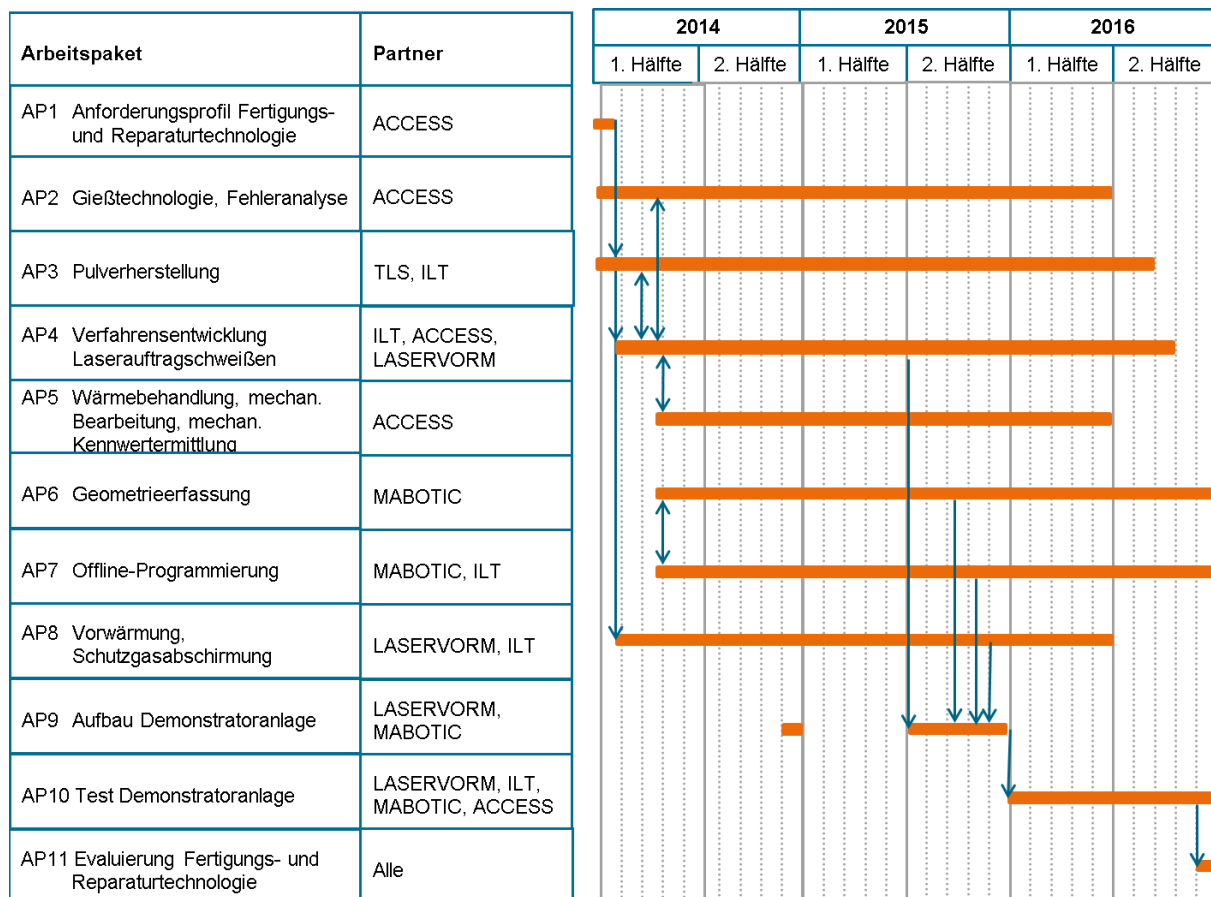


Bild 2: Projektablaufplan REPTIL

Im März 2016 wurde aufgrund von größeren Projektfortschritten als bei Antragsstellung abgeschätzt von Access und ILT ein Aufstockungsantrag zur

zusätzlichen Durchführung von Kriech- und Langzeitermüdungsversuchen gestellt, um eine bessere Bewertung der Technologie für den Einsatz in der Industrie zu ermöglichen. Mit Ausnahme der Kriech- und Langzeitermüdungsversuche selbst (werden im Unterauftrag vergeben) konnten alle Arbeiten von den Projektpartnern in der vorgesehene Laufzeit durchgeführt werden. Der Projektplan änderte sich hierdurch nicht, da es sich um zusätzliche Arbeiten in bestehenden Arbeitspaketen handelte.

Die Meilensteine (Tabelle 3) wurden termingerecht erreicht.

Meilenstein		2014				2015				2016			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
1	Defektfreie Herstellung von Volumina aus TiAl mittels additivem Laserauftragschweißen erreicht						M1						
2	Pulverherstellung hinsichtlich Abbrand und Sauerstoffkontamination angepasst								M2				
5	Demonstratoranlage komplett aufgebaut und bereit für Tests								M3				

Tabelle 3: Meilensteinplan

1.4 Wissenschaftliche und technische Ausgangsbedingungen

Die Entwicklung des Laserauftragschweißens für TiAl stellt aufgrund der großen Reaktivität des Werkstoffes im schmelzflüssigen Zustand mit Sauerstoff sowie der großen Rissneigung, welche hohe Vorheiztemperaturen unabdingbar macht, eine erhebliche Herausforderung dar. Für die Verarbeitung von Titanaluminiden mittels Laserauftragschweißen lagen bei Beantragung des Projektes vereinzelte Untersuchungen an teils experimentellen Legierungen vor, aus denen jedoch noch keine Eignung für Reparaturversuche abgeleitet werden konnte. Die in der Literatur dokumentierten Arbeiten¹ zur generativen

¹ Biamino, S. et al., *Intermetallics*, 2011. 19(6): p. 776;
 Murr, L.E. et al., *Acta Materialia*, 2010. 58(5): p. 1887;
 Vilaro, T. et al., *Advanced Materials Research*, 2010. 89-91: p. 586;
 J. Wilden, J., et al., *Rapid Prototyping gerichtet erstarrter Titanaluminidstrukturen*, in 47. Int. Wiss. Kolloquium. 2002, TU Ilmenau
 Filippini, M. et al., *Procedia Engineering*, 2011. 10(0): p. 3677;
 Cormier, D. et al., *Research Letters in Materials Science*, 2007. Article ID 34737: p. 1;
 D. Srivastava, et al., *Materials and Design*, 2000. 21(4): p. 425

Herstellung von Titanaluminiden mittels Laserauftragschweißen konnten zum Zeitpunkt der Anstragsstellung wie folgt zusammengefasst werden:

- Prinzipiell eignen sich Titanaluminide für die generative Fertigung mittels LA. Volumenkörper mit einer Dichte größer 97 % sind herstellbar.
- Die erzielten Gefügestrukturen sind fein im Vergleich zu Gussstrukturen, im Mikromaßstab jedoch heterogen. Definierte Gefügestandards können erst durch eine anschließende Wärmenachbehandlung eingestellt werden.
- Aufgrund der Sprödigkeit der TiAl-Legierungen ist die Herstellung rissfreier Volumenkörper erst bei Vorwärmtemperaturen oberhalb des Spröd-Duktil-Übergangs ($> 750\text{ °C}$) möglich.

Derzeitige Forschung und Entwicklungen im Bereich additiver Verarbeitung von Titanaluminiden konzentrieren sich hauptsächlich auf die Fertigung vollständiger Turbinenschaufeln und hierbei auf das Verfahren Electron Beam Melting (EBM). Der Einsatz der technischen Legierungen (GE4822, TNM-B1) in aktuellen Triebwerksprogrammen sowie erste Tests mit EBM additiv verarbeiteten Titanaluminiden², welche während der Projektlaufzeit durchgeführt wurden, verdeutlichen zum einen das industrielle Interesse an dieser intermetallischen Werkstoffgruppe sowie zum anderen an deren additiver Verarbeitung und damit der Notwendigkeit eines für möglichst alle Herstellungsrouten geeigneten Reparaturverfahrens.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation des ILT mit Frau Prof. Majumdar vom IIT Kharagpur wurden wissenschaftliche Untersuchungen an laserauftraggeschweißten Proben aus den im Projekt ausgewählten TiAl-Legierungen durchgeführt (Wärmebehandlung, Gefüge, Phasen, Eigenschaften). Die Ergebnisse wurden bisher im Rahmen von Projekttreffen vorgestellt. Frau Prof. Majumdar war seit dem 01.06.2015 für einen halbjährigen Forschungsaufenthalt Gast am ILT.

² Vortrag ICTM2015, Aachen, M. Varetti (Avio Aero): Design and turbine architectures. AM enabling technologies

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse und Bezug zur Zielsetzung

Die folgende Darstellung der durch das ILT erzielten Projektergebnisse richtet sich im Wesentlichen nach dem Projektablaufplan.

2.1.1 Pulverherstellung (AP3)

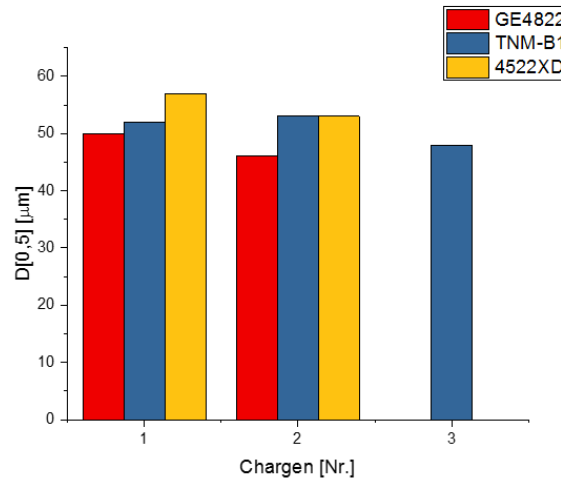
Gemäß dem von Access in AP1 erstellten Anforderungsprofil wurden von den eingangs vorgeschlagenen Legierungen drei als technisch relevant bewertet. Demnach erfolgte durch TLS die Verdüsung von TiAl-Elektroden aus GE4822, TNM-B1 und 4522XD mit dem Ziel, ein Prozessfenster für die Gasverdüsung zu ermitteln, in dem Abbrand von Legierungselementen (insbesondere Al und Mn) vermieden und die Sauerstoffkontamination (= Versprödung) minimiert werden. Weiterhin sollten die Morphologie der Partikel (sphärisch ohne Satelliten) und die Kornfraktion (20-90 μm) für das Laserauftragschweißen angepasst werden bei gleichzeitiger Erhöhung der nutzbaren Ausbeute pro Pulvercharge.

Die Beteiligung des ILT an dieser Aufgabenstellung erfolgt hierbei während des gesamten Projektes in Form der Untersuchung von Pulvern hinsichtlich der Verarbeitbarkeit durch Laserauftragschweißen. Die hierbei berücksichtigten Kriterien sind Partikelgrößenverteilung, Fließ- und Förderfähigkeit und der Gehalt an versprödend wirkendem Sauerstoff (Analyse durch externe Dienstleister).

2.1.1.1 Partikelgrößenverteilung

Die Analyse der Partikelgrößenverteilung erfolgt am ILT mit dem Gerät Morphologi G3 (Malvern Instruments) mit statischer Bildanalyse. Partikelgrößenverteilungen werden jeweils auf den Durchmesser (D) der Partikel bezogen und kann zwischen volumenanteilig (v) und auf die Anzahl der Partikel bezogen (n) unterschieden werden. In Bild 4 sind die jeweilige Kennwerte $D [v, 0.5]$ für die eingesetzten Chargen über die Projektlaufzeit dargestellt. Dieser Messwert gibt an, dass 50% der analysierten Gesamtmenge bzw. aller gemessenen Partikel kleiner sind als der zugehörige Messwert. Hierdurch können Rückschlüsse auf den Feinanteil gezogen werden, der für gute Fließfähigkeiten möglichst klein zu halten ist. Den Untersuchungsergebnissen zufolge besteht kein wesentlicher Unterschied zwischen den Pulverchargen und den unterschiedlichen Legierungen. Die Partikelgrößen liegen einheitlich im Sollbereich bei kleinem Feinanteil.

Bild 4: Kennwerte zur Korngrößenverteilung von GE4822, TNM-B1 und 4522XD-Pulver



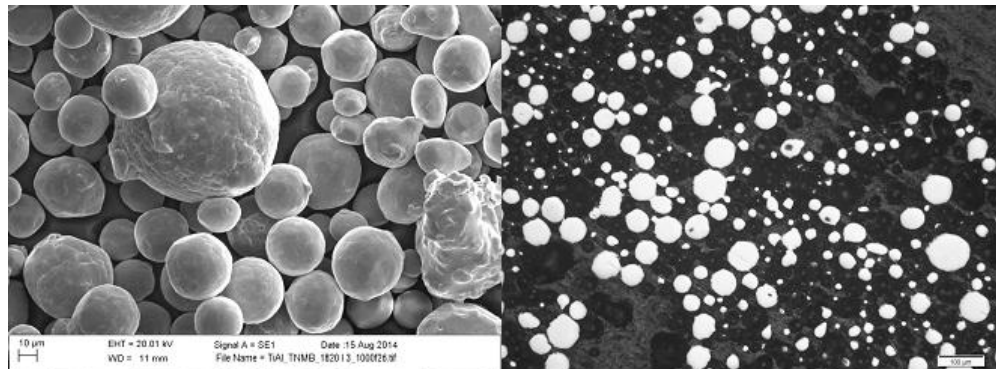
2.1.1.1.2 Agglomerate/Fließfähigkeit

Die Pulver wurden mittels Licht- und RE-Mikroskopie (Bild 5) untersucht. Die Pulverpartikel sind vorwiegend sphärisch mit ebener Oberfläche.

Bild 5: TNM-B1, Charge 1820

links: REM

rechts: LM
(Querschliff)



TLS verwendet einen zusätzlichen Nachbearbeitungsschritt zur Trennung von agglomerierten Pulverpartikeln. Aufgrund dieser Nachbehandlung werden nur wenige Agglomerate des Feinanteils gefunden. Eine für das Laserauftragschweißen geeignete Fließfähigkeit ist bei allen Pulvern gegeben. Hohlpartikel werden mit kleiner Häufigkeit beobachtet. Als Hauptursache für die Porosität in den laserauftraggeschweißten Schichten könne diese damit ausgeschlossen werden.

2.1.1.1.3 Sauerstoffanalyse und Absorptionsverhalten

Zur Prüfung des im Pulver und später laserauftraggeschweißten Material vorliegenden Sauerstoffgehaltes wird chemische Elementanalyse extern beauftragt. Im Laufe des Projektes wird ersichtlich, dass gemessene Ergebnisse

je nach Prüflabor variieren können und Ergebnisse teilweise nicht plausibel sind. Daher wird für spätere Abschätzung jeweils von den gemessenen Höchstwerten ausgegangen. Je nach Ausgangszustand (Elektrode) und Legierung liegen demnach bis zu ca. 700-900 ppm Sauerstoff im Pulver vor. Die Genauigkeit des Messverfahrens Heißgasextraktion beträgt laut Analyselabor +/- 5% des jeweiligen Messwertes. Durch Vergleichsmessungen an Pulver im frisch verdüstem Zustand sowie nach einjähriger Lagerung im verschlossenen Pulverbehälter bei zwischenzeitlicher Öffnung zur Entnahme wird gezeigt, dass während der Lagerung keine messbare Sauerstoffanreicherung stattfindet. Alle Pulver (GE4822, TNM-B1, 4522XD) werden bei Raumtemperatur mittels UV-VIS-Spektroskopie auf das Absorptionsvermögen im Wellenlängenbereich der Laserstrahlung ($\lambda = 1060 \text{ nm}$) untersucht. Die Absorption liegt bei allen Pulvern im Bereich zwischen 72-75%. Das von TLS hergestellte Pulver ist damit insgesamt grundsätzlich für das Laserauftragschweißen geeignet. Insbesondere der Sauerstoffgehalt ist jedoch über die weitere Verarbeitung kritisch nachzuverfolgen. Aufgrund der Ähnlichkeit der Pulver untereinander kann von einer annähernden Übertragbarkeit der zu erarbeitenden Laserauftragschweißparameter ausgegangen werden.

2.1.2 Verfahrensentwicklung Laserauftragschweißen (AP4)

Zielsetzung war die Entwicklung einer Verfahrenstechnik für das generative Laserauftragschweißen zum defektfreien (keine Risse und Poren) Auftragschweißen von TiAl-Werkstoffen auf artgleichem Substrat. Insbesondere für die Vermeidung von Rissen ist nach dem Stand der Technik eine Vorwärmung oberhalb des Spröd-Duktil-Überganges erforderlich ($> 750 \text{ °C}$). Dies hat wiederum Auswirkungen auf die Oxidation der Oberfläche, die Entstehung von Verzug und ggfs. auch auf das Gefüge der gesamten Schaufel.

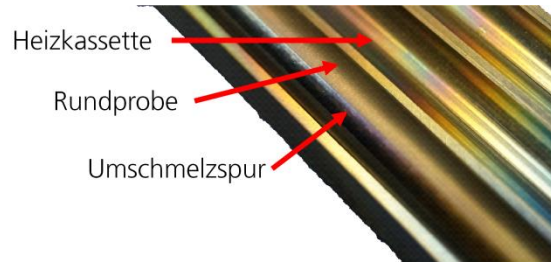
Gemäß der in AP1 (Anforderungsprofil) festgelegten Anforderungen und Vorgehensweise wurde das Laserauftragschweißen beginnend mit Umschmelzversuchen bis hin zur dreidimensionalen Füllung von künstlichen hergestellten Defekten an Dummyblades parallel für die drei TiAl-Legierungen GE4822, TNM-B1 und 4522XD anhand unterschiedlicher Randbedingungen und Geometrien untersucht. Das hierfür am ILT verwendete Setup wird in 2.1.5 ausführlich beschrieben. Alle eingesetzten Substrate der verwendeten Legierungen werden dem ILT von Access zur Verfügung gestellt.

2.1.2.1.1 Umschmelzen und Laserauftragschweißen von ersten Einzelspuren

Zunächst werden Rundproben für Wärmebehandlungsversuche bei Access aus allen drei Legierungen sowie Halterungen zur Vorheizung dieser Rundproben von Access gefertigt. Diese Rundproben werden unter Variation der Laserleistung P_L selektiv umgeschmolzen. So werden erste schnell erstarrte Gefüge erzeugt, die aufgrund ähnlicher Abkühlraten den beim

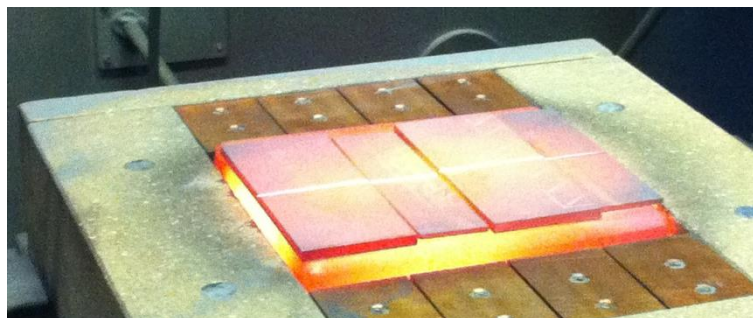
Laserauftragschweißen entstehenden ähneln. Im nächsten Schritt werden einige Rundstäbe mit einer Nut versehen, welche durch Laserauftragschweißen durch Auftragen einer einzelnen Spur gefüllt werden. Testproben werden am ILT metallografisch untersucht und für weitere Analysen an Access übergeben.

Bild 6: Rundprobe
TNM mit
Umschmelzspur



Access erarbeitet ein Modell, mit dem der Verzug simuliert werden kann. Von Seiten des ILT werden dafür simulierte Temperaturfelder mit der während des Laserauftragschweißens entstehenden Temperaturverteilung übergeben. Diese werden von Access in das eigene Modell integriert, um damit Dehnungen zu berechnen und daraus eine Vorhersage über entstehende Verformungen von Bauteilen während des Bearbeitungsprozesses treffen zu können. Nachfolgend werden daher von Access rechteckige Flachproben unterschiedlicher Materialstärken aus allen drei Legierungen gegossen und mit unterschiedlich breiten und tiefen Nuten versehen. Diese Nuten werden durch jeweils artgleiches Laserauftragschweißen aufgefüllt und hinsichtlich Verzug von Access vermessen und untersucht. Für Proben aller drei Legierungen werden aus Gründen der Vergleichbarkeit gleiche Verfahrensparameter verwendet. An GE4822-Flachproben wird außerdem eine Parametervariation durchgeführt (Bild 7), um den Einfluss von Laserleistung (350/650 W) und Vorschub (210/390 mm/min) auf den Verzug experimentell zu untersuchen.

Bild 7: GE4822
Flachproben mit
aufgefüllter Nut,
nach dem Prozess



2.1.2.1.2 Herstellung von Volumenkörpern (Milestone 2)

Erste Vorversuche zum ein- und mehrlagigen Beschichten finden auf Grund des zu Projektstarts noch nicht hergestellten Pulvers der Soll-Legierungen mit Restpulver einer TNM-Legierung (ähnlich zu TNM-B1) statt. Untersucht werden

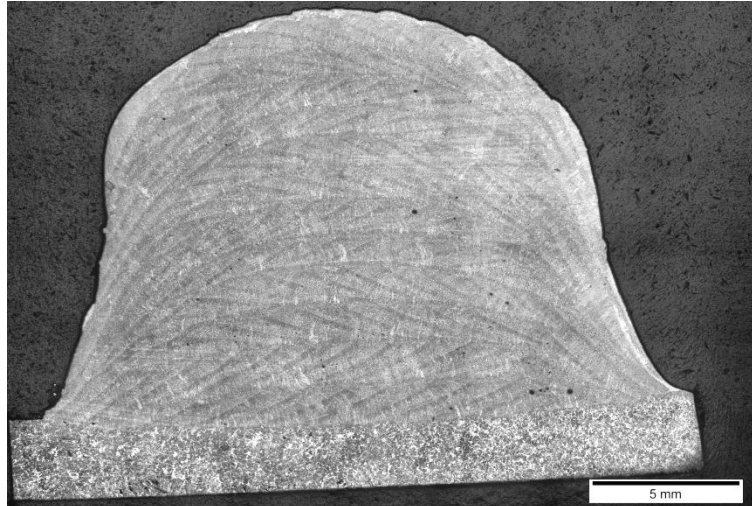
unter Verwendung eines Laserstrahldurchmesser von 2 mm Einflüsse der Prozessparameter Laserleistung, Pulvermassenstrom, Ebenenversatz und Aufbaustrategie. Der Aufbau eines von Anbindungsfehlern und Rissen freien Probekörpers mit minimaler Porosität ($<50\ \mu\text{m}$) der Abmaße $10\times 10\times 5\ \text{mm}$ wird bei einer Vorheiztemperatur von ca. $750\ ^\circ\text{C}$ erreicht (Bild 8). Lichtmikroskopische Untersuchungen lassen zudem keine oxidischen Einschlüsse erkennen.

Bild 8: Querschliff
TiAlNbMoB auf TNM
laserauftrag-
geschweißt



Nach Erhalt erster Pulver von TLS werden unter Verwendung von in Vorversuchen ermittelten Parameter Volumina aus GE4822 laserauftraggeschweißt. So können würfelförmige Proben mit einer Kantenlänge von ca. 10 mm rissfrei (Lichtmikroskopie) aufgebaut werden (Bild 9). Im Gefüge werden hierbei vereinzelte Poren von ca. $150\ \mu\text{m}$ Durchmesser sowie zahlreiche Mikroporen kleiner als $15\ \mu\text{m}$ festgestellt. Anbindungsfehler zwischen Spuren und Lagen werden nicht beobachtet, jedoch eine deutlich sichtbare Verformung des GE4822-Substrates ($d = 2\ \text{mm}$) aufgrund von während des Schweißprozesses entstehenden Zugeigenspannungen.

Bild 9: Querschliff
GE4822 auf
GE4822,
laserauftrag-
geschweißt

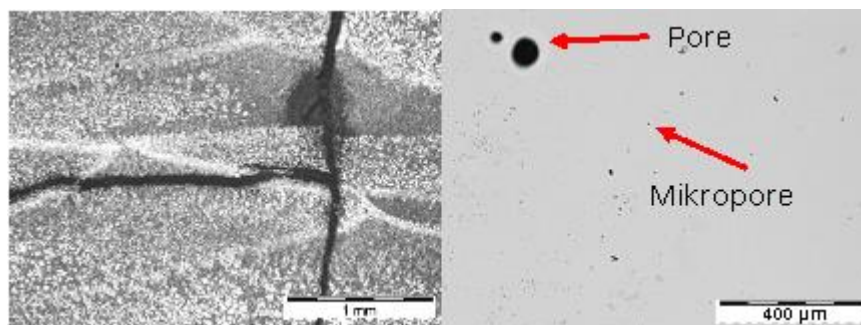


Laserauftragschweißversuche mit 4522XD und TNM-B1 werden unter Verwendung identischer Prozessparameter durchgeführt. Für alle drei Werkstoffe werden zudem Proben ohne Verwendung einer Vorheizung aufgebaut. Alle so erstellten Probekörper wurden hinsichtlich Rissbildung, Porosität, Gefüge und Härte untersucht und verglichen. Hierbei wird gezeigt, dass Würfel mit 10 mm Kantenlänge sowohl aus GE4822 als auch 4522XD mit und ohne Vorheizung (750°C) sowie aus TNM-B1 mit Vorheizung rissfrei aufgebaut werden können. Der rissfreie Aufbau ohne Verwendung von Vorheizung erklärt sich über die im Prozess auftretende in-situ Vorwärmung durch die eingebrachte, durch die geringe Wärmeleitung des Materials jedoch verlangsamt abgeleitete Energie der Laserstrahlung. Vereinzelt treten hierbei Risse im Substrat (Unterseite) auf.

Bild 10: TNM-B1,
laserauftraggeschweißt

links: typischer
Rissverlauf

rechts: Poren



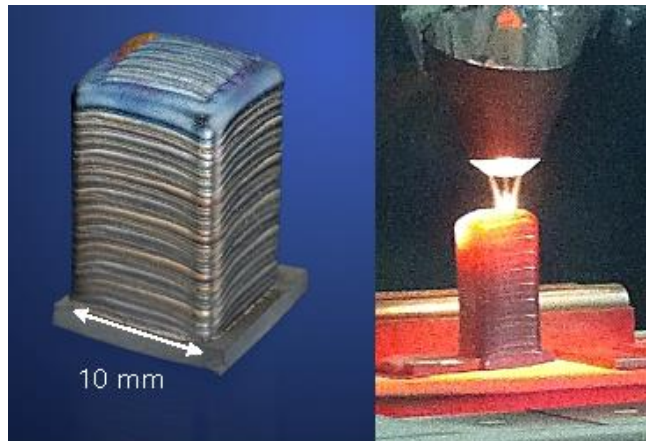
Die abfallenden Kanten der würfelförmigen Probekörper bei der verwendeten Aufbaustrategie sind für den Aufbau von Proben mit größerer Höhe hinderlich. Daher wurde eine Anpassung der Aufbaustrategie in Form einer zusätzlichen Konturfahrt durchgeführt. Hierdurch wird der Aufbau von bis zu ca. 60 mm

hohen Quadern ermöglicht Der Einfluss der mit steigender Bauteilhöhe verringerten lokalen Vorheizung auf Rissneigung, Porosität, Gefüge soll an Bauteilen dieser Art (Bild 11) untersucht werden.

Bild 11: GE4822 auf GE4822,

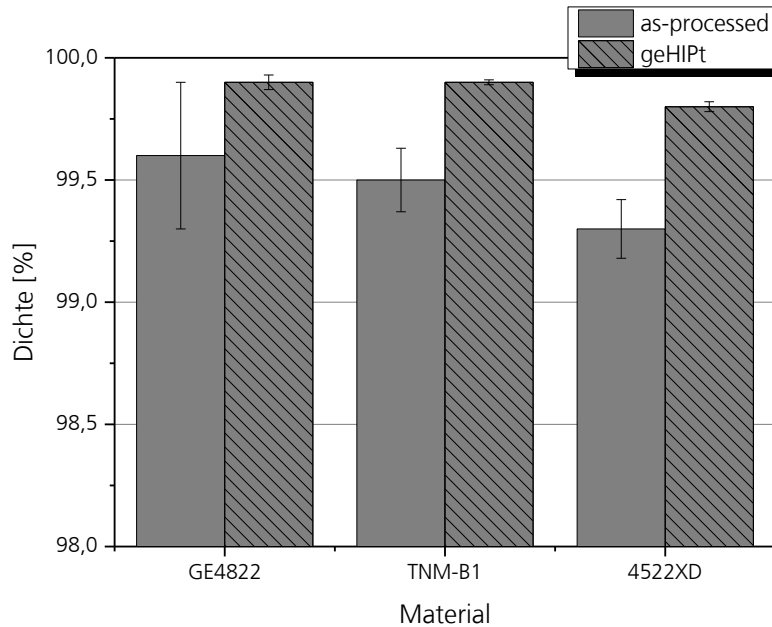
links: laserauftraggeschweißter Probekörper, ca. 25 mm Bauhöhe

rechts: Aufnahme des LA-Prozesses



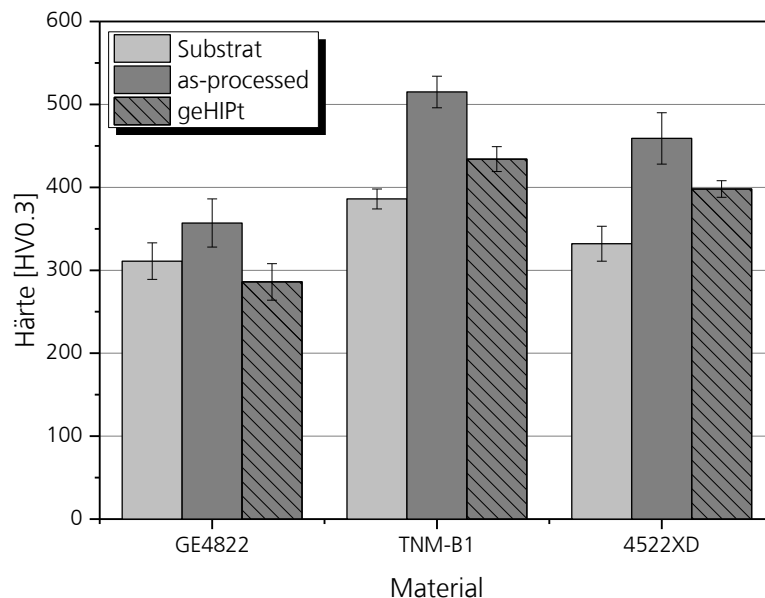
Auf den Ergebnissen basierend werden Proben mit angepasster Konturfahrt auf Substrat von $d=4$ mm Dicke aufgebaut. Der Verzug des Substrates wird durch die größere Dicke (zuvor 2 mm) verkleinert. Hergestellte Probekörper werden teilweise an Access übergeben und einer HIP-Wärmebehandlung unterzogen und Gefüge und Mikrostruktur eingehend analysiert. Die Dichte wird jeweils vergleichend an Querschliffen von Hälften derselben Proben mit und ohne HIP-Nachbehandlung gemessen. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung der Standardmessabweichung eine Vergrößerung der Dichte von bis zu 0,5% durch HIPen (Bild 12).

Bild 12: Dichte von GE4822, TNM-B1 und 4522XD, laserauftragsgeschweißt mit und ohne HIP-Wärmenachbehandlung



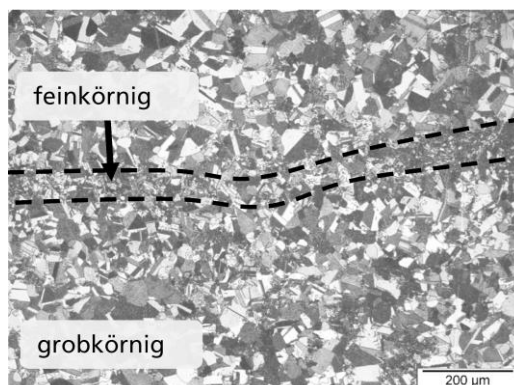
Die Größe der Poren wird von teilweise bis zu 150 μm auf maximal 30 μm Durchmesser durch das HIPen verkleinert. Mikroporen werden in den Proben aus GE4822 und TNM-B1 durch die HIP-Nachbehandlung fast vollständig geschlossen und sind in Querschliffen nur noch vereinzelt messbar. Die Mikrohärtigkeit aller Materialien wird durch die HIP-Nachbehandlung verkleinert (Bild 13). Mit Ausnahme von GE4822 liegt die Härte aber noch über der des jeweiligen ebenfalls geHIPten Substratmaterials (Gussprobe).

Bild 13: Härte von GE4822, TNM-B1 und 4522XD, laserauftragsgeschweißt mit und ohne HIP-Wärmenachbehandlung sowie im Vergleich zu Gussmaterial (geHIPt)



Die innerhalb der Schweißspuren inhomogenen Korngrößen sind auch nach der HIP-Behandlung bei allen Materialien noch erkennbar (Bild 14). Auch bleibt die im Vergleich zum Gussmaterial feinkörnige Struktur bestehen, wenngleich erkennbar Umwandlungen stattgefunden haben.

Bild 14: GE4822, laserauftragsgeschweißt nach HIP-Wärmenachbehandlung, geätzt, LM-Aufnahme



Zu berücksichtigen ist, dass die HIP-Behandlung zu diesem Zeitpunkt noch nicht an den jeweiligen Werkstoff angepasst durchgeführt wird. Die Notwendigkeit einer angepassten Wärmebehandlung wird aus den dargestellten Ergebnissen offensichtlich.

Von Mabotic (vgl. auch 2.1.4) wird ein Programm zum Aufbau zylindrischer Proben entwickelt. Zylindrische Proben sind mittels CT mit größerer

Genauigkeit analysierbar und der Nacharbeitsaufwand bei der Herstellung von Proben für Wärmebehandlungsversuche im Bridgman-Ofen (Access) aus aufgebauten Rundstäben ist gegenüber der Verwendung von Probekörpern mit rechteckiger Grundfläche deutlich reduziert. Unter Verwendung dieses Programms werden zylindrische Probekörper zur Untersuchung der Beeinflussung der Mikroporosität durch unterschiedliche Verfahrensparameter hergestellt. Die Porosität wird mittels CT (Access, Bild 15) sowie nach dem archimedischen Prinzip und anhand von Querschliffen gemessen.

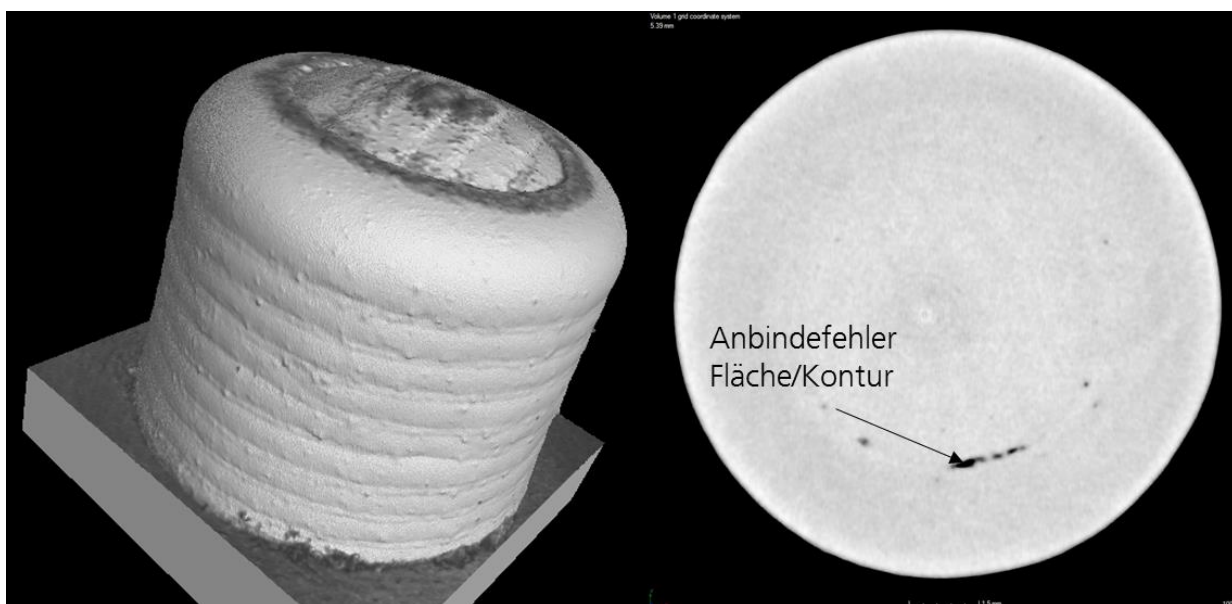


Bild 15: CT-Aufnahme eines zylindrischen Probekörpers, links: Gesamtansicht, rechts: Darstellung einer Schnittebene

Als Haupteinflussfaktor wird unabhängig vom Messverfahren die verwendete Laserleistung festgestellt mit einer schwachen Tendenz zur Vergrößerung der Porenanzahl, nicht jedoch der Porengröße, mit Vergrößerung der Laserleistung. Variationen von Vorschubgeschwindigkeit, Pulvermassenstrom und Schutzgasvolumenstrom führen zu keinen signifikanten Änderungen.

Bei Untersuchung der zylindrischen Probekörper mittels CT (Access) fallen zusätzlich Änderungen in der Probengeometrie sowie unterschiedlich stark ausgeprägte Bindefehler zwischen Kontur- und Flächenbeschichtung auf. Als Folge dessen werden weitere Probekörper mit veränderten Konturabständen, Belichtungsstrategien (Reihenfolge Kontur/Fläche) und Laserleistungen zur Minimierung der Bindefehler hergestellt und von Access untersucht, da diese für spätere Zugversuche einen Schwachstelle darstellen können. Die Gesamtdichte der zum Abschluss der Untersuchung hergestellten Proben liegt

mit > 99,5% oberhalb des gesetzten Zielwertes. Die Größe verbliebener Defekte wird als unkritisch bewertet, da diese durch die nachfolgende HIP-Behandlung vollständig geschlossen werden. Im Anschluss werden Rundstäbe zur Demonstration der Machbarkeit sowie für Wärmebehandlungsversuche mit 63 mm Bauhöhe und 10 mm Durchmesser mit einer Prozesszeit von ca. 20 min/Probe aufgebaut (Bild 16).

Bild 16: GE4822, laserauftraggeschweißt, 750°C Vorheizung, Bauhöhe 63mm



Der Meilenstein „Defektfreie Herstellung von Volumina aus TiAl mittels additivem Laserauftragschweißen“ wird damit wie geplant erreicht.

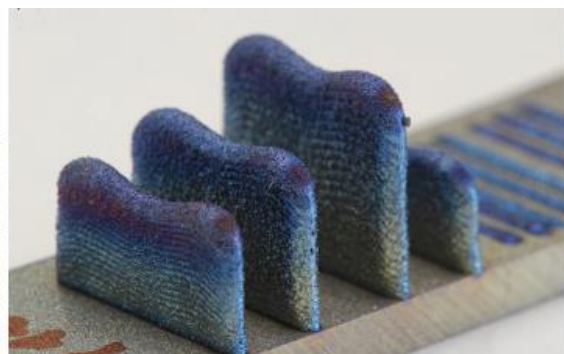
2.1.2.1.3 Aufbau dünnwandiger Strukturen

Hinsichtlich zu bearbeitender dünnwandiger Bauteilbereiche < 1 mm (Schaufelkante) bei möglichst endkonturnahem Schichtauftrag wird im nächsten Schritt der verwendete Laserstrahldurchmesser auf 0,6 mm verkleinert. Zunächst werden Einzelspuren aus GE4822 auf GE4822 geschweißt, um Einflüsse der Verfahrensparameter Laserleistung, Pulvermassenstrom, Vorschubgeschwindigkeit und Vorheiztemperaturen auf die relevanten Größen Aufmischungsgrad und Spurbreite zu untersuchen. Erste Stege werden ebenfalls aufgebaut, jedoch im Gegensatz zu quaderförmigen und zylindrischen Volumenkörpern trotz Vorheizung noch nicht rissfrei.

Bild 17: GE4822 auf GE4822,

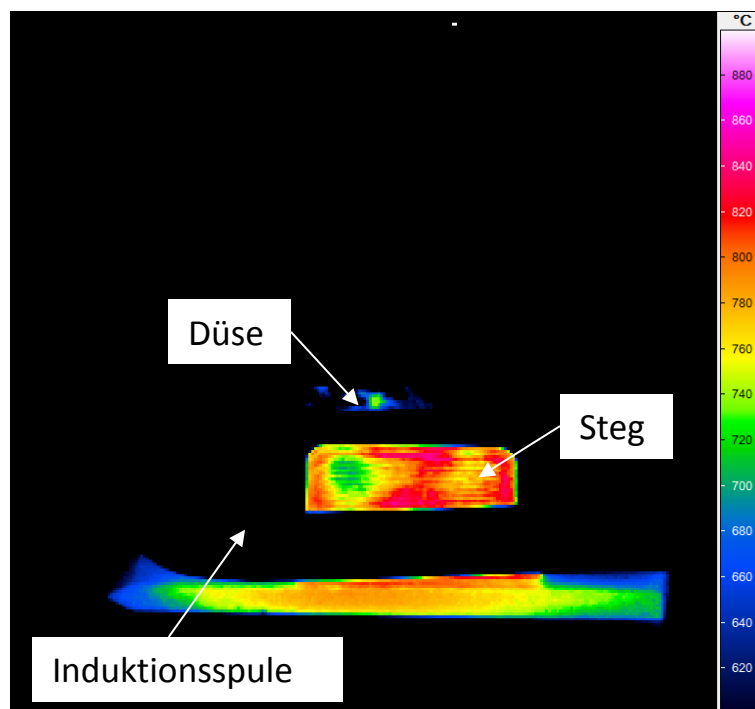
links: Einzelspur im Querschliff,

rechts: Stege (Breite ca. 0,6 mm)



Durch Anpassung der Verfahrensparameter Laserleistung, Pulvermassenstrom, Vorschubgeschwindigkeit und Ebenenversatz wird der Aufbau rissfreier Stege mit einem 0,6 mm-Laserspotdurchmesser (entspricht der Stegbreite) aus GE4822 bis zu einer Bauhöhe von 10 mm ermöglicht. Die hierfür verwendete Vorheizung über eine Heizplatte von 750°C Substrattemperatur ist nicht ausreichend für den Aufbau rissfreier Stege größerer Höhe oder aus dem stärker zur Rissbildung neigendem TNM-B1 Material. Grund hierfür ist, dass die im Vergleich zum Aufbau massiver Bauteile eingebrachte Prozesswärme je Schicht den Wärmeverlust durch Abstrahlung an die Umgebung (große Oberfläche des Steges im Verhältnis zum Volumen) nicht mehr kompensieren kann. Dadurch ist die Temperatur in der Bearbeitungsebene bereits nach wenigen Lagen unterhalb der kritischen Temperatur für einen rissfreien Aufbau. Durch Erweiterung des Versuchsaufbaus um die Möglichkeit zur induktiven Vorheizung (vgl. 2.1.5) kann die lokale Vorheiztemperatur von Bauteilen auf 700°C und größer in der Bearbeitungsebene gehalten werden (Bild 18). In Versuchen kann gezeigt werden, dass dies für einen rissfreien Stegaufbau aus allen drei untersuchten Legierungen ausreichend ist.

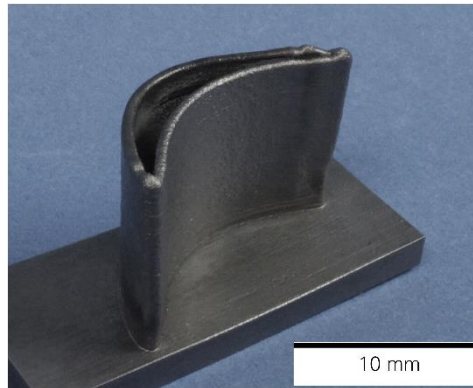
Bild 18: GE4822 im LA-Prozess, Geometrie Steg, 0,6mm Wandstärke, ca. 20mm Breite



Anhand von Thermografie wird die kühlende Wirkung des Schutzgasstromes sichtbar. Temperaturdifferenzen von über 100°C zwischen Bearbeitungsbereich und vorgeheiztem Bauteil werden je nach Wandstärke des Bauteils gemessen, sodass für ein sicheres Halten der Temperatur oberhalb des Spröd-Duktil-Überganges diese Differenz im weiteren Projektverlauf mit berücksichtigt wird.

Durch die in 2.1.5 beschriebenen Umbaumaßnahmen wird der Aufbau dünnwandiger (1 mm) Demonstratoren in Form von Turbinenschaufelkonturen möglich (Bild 19).

Bild 19:
Turbinenschaufelkontur aus GE4822, laserauftraggeschweißt, Wandstärke 1 mm

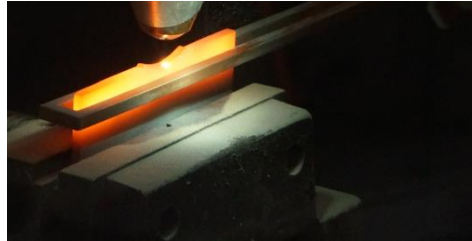


In den nächsten Schritten wird als Vorstufe für das Auffüllen von Kaltläufen ein- und mehrspuriges Laserauftragschweißen auf Substratkanten untersucht. Unter Berücksichtigung einer angenommenen maximalen Defekttiefe von 10 mm wird der rissfreie von Aufbau von Stegen von 0,6 mm (minimaler Laserstrahldurchmesser) bis 4 mm (maximale Bladedicke) Breite über eine beliebige Länge bis 60 mm und eine Aufbauhöhe von ≥ 10 mm erarbeitet, vgl. hierzu auch 2.1.2.

2.1.2.1.4 Auffüllen künstlicher Defekte

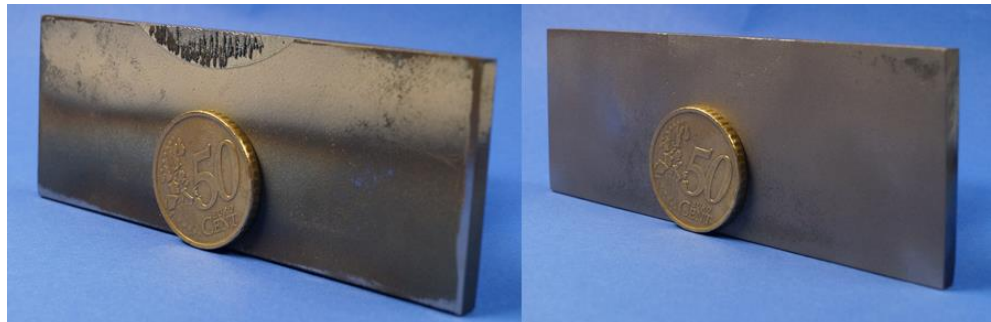
Erste Reparaturversuche werden an künstlichen Kaltläufen aus TNM-B1 und GE4822 durchgeführt (Bild 20).

Bild 20: Prozess-
aufnahme
Reparaturversuch an
künstlichem Kaltlauf
(GE4822)



Durch Wahl einer geeigneten Strategie kann der Auftrag ohne Rissbildung in Bauteil oder Beschichtung erzielt werden. Basierend auf den Versuchsergebnissen wird ausgearbeitet, welche Variablen für die Bearbeitung von weiteren Kaltläufen notwendig sind. Dieser Input wird von Mabotic in einem weiteren Softwaretool umgesetzt, welches für die Bearbeitung aller weiteren Kaltläufe eingesetzt wird (vgl. 2.1.4). Künstliche Kaltläufe können hiermit an Platten der Stärke 4 mm aufgefüllt werden und sind nach oberflächlicher Nachbearbeitung (schleifen) nicht mehr als Defekte erkennbar (Bild 21).

Bild 21: Reparierter
künstlicher Kaltlauf
an einer
Substratplatte vor
(links) und nach
(rechts) Abschleifen
von
Pulveranhaftungen



Auf Anpassung des laserauftraggeschweißten Gefüges an das des Substratmaterials wird in 2.1.3 eingegangen.

2.1.2.1.5 Demonstration an Dummyblades

Die Bearbeitung von künstlichen Kaltläufen an Dummyblades gestaltet sich hinsichtlich der besonderen Anforderungen an die Spulengeometrie zur induktiven Erwärmung des Bauteils als herausfordernd (vgl. auch 2.1.5). Die Vorgehensweise lässt sich jedoch von vorangegangenen Versuchen übertragen, sodass die Reparatur eines kleinen Kaltlaufes exemplarisch gezeigt werden kann (Bild 22).



Bild 22: Kleiner künstlicher Kaltlauf an einer Dummyschaufel im Ausgangszustand (links), nach dem Reparaturschweißen (mitte) und nach Abschleifen überstehenden Materials (rechts). Verfärbungen der Blade sind auf Erwärmungsversuche mit unterschiedlichen Induktionsspulen zurückzuführen.

Die hinreichende Erwärmung von Schaufelkanten ≤ 1 mm Wandstärke gelingt aufgrund der technischen Grenzen des verwendeten Generators nicht, sodass eine rissfreie Reparatur größerer Defekte nicht möglich ist.

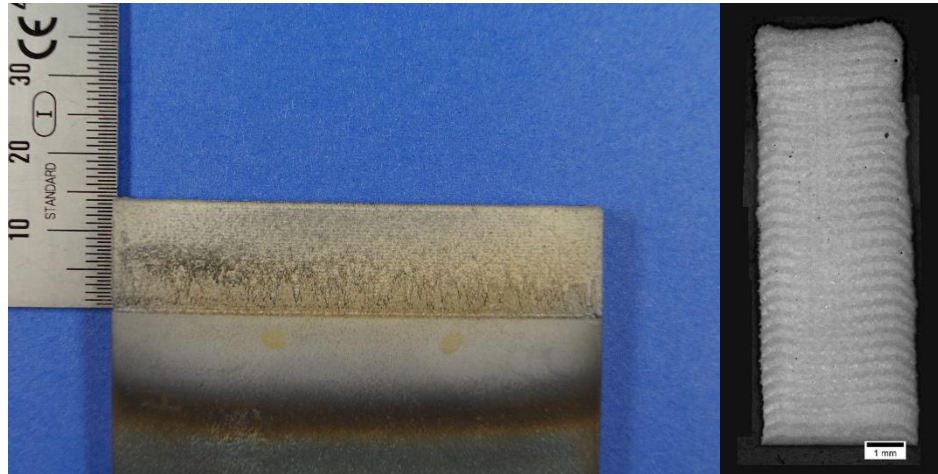
2.1.3 Wärmebehandlung, mechanische Nacharbeit, mechanische Kennwertermittlung (AP5)

In der ursprünglichen Planung des Vorhabens war über Probenfertigung hinausgehend keine wesentliche Beteiligung des ILT an AP5 vorgesehen. Durch Erweiterung des Projektumfangs durch die Aufstockung 2016 wurde die Zielsetzung entsprechend um die Erarbeitung entsprechender Aufbaustrategien für weitere erforderliche Probengeometrien erweitert.

2.1.3.1.1 Wärmebehandlung

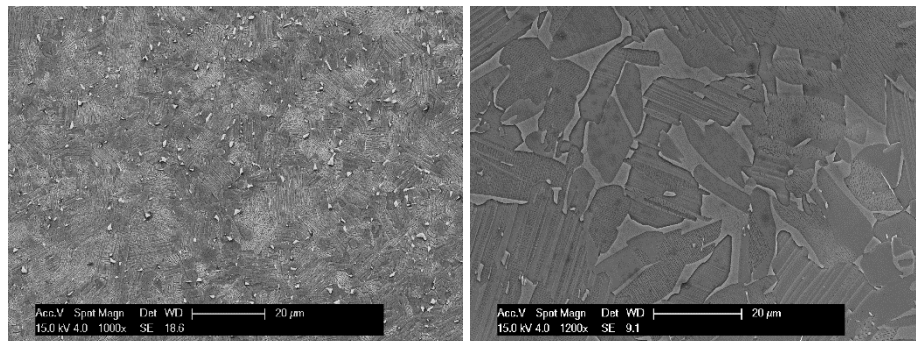
Die Wärmebehandlung der Legierungen GE4822 und 4522XD wird von Access unter Einsatz eines Bridgeman-Ofens an laserauftraggeschweißtem Material untersucht. In Hinblick auf die Reparatur von dünnwandigen Bauteilbereichen werden die Untersuchungen mit dem am ILT kleinstmöglichen realisierbaren Strahldurchmesser von 0,6 mm intensiviert und zusätzlich unterschiedliche nachträgliche Wärmebehandlungen getestet. Hierzu werden zunächst 60 mm lange und 4 mm breite Stege aus der risskritischsten der drei Legierungen TNM-B1 unter Verwendung induktiver Vorheizung aufgebaut. Eine Bauhöhe bis 14 mm bei einer Stegbreite von 4 mm ist möglich (Bild 23). Größere Aufbauhöhen werden nicht getestet, da diese Höhe für die Reparaturanwendung ausreicht (vgl. 2.1.2). Das so hergestellte Probenmaterial ist rissfrei mit vereinzelt Poren $< 100 \mu\text{m}$.

Bild 23: Steg (TNM-B1) nach LA-Prozess (links) und im geätzten Längsschliff (rechts)



Das Gefüge besteht aus lamellaren $\alpha_2+\gamma$ -Kolonien mit fein verteilten γ - und β_0 -Körnern an den Koloniegrenzen (Bild 24) und ist damit typisch für TNM-B1.

Bild 24: REM-Aufnahmen eines Steges (TNM-B1) nach dem LA (links) und artgleichen Gussmaterials (rechts)



Im Vergleich zum artgleichen Gussmaterial sind die Gefügebestandteile ca. fünfmal kleiner. Daher können Unterschiede in der Phasenumwandlung bei nachfolgender Wärmebehandlung erwartet werden.

Die auf oben beschriebene Weise hergestellte Stege werden in gleichgroße Proben zerteilt und unterschiedlichen Wärmebehandlungen unterzogen mit dem Ziel, eine dem Gussgefüge ähnliche Phasenverteilung und Korngröße zu erreichen. Äquivalente Gussproben werden jeweils mitbehandelt. Die Ausgangswärmebehandlung orientiert sich an der für Gusslegierung. Variiert werden Abkühlgeschwindigkeiten sowie Temperaturen und Haltezeiten einer zweistufigen Wärmebehandlung. Untersucht werden Temperaturen sowohl unter- als auch oberhalb der α -Transustemperatur. Hierbei kann festgestellt werden, dass insbesondere durch die Wärmebehandlungstemperatur sowie die Wahl der Abkühlung während bzw. nach der ersten Stufe das resultierende Gefüge beeinflusst wird. Eine Annäherung, jedoch nicht vollständige

Angleichung der Gefüge hinsichtlich der $\alpha_2+\gamma$ -Koloniegröße und Phasenverteilung wird erreicht. Ausgewählte Proben werden zur Phasenanalyse mittels EBSD an Access übergeben. Detaillierte Ergebnisse dieser Untersuchung werden derzeit zur Veröffentlichung aufbereitet.

2.1.3.1.2 Herstellung von Prüfkörpern (Aufstockung)

Die Fortschritte im Projekt zeigen, dass der Aufbau defektfreier Volumina gelingt und durch eine HIP- und Wärmebehandlung geeignete Gefüge eingestellt werden können. Entscheidend für die Bewertung der Technologie sind auch die erreichbaren mechanischen Eigenschaften. Im Projekt zum Zeitpunkt der Antragsstellung vorgesehen waren Härtemessungen und Zugversuche bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Einsatzfähigkeit wird jedoch auch über die Langzeitbeständigkeit des Materials unter mechanischer Belastung bei Betriebstemperatur bestimmt. Bei der Beantragung des Projektes war die Durchführung von Kriech- und Langzeitermüdungsversuchen nicht vorgesehen, da insbesondere Aspekte der Verfahrenstechnik im Vordergrund standen. Mit dem guten Projektfortschritt war das Konsortium der Ansicht, dass Kriech- und Langzeitermüdungsversuche sinnvoll und notwendig sind, um eine bessere Bewertung der Technologie für den Einsatz in der Industrie zu ermöglichen. Die Herstellung von entsprechendem laserauftraggeschweißtem Probematerial wurde damit im Rahmen der bewilligten Aufstockungen als zusätzlicher Arbeitspunkt des ILT durchgeführt. Ausgewählt hierfür wurde die Legierung TNM-B1. Entsprechend der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise wird laserauftraggeschweißtes Material auf Guss-Substrate aufgebracht, sodass ergänzend zu Gussflachproben (Access) mechanische Kennwerte auch sowohl an vollständig laserauftraggeschweißtem als auch teils aus Guss-, teils aus laserauftraggeschweißtem Material (Reparaturfall) bestehenden Proben geprüft werden können.

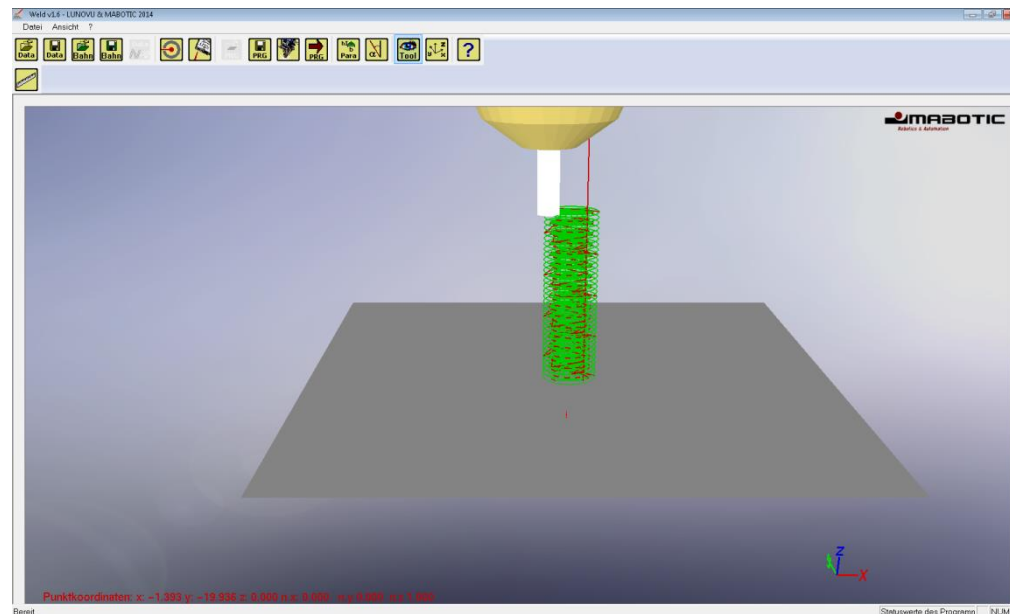
2.1.4 Offlineprogrammierung (AP7)

Die Bahnprogrammierung sollte federführend bei MABOTIC erfolgen. Das ILT sollte hierzu die Basisdaten für die Aufbaustrategie (AP 4) liefern. Diese wiederum sollten bei MABOTIC in Module zur Bahngenerierung umgesetzt werden.

Von Mabotic wurde auf Grundlage erster Prozessdaten ein Softwaremodul zur Fertigung von Rundstäben unter variabler Einstellung aller Verfahrensparameter sowie Bauhöhe, Probendurchmesser und Wahlmöglichkeiten bezüglich Anzahl und Reihenfolge der Konturfahrten programmiert und bereitgestellt. Die mit der Software erstellten Programme lassen sich mit geringfügigen Anpassungen direkt auf die ILT-Anlage übertragen (vgl. Ergebnis Kap. 1.5). In Bild 25 ist die Bedienoberfläche dargestellt. Die Software ermöglicht die Simulation des

Schweißprozesses mit einem Modell der Düse, sodass mögliche Bauteilkollisionen oder Fehler vorab erkennbar sind.

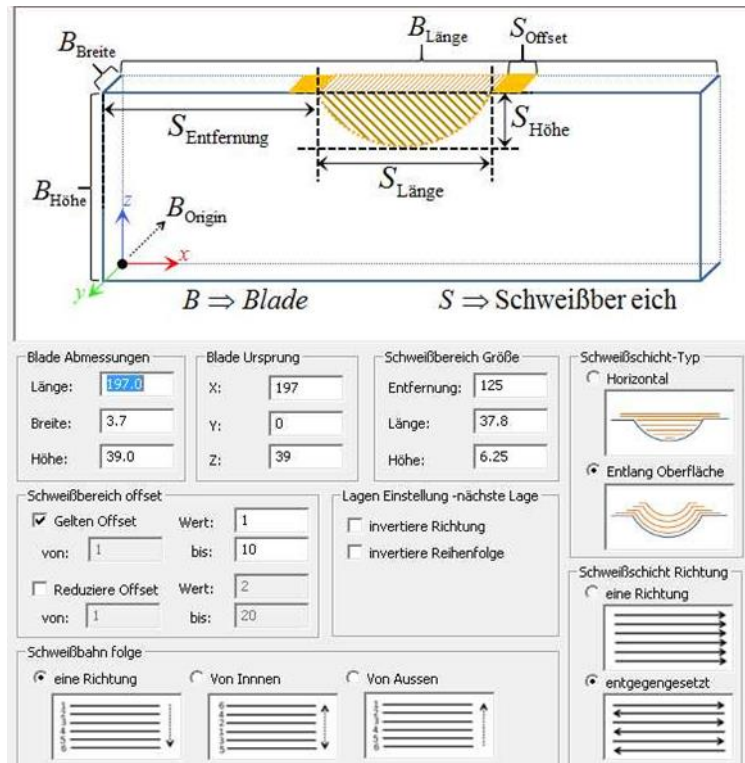
Bild 25:
Benutzeroberfläche
des MABOTIC-
Softwaremoduls
zum LA von
Rundstäben



Dies stellt ein erstes Offline-Programmierbeispiel dar und wird für die Herstellung von Probekörpern verwendet.

In ähnlicher Weise erfolgt die Programmierung für die Vorbereitung von Schweißbahnen für die Reparatur von unterschiedlichen Bauteilbereichen. Auf Grundlage des Inputs aus Laserauftragschweißversuchen wird von Mabotic ein weiteres Modul entworfen, mit welchem unter Wahl von Defektgröße, Strategie, gewünschtem Übermaß und Verfahrensparametern Schweißbahnen für das Auffüllen von kaltlaufähnlichen Defekten erzeugt werden (Bild 26).

Bild 26:
Auszugsweise
Darstellung der
Benutzeroberfläche
des MABOTIC-
Softwaremoduls zum
LA von Kaltläufen



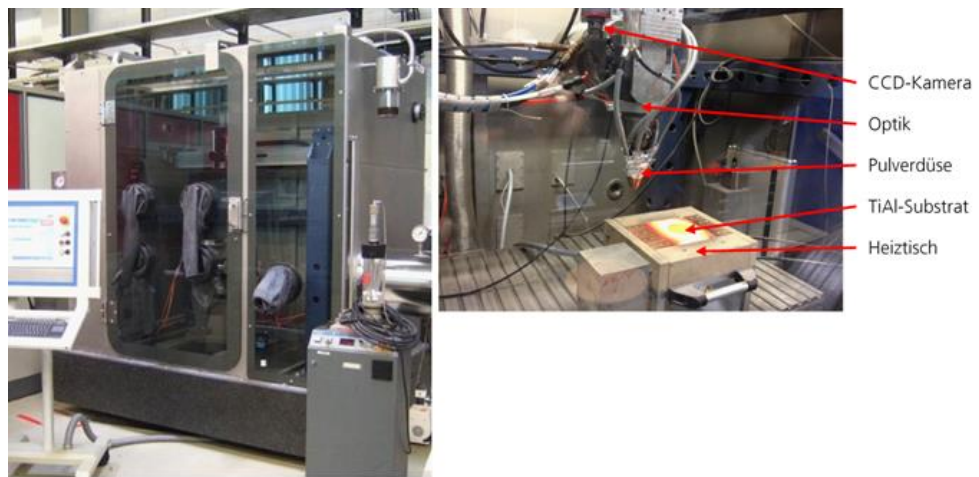
Auch dieses Tool wird am ILT getestet und für Versuche an künstlichen Kaltläufen verwendet sowie in erweiterter Form für die Demonstration an der Versuchsanlage bei Laservorm eingesetzt. Im Unterschied zu der am ILT verwendeten Variante werden hierbei die Defektdaten nicht manuell eingegeben, sondern direkt aus den Scan-Daten der zu reparierenden Schaufelgeometrie gewonnen.

2.1.5 Vorwärmung, Schutzgasabschirmung (AP4/8)

Grundlegende Arbeiten zur Vorwärmung und zur Schutzgasabschirmung sollten am ILT durchgeführt werden. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse sollten als Eingangsparameter für die Entwicklung der Anlagentechnik bei Laservorm dienen. Die Vorwärmung sollte entweder lokal für den zu schweißenden Bereich, oder global für die gesamte Schaufel (evtl. unter Einstellung von Temperaturgradienten) durch Induktion realisiert werden. Die Schutzgasabschirmung sollte so gestaltet werden, dass auf eine komplette Einhausung des Roboters verzichtet werden kann. Die Untersuchungen am ILT dienen in diesem Zusammenhang zur Herstellung einer „Best-Case“-Referenz durch Durchführung der Versuche unter vollständiger Argonatmosphäre innerhalb einer Schutzgaskammer.

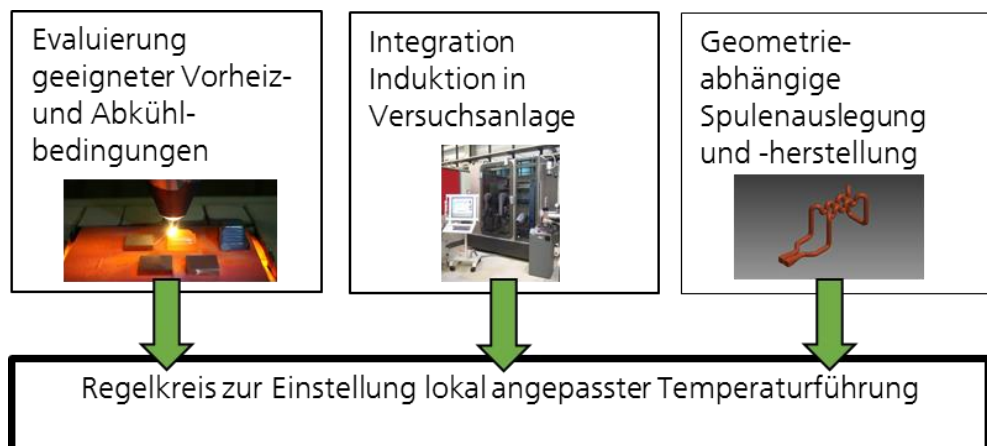
Die hierfür zur Verfügung stehende Versuchsanlage „Glovebox“ (Bild 27, links) ist ausgestattet mit einem 3kW Nd:YAG-Laser. Standardmäßig kann eine Argonatmosphäre <50 ppm O_2 eingestellt werden. Im Laufe des Projektes wurden Verbesserungen der Abdichtung durchgeführt, sodass der Sauerstoffgehalt der Argonatmosphäre auf <10 ppm O_2 verkleinert werden konnte.

Bild 27:
Schutzgaskammer
Glovebox (links),
Versuchsaufbau
innerhalb der
Schutzgaskammer
(rechts)



Ausgehend vom zu Projektbeginn vorhandenen Setup innerhalb der Versuchsanlage und Kenntnis über die Lage des Spröd-Duktil-Überganges von TiAl bei $\geq 700^\circ C$ werden die in Bild 28 dargestellten, parallel bearbeitbaren Arbeitspunkte identifiziert.

Bild 28:
Schematische
Darstellung der
Arbeitspunkte für
lokal angepasste
Vorheizung am ILT



Ziel dieses Vorgehens ist zunächst die Ermittlung der Prozessgrenzen hinsichtlich für die Herstellung defektfreier Materials durch LA benötigter Vorheiztemperaturen, Aufheiz- und Abkühlraten sowie des Einflusses dieser Parameter auf die Homogenität des resultierenden Gefüges. Die Erkenntnisse hieraus sollen genutzt werden, den Reparaturprozess an einem

schaufelähnlichen Bauteil zu demonstrieren und repräsentative Prüfkörper herzustellen.

Zu Beginn der Projektlaufzeit liegt als erste Wärmequelle zur Vorheizung ein am ILT konstruierter Heiztisch vor (Bild 27, rechts), mit dem maximal Vorheiztemperaturen im Bereich 750 -900 °C erreicht werden können. Die Anpassung des Heiztisches an die besonderen Bedingungen Schutzgasatmosphäre und Pulver erweist sich als herausfordernd. In der Weiterentwicklung werden sowohl elektrische als auch konstruktive Änderungen vorgenommen, sodass Ausfälle der keramischen Heizelemente vermindert werden können. Mittels Thermokamera, Pyrometer und Thermoelementen wurden Messungen an unterschiedlichen Bauteilgeometrien und -oberflächen durchgeführt, um möglichst genaue Kenntnis über die jeweils erreichbaren Temperaturen zu gewinnen. Die Vorheizung von TiAl-Proben liegt mit Heiztisch in den unteren Schweißlagen bei ca. 750-800°C. Abhängig von der Probengeometrie wird die Temperatur der darüber liegenden Bearbeitungsebenen mit Fortschreiten des Prozesses mit zunehmender Bauhöhe kleiner (Stege), oder das gesamte Bauteil erwärmt sich durch die eingebrachte Laserstrahlenergie auf größere Temperaturen (Würfel). In beiden Fällen ist nach Beenden des Prozesses ein großer Temperaturgradient in Aufbaurichtung thermografisch messbar.

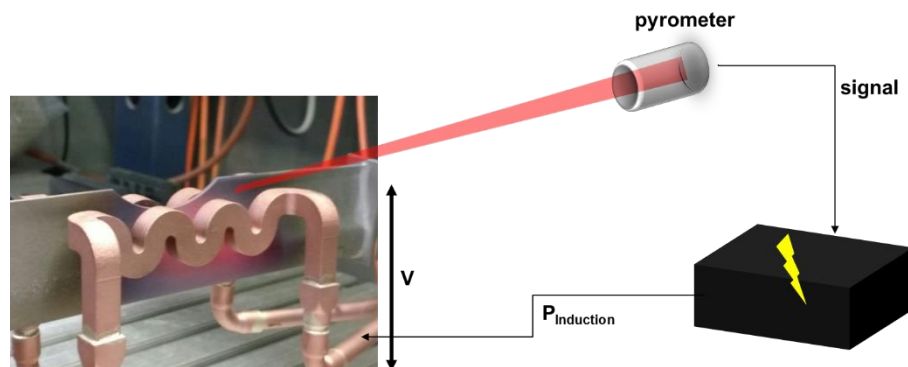
Erste Tests zur induktiven Erwärmung werden mit einer vorhandenen Spule und TiAl-Flachmaterial durchgeführt. Bei der Verwendung induktiver Vorheizung ist für eine gleichmäßige Erwärmung ein gleichmäßiger und möglichst kleiner Abstand der Induktionsspule zum Bauteil notwendig. Aufgrund des zu großen Probenabstandes ist die erreichbare Vorheiztemperatur mit ca. 400°C zu klein, sodass je nach Geometrie (Zugprobe, künstlicher Kaltlauf, Dummyblade, Blade) und Zielwandstärke angepasste Spulen hergestellt werden müssen. Diese werden nach Sammlung erster Erfahrungen mit handgebogenen Kupferrohren als CAD-Modell entworfen und je nach Komplexität durch Verbindungsloten oder per SLM aus CuCr1,0Zr0,1 am ILT hergestellt (Bild 29). Durch induktives Erwärmen können so Geometrien mit einer minimalen Wandstärke von 2 mm in allen Bearbeitungsebenen bis zu einer Bauhöhe von ca. 10 mm auf eine gleichbleibende Temperatur je nach Einstellung des Generators und Geometrie zwischen 700 und 1300°C erwärmt werden.

Bild 29: links: durch Verbindungslöten hergestellte Kupferinduktionsspulen für kleine künstliche Kaltläufe Breite/Durchmesser Kupferrohr: 8 mm rechts: SLM-Induktionsspulen aus CuCr0,1Zr0,1, abgetrennt und wärmebehandelt



Ein wesentlicher Arbeitspunkt ist die Integration des Aufbaus in die Schutzgaskammer sowie die Implementierung eines Regelkreises zum Ausgleich des je nach dominierendem Effekt Wärmeverlusts durch steigende Aufbauhöhe oder Wärmestau durch in-situ Vorwärmung durch den Laserauftragschweißprozess. Zu diesem Zweck wird eine zusätzliche Achse zur flexiblen vertikalen Führung der Induktionsspulen während des Prozesses in die Versuchsanlage eingebaut. Der Induktionsgenerator kann mit einem Pyrometer in einem Regelkreis verbunden werden, sodass zum einen eine gleichbleibende Temperatur in der Bearbeitungsebene und zum anderen kontrollierte Abkühlung von bearbeiteten Bauteilbereichen über das jeweils gemessene Temperatursignal eingesetzt werden kann (Bild 30).

Bild 30: Schematische Darstellung des Induktionsaufbaus innerhalb der „Glovebox“ (GAT2017)



Die Anforderung einer gleichmäßigen Erwärmung des als maximale Defektgröße geltenden Bereich von ca. 60(L)x4(B)x10(H) mm³ kann so erfüllt werden. Die hinreichende Erwärmung von Schaufelkanten ≤ 1 mm Wandstärke gelingt aufgrund technischer Grenzen des verwendeten Equipments im Rahmen des Projektes nicht.

2.1.6 Evaluierung Fertigungs- und Reparaturtechnologie (AP11)

Die Verarbeitung von TiAl-Elektroden zu für das LA geeignetem Pulver wurde seitens TLS erreicht. Die Umsetzbarkeit der Integration benötigter Komponenten zur Vorheizung und lokalen Schutzgasabschirmung innerhalb einer Anlage sowie Vernetzung der Prozessschritte Geometrieerfassung, Bahngenerierung, Reparaturschweißen wurde durch LASERVORM und MABOTIC erfolgreich demonstriert. Das riss- und defektfreie LA von TiAl auf artgleichem Material zum Auffüllen künstlich erzeugter Fehlbereiche konnte am ILT gezeigt werden. Für alle untersuchten Legierungen konnten Verfahrensparameter zum riss- und defektfreien Aufbau von dünn- und dickwandigen Geometrien erarbeitet werden. Durch geeignete Wärmenachbehandlung konnten die hierbei erzeugten und von ACCESS charakterisierten Gefüge weitgehend an die des (Guss-)Grundmaterials angepasst werden. Die artgleiche Reparatur von TiAl-Turbinenschaufeln mittels Laserauftragschweißen ist damit aus verfahrenstechnischer Sicht mit erfolgreicher Durchführung des Projektes ermöglicht worden. Für eine Bewertung der industriellen Anwendbarkeit sind in einem nächsten Schritt die Durchführung von (Langzeit-)Test und die Erhebung umfangreicher mechanischer Kenndaten vonnöten.

2.2 Wichtigste Kostenpositionen

Für den Erfolg des Projektes war unter anderem die Entwicklung der Verfahrenstechnik und Prozessführung zum defektfreien Auftragschweißen (AP4) von entscheidender Bedeutung. Diese Aufgabe erforderte entsprechend hohen Einsatz von Personalressourcen. Insbesondere der Aufwand für die Vorwärmtechnik erwies sich wie auch bei Antragsstellung eingeschätzt als sehr hoch. Zusätzlich wurde vom ILT die Projektkoordination (Organisation von Verbundtreffen, Kommunikation mit dem Projektträger, zeitliche und inhaltliche Koordination der Arbeiten) durchgeführt. Die Mittelverwendung entspricht weitestgehend der ursprünglichen Planung und ist dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit

Die Komplexität der Aufgabenstellung war nur in einem Konsortium lösbar, das Kompetenzen in den Bereichen Gießtechnik, Lasertechnik, Pulverherstellung und Anlagentechnik aufweist. Aufgrund der Zusammensetzung des Konsortiums, das alle Kompetenzen der Prozesskette zur Reparatur/Fertigung abdeckte und der Expertise aller Partner wurden die Projektziele erreicht und teilweise übertroffen. So wurden beispielsweise Untersuchungen und Verfahrensentwicklung parallel für drei Legierungen durchgeführt, die nur für ein bis zwei vorgesehen waren. Aufgrund der großen Fortschritte wurden darüber hinausgehend weitere Arbeitspunkte adressiert (Aufstockung).



2.4 Verwertbarkeit des Ergebnisses

Grundlage der Verwertungsperspektive war der Einsatz von TiAl-Schaufeln in den aktuellen Triebwerken von MTU (GTF u.a. für A320 Neo) und Snecma (LEAPX). Zum Zeitpunkt der Antragsstellung wurde mit ersten ausgemusterten TiAl-Schaufeln 1-3 Jahren nach Projektende gerechnet, für deren Instandsetzung die Reparaturtechnologie je nach Defektbild angepasst und genutzt werden könnte. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen noch keine verschlissenen TiAl-Schaufeln vor. Aus dem beständigen Kontakt zu den betreffenden Industrieunternehmen (OEMs) geht großes Interesse an der erarbeiteten Technologie hervor.

Mit Durchführung des Vorhabens wurde die Kompetenz des ILT in der Verfahrensentwicklung des Laserauftragschweißens um den Werkstoff TiAl ergänzt und in Form eines Produktdatenblatts mit in das Portfolio des Forschungsinstituts aufgenommen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden derzeit bereits für einen anderen spröden Werkstoff (FeAl) in einem öffentlich geförderten Vorhaben genutzt. Weitere Vorhaben sind in Vorbereitung.

Ergebnisse von REPTIL wurden vom ILT bereits während des laufenden Projektes (Ti-2015, GAT 2017) vorgestellt und die Technologie des Laserauftragschweißens von TiAl am Standort des ILT in Aachen (ICTM 2015, AKL 2016 und ICTM 2017) vorgeführt. Aus diesen Aktivitäten ergaben sich bereits interessante neue Kontakte, die auf nationaler und internationaler Ebene zu Zusammenarbeit führen können. Präsentationen zu den Ergebnissen nach Projektende sind fest eingeplant, beispielsweise bei der Werkstoffwoche 2017 (Dresden), Intermetallics 2017 (Bad Staffelstein).

2.5 Fortschritt Dritter

Das Laserauftragschweißen von Titanaluminiden wurde parallel zum Projektverlauf in Frankreich von ONERA an GE4822³ sowie am Fraunhofer IWS⁴ an TNM-B1 und ILT weiter untersucht. Über die additive Verarbeitung der Legierung 4522XD sowie mit Laserauftragschweißen gefertigte oder reparierte Bauteile im Einsatz ist über die vorliegenden REPTIL-Projektergebnisse hinausgehend zum jetzigen Zeitpunkt nach wie vor nichts bekannt.

³ Thomas, M.; Malot, T.; Aubry, P.: Laser Metal Deposition of the Intermetallic TiAl Alloy. In: Metallurgical and Materials Transactions A 192 (2017) 193, S. 519.

⁴ Brückner, F.; Finaske, T.; Willner, R.; Seidel, A.; Nowotny, S.; Leyens, C.; Beyer, E.: Laser Additive Manufacturing with Crack-sensitive Materials. In: Laser Technik Journal 12 (2015) 2, S. 28–30.



2.6 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

Ergebnisse aus REPTIL wurden bisher wie nachfolgend schriftlich veröffentlicht:

- Rittinghaus S-K, Weisheit A, ILT Jahresbericht 2014, S.76
- Rittinghaus S-K, Weisheit A, Mathes M, Garcia Vargas W. Laser Metal Deposition of Titanium Aluminides – A Future Repair Technology for Jet Engine Blades?. In: Proceedings of the 13th World Conference on Titanium, San Diego (CA).

Auszugsweise wird die Veröffentlichung von REPTIL-Ergebnissen in: Rittinghaus S-K, Vogelpoth A, Laser additive manufacturing of titanium aluminides. In: Abstract Book der Intermetallics 2017 erfolgen. Konkret sind darüber hinaus derzeit ein Paper zum Thema Wärmebehandlung von laserauftraggeschweißten Titanaluminiden (ILT, Access) in Bearbeitung sowie eine gemeinsame Veröffentlichung der Projektergebnisse aller Partner in Planung.